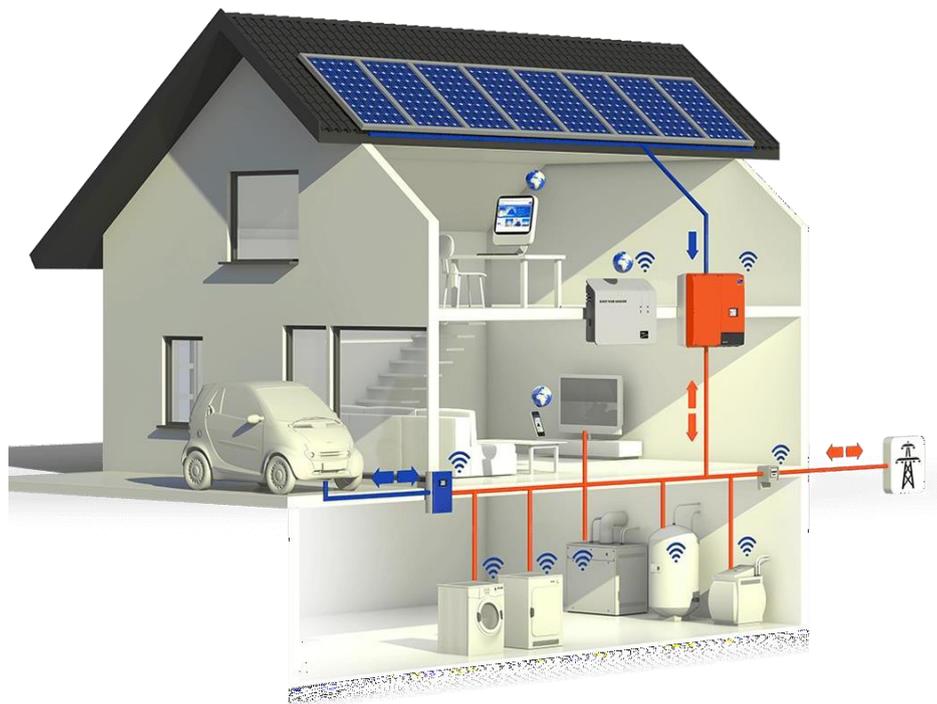


ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ

МАТЕРИАЛЫ

VIII Всероссийской научно-практической
конференции обучающихся и преподавателей

Научное издание



Санкт-Петербург
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики

МАТЕРИАЛЫ

**VIII Всероссийской научно-практической
конференции обучающихся и преподавателей**

**«ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ»**

Научное издание
2025

*Под общей редакцией
директора Института энергетики и автоматизации,
кандидата технических наук, доцента Т. Ю. Коротковой*

Санкт-Петербург
2025

УДК 620.9

ББК 31

Э 651

Редакционная коллегия:

кандидат технических наук, доцент, директор Института энергетики и автоматизации
Т. Ю. Короткова (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики);

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплосиловых установок
и тепловых двигателей

В. В. Барановский (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики);

доктор технических наук, профессор, директор Мегафакультета биотехнологий
и низкотемпературных систем

И. В. Баранов (Национальный исследовательский университет ИТМО)

Ответственный редактор:

старший преподаватель кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей

М. С. Липатов (Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и
дизайна, Высшая школа технологии и энергетики)

Э 651 Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции обучающихся
и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе» /
Минобрнауки РФ; ФГБОУ ВО «Санкт-Петерб. гос. ун-т промышленных технологий и
дизайна»; сост. М. С. Липатов; под общ. ред. Т. Ю. Коротковой. — СПб.: ВШТЭ
СПбГУПТД, 2025. — 249 с.

ISBN 978-5-91646-439-9

В настоящем сборнике представлены материалы VIII Всероссийской научно-
практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в
современном обществе», состоявшейся 15 мая 2025 года в Санкт-Петербурге.

Сборник предназначен для широкого круга читателей, интересующихся научными
исследованиями и разработками, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов
учебных заведений, а также всех, проявляющих интерес к рассматриваемой проблематике, с
целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Материалы представлены в авторской редакции. Ответственность за аутентичность и
точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об
интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов. Организаторы
конференции не несут ответственности перед авторами и/или третьими лицами за возможный
ущерб, вызванный публикацией статьи.

*Материалы конференции размещены в научной электронной библиотеке
elibrary.ru и зарегистрированы в наукометрической базе РИНЦ (Российский индекс
научного цитирования).*

УДК 620.9

ББК 31

ISBN 978-5-91646-439-9

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

© Коллектив авторов, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Соснина А. В., Севастьянова А. С., Аль-Нами Б. А. ПОТЕНЦИАЛ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....	7
Ланин С. Н. ПОДХОДЫ К ДЕТЕКЦИИ АНОМАЛИЙ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ	13
Надежкина С. А., науч. рук. Тарасов Е. М. МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОМПОНЕНТ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ.....	21
Канакотина Е. С., Казбакова И. Р., науч. рук. Тимофеева С. С. ИССЛЕДОВАНИЯ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ ГАЗОПРОВОДОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД.....	26
Богданов Н. П., Демина М. Ю. ПРУЖИННЫЕ ТЕРМОКОМПЕНСАТОРЫ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ	32
Злобин В. Г. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	39
Султанов М. М., Яковлева Е. Ю., Строков И. Н., Жильцов Е. В. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОРЭМ	51
Гиматдинов И. Р. АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИИ	57
Деменкова А. С., Волкова Е. А. БИОТОПЛИВО: ЭКОЛОГИЧНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ.....	63
Змеев М. И., науч. рук. Бойко А. А. ИСТОРИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ВЫЗОВЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ СПГ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	69
Белкин И. В., Лачин В. И., Плотников Д. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОМЕХ (ШУМОВ) НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОАКСЕЛЕРОМЕТРА НА РАБОТАЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТИ.....	83

Овдиенко С. Н., Волкова Е. А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА И НЕФТИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ	90
Ефимов Е. О., науч. рук. Писковацкий Ю. В. ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СРАБАТЫВАНИЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ	95
Самигуллина А. А., Шерчков И. В., науч. рук. Януш О. Б. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОБЩЕСТВО	100
Лукашук Е. Э., науч. рук. Сергеева В. В. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ	105
Слабоусов В. В., науч. рук. Горбунова Л. Н. ЗАЩИТА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО РЕЛЕ ОТ ПУСКОВОГО ТОКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОНДЕНСАТОРОВ	110
Ефимов Е. О. УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ	116
Генатулин Р. Р. науч. рук. Минкин А. С. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В СФЕРЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ	121
Широнина А. М., Воронин И. П., Пышкина М. Д., Ташлыков О. Л. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К НЕЙТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ	124
Широнина А. М., Воронин И. П., Ташлыков О. Л. ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ГК «РОСАТОМ» В КОНТЕКСТЕ РОСТА ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ	130
Буянов П. В., Малинин Н. А., Демина М. Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНОГО ДИЭЛЕКТРИКА	135
Осипов В. И, науч. рук. Демина М. Ю. РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН КРУГЛОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЙ	140

Бикмухаметова Е. Э., науч. рук. Сенюшкин Н. С. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГТУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ	146
Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Кичигина Г. А., Чебыкин Н. А. ПРОЕКТ ВЕТРОПАРКА НА БЕРЕГУ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА	153
Антропова И. А., Воробьева А. П., науч. рук. Сашенко Д. В. КОНСТРУИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО УПАКОВКЕ ТВЕРДЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ С РАСЧЕТОМ МЕХАТРОННОГО ВИБРОБУНКЕРА	160
Ефимов Е. О. КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ГОРОДСКИХ МИКРОРАЙОНОВ: ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛАНСА СПРОСА И ГЕНЕРАЦИИ.....	173
Астахов А. М., науч. рук. Черненькая Л. В. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ ОТКАЗА ПАР ДЕТАЛЕЙ	179
Балакин А. М., Крюкова М. А., Канакин М. К., Коростелева Е. В., Гуренко В. Д., науч. рук. Барсков В. В. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТУРБОДЕТАНДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА ДВИГАТЕЛЯ ПРЯМОГО ТОКА	185
Гильмутдинова З. А. науч. рук. Шагиева Г. К. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ГРАДИРНЯМИ	191
Рафиков Т. Д. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ОСНОВЕ ВЫСШИХ АЛЬФА-ОЛЕФИНОВ	195
Кравчук А. А., науч. рук. Доманов В. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	203
Мустакимов А. М., Гатауллин А. М., науч. рук. Губаев Д. Ф. О ПРИМЕНЕНИИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ В СЕТЯХ 6-35 кВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	208
Зиятдинова А. Р., науч. рук. Уразбахтина Л. Р. РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В ТОПЛИВНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ.....	214

Журова И. С. ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА: ВОЗМОЖНОСТИ И БАРЬЕРЫ	219
Ремизова И. В., Новикова М. А. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ РЕАКТОРНОГО УЗЛА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ CLIPS	229
Орлов С. А., науч. рук. Никифоров Д. К. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОПЛА ЛАВАЛЯ	238
Федорук С. С., Рыжиков В. А. ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ СЖИГАНИЯ В НТВ-ТОПКАХ.....	244

ПОТЕНЦИАЛ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

студент **Соснина Анастасия Владимировна**,
студент **Севастьянова Алиса Сергеевна**,
канд. техн. наук, доцент **Аль-Нами Башер Али**,
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В наше время технология IoT (Internet of Things) получает все больше внимания от ведущих IT компаний и СМИ и считается одной из самых перспективных технологий. Целью нашей научной статьи является обзор и анализ примеров успешного внедрения Интернета вещей в различные сферы жизни человека, а также предсказание будущего развития этой технологии.

Ключевые слова: IoT, IT, Умный дом, Интернет вещей, информационные технологии, информатика.

THE POTENTIAL OF THE INTERNET OF THINGS

Student **Sosnina Anastasiya Vladimirovna**,
Student **Sevastyanova Alisa Sergeevna**,
PhD in Engineeringnology, Associate Professor **Al-Nami Basheer Ali**,
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Nowadays, IoT (Internet of Things) technology is receiving more and more attention from leading IT companies and the media and is considered one of the most promising technologies. The purpose of our scientific article is to review and analyze examples of successful implementation of the Internet of Things in various spheres of human life, as well as predict the future development of this technology.

Keywords: IoT, IT, Smart home, Internet of things, information technology, computer science.

Многие люди знакомы с Интернетом вещей давно. Система «Умный дом» работает как раз с использованием этой технологии, однако никого уже не удивить чайником, который можно поставить на закипание с помощью смартфона. Дорожные камеры, фиксирующие превышение скорости, тоже являются частью IoT. После реакции на нарушение допустимого скоростного режима, они делают снимок автомобиля и отправляют его следующему элементу системы для анализа. Таким образом, Интернет вещей не является чем-то волшебным и недоступным, каждый из нас постоянно встречается с этой технологией в повседневной жизни. Но не стоит думать, что IoT это только про

«Умные дома» и системы наблюдения [1]. На самом деле область применения Интернета вещей не имеет границ. Именно поэтому технология развивается с невероятной скоростью. Как сказал технический журналист Джаред Ньюман: «И точно так же, как любая компания, которая блаженно игнорировала Интернет на рубеже веков, те, кто игнорирует Интернет вещей, рискуют остаться позади».

Великий ученый-изобретатель в области физики Никола Тесла предсказал появление Интернета вещей еще в 1926 году. В своем интервью американскому журналу *Collier's* Никола Тесла сказал: «Когда беспроводная связь будет полностью освоена, вся Земля превратится в огромный мозг, которым она, по сути, и является, где все является частицами реального и ритмичного целого». Кроме того, он заявил, что предметы, которые люди будут использовать для мгновенной связи друг с другом, будут намного меньше старых телефонных аппаратов и смогут поместиться в кармане жилетки [2].

Официальную историю Интернета вещей начал Джон Ромки, один из создателей TCP/IP протокола, на котором базируется весь интернет. В 1990 году Ромки посетил выставку технологий «Interop», где продемонстрировал публике интересный эксперимент. Он взял с собой свой домашний тостер и смог приготовить в нем тост без прямого контакта с устройством, управляя тостером удаленно через ПК.

Сам термин «Интернет вещей» был придуман только в 1999 году, но им особо не пользовались до 2010-х годов, так как область IoT не развивалась до этого времени.

Архитектура

На данный момент в мире насчитывается около 18 млрд устройств, подключенных к IoT. Такое количество элементов обязывает Интернет вещей иметь устойчивую и продуктивную архитектуру. Поэтому технология состоит из нескольких слоев. Рассмотрим каждый из них по отдельности.

Самый простой уровень – уровень устройств. В него входят датчики и сенсоры. Они измеряют нужные нам данные, например, измеряют температуру, или выполняют какую-либо работу, к примеру включают/выключают свет.

Далее идет уровень связи, который отвечает за передачу данных от устройств к облачным сервисам или другим устройствам. Он включает в себя различные протоколы и технологии связи, такие как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN, 5G и другие. Выбор технологии зависит от требований к дальности, скорости передачи данных и энергопотреблению [3].

Третий уровень – уровень обработки и хранения данных. Именно сюда приходят данные, собранные датчиками. Данные могут обрабатываться как на устройствах, так и в облаке. Благодаря этому уровню объем передаваемых между устройствами данных сокращается, что позволяет обеспечить наиболее быструю работу приложений. Кроме того, на этом уровне собранные и обработанные данные хранятся в облачных или локальных хранилищах, что позволяет в будущем иметь доступ к данным из прошлого (рис. 1).



Рисунок 1 – Архитектура IoT

Финальный уровень – интерфейсы, то есть приложения/сайты, которыми пользуется человек. С помощью интерфейсов люди могут легко взаимодействовать с устройствами IoT, получать уведомления и данные прямо на свое устройство [4].

Однако существует еще один уровень, который охватывает сразу все аспекты Интернета вещей. Одной из самых важных частей любой технологии является безопасность, и IoT не исключение, поэтому часто безопасность выделяют как отдельный, самостоятельный уровень в архитектуре. Этот уровень включает в себя механизмы аутентификации, шифрования данных, защиты от несанкционированного доступа и обеспечения конфиденциальности. Чтобы защитить данные и устройства от угроз, безопасность должна быть встроена на всех уровнях архитектуры.

Настоящее Интернета вещей

На сегодняшний день IoT охватывает множество областей, включая:

Умный дом: в этой сфере технологии Интернета вещей создают не только современные, но и комфортные условия проживания. Существует множество устройств: датчики движения и протечки, умные замки, умный свет, умные розетки, видеодомофоны, системы безопасности и т. д. Все это интегрируется в единую информационную систему, что позволяет владельцу управлять ими на расстоянии, например, регулировать температуры или включать/выключать света с помощью телефона [5].

Сельское хозяйство: для данной отрасли существует множество приложений Интернета вещей. Системы мониторинга позволяют фермерам отслеживать условия окружающей среды (данные о температуре или количестве осадков), уровень влажности почвы и состояние растений. Это

помогает повысить урожайность и качество продукции.

Промышленность: в промышленности IoT играет ключевую роль в повышении эффективности и точности мониторинга состояния оборудования. Такое устройство, как актуатор, предоставляет оператору контроль и управление производственными процессами.

Транспорт: в данной отрасли IoT помогает в оптимизации логистики, в удобстве перемещения и в повышении безопасности. Использование Интернета вещей охватывает все элементы транспортных систем, включая само транспортное средство, инфраструктуру и водителя/пассажира. Использование интеллектуальных сенсорных датчиков и систем навигаций обеспечивает связь с транспортным средством и предоставляет информацию о транспортном движении на дорогах, оптимальных маршрутах [6].

Медицина: для этой сферы IoT технологии используются для удаленного мониторинга состояния пациентов с помощью таких устройств, как: мониторы артериального давления, усовершенствованные слуховые аппараты и кардиостимуляторы. С помощью них данные передаются врачам в режиме реального времени, что позволяет своевременно реагировать на изменения в состоянии здоровья человека [2, 7].

Будущее Интернета вещей

Будущее Интернета вещей обещает быть еще более захватывающим. Ожидается, что к 2030 году количество подключенных устройств приблизится к 30 миллиардам (рис. 2).

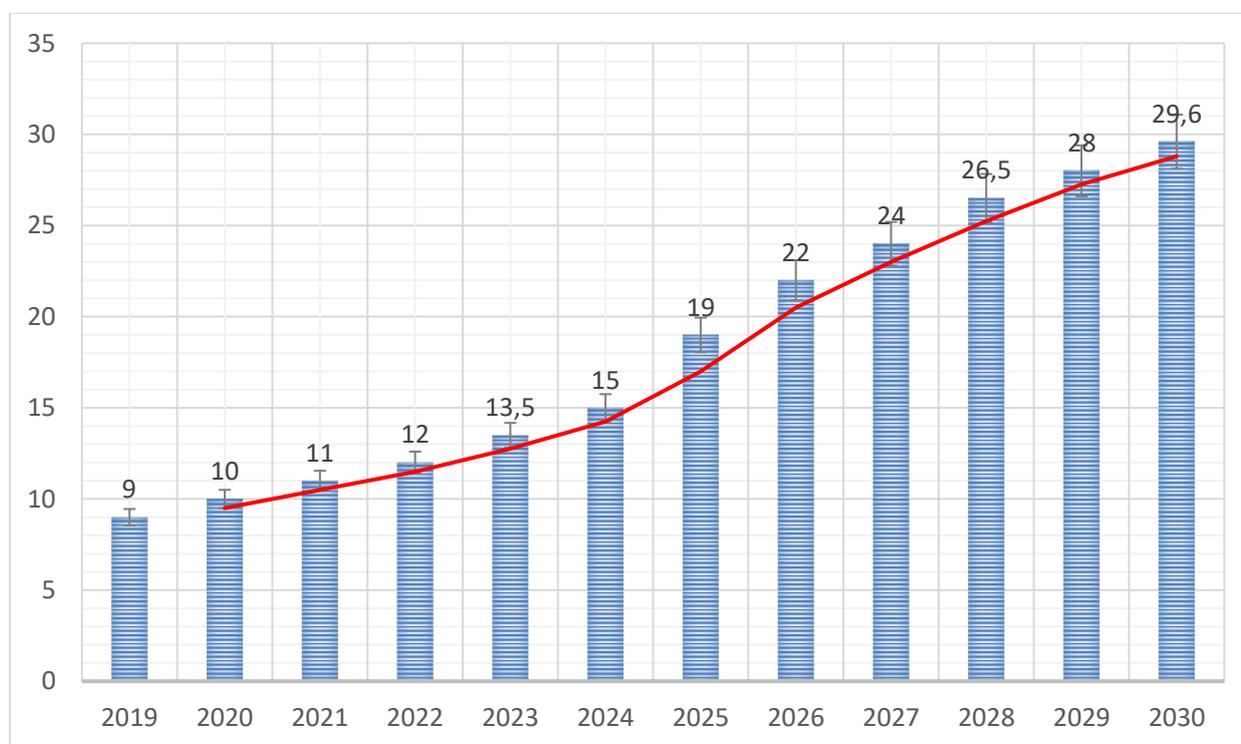


Рисунок 2 – Количество устройств, подключенных к IoT по годам

Будущее развития IoT будет зависеть от технологий, которые уже формируют новые перспективы.

Искусственный интеллект: данная тенденция позволит устройствам Интернета вещей анализировать собранные данные, предсказывать события и принимать решения без человеческого вмешательства.

Технологии 5G: пятое поколение мобильной связи обеспечит более высокую скорость передачи данных и минимальную задержку, а также позволит подключать большее количество устройств к системе IoT, что открывает новые горизонты для его применения [3, 8].

Блокчейн: с увеличением числа подключенных устройств будет возрастать и важность вопросов конфиденциальности. Блокчейн может стать ключевым элементом в обеспечении безопасности управления IoT-устройствами. Децентрализованная сеть, которая основана на блокчейне, упрощает проверку и отслеживание данных, что позволяет уменьшить риск утечек информации и DDoS-атак [9].

Заключение

Технология Интернета вещей – очень сложная система, имеющая многоуровневую архитектуру. В настоящий момент сфера IoT развивается с невероятной скоростью, что порождает интерес ученых и ведущих IT компаний. Ученые считают, что к 2030 году количество устройств подключенных к Интернету вещей будет около 30 миллиардов. Такой огромный прорыв будет связан с внедрением технологии почти во все сферы жизни человека. Это значит, что совсем скоро нас ждут кардинальные изменения как в производстве, так и в повседневной жизни!

Список литературы:

1. Аль-Нами, Б. А. Применение микроконтроллеров для управления системами – «умный дом» / Б. А. Аль-Нами, А. А. Медунов. – Текст : электронный // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) : сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах / Под редакцией С. И. Макаренко, сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 177-180.
2. Аль-Нами, Б. А. Умный дом. Функциональность и области применения / Б. А. Аль-Нами, Г. П. Узкий. – Текст : электронный // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) : сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах / Под редакцией С. И. Макаренко, сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 261-264.
3. Аль-Нами, Б. А. Анализ экосистемы умного дома и ее безопасности / Б. А. Аль-Нами, В. С. Халютин. – Текст : электронный // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023) : сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-

методической конференции. В 4-х томах / Под редакцией С. И. Макаренко, сост. В. С. Елагин, Е. А. Аникевич. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 264-267.

4. Довгаль, В. А. Интернет вещей: концепция, приложения и задачи / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль. – Текст : электронный // Ежеквартальный рецензируемый, реферируемый научный журнал «Вестник АГУ». – 2018. – Выпуск 1(216). – С. 129-135.

5. IoT Архитектура : [сайт]. – 2025. – URL: <https://habr.com/ru/articles/455377/> (дата обращения: 14.02.2025). – Текст : электронный.

6. МТС – Интернет Вещей IoT : [сайт]. – 2025. – URL: <https://moskva.mts.ru/business/internet-veshhejiot> (дата обращения: 14.02.2025). – Текст : электронный.

7. От тостера до беспилотника. Как появился интернет вещей и почему он выстрелил лишь спустя 30 лет. : [сайт]. – 2025. – URL: https://habr.com/ru/companies/kauri_iot/articles/481702/ (дата обращения: 14.02.2025). – Текст : электронный.

8. Кирсанова, К. Д. Исследование технологии интернета вещей (IoT) и ее применения в различных областях / К. Д. Кирсанова // Современные научные исследования и инновации. – 2023. – № 6. – URL: web.snauka.ru (дата обращения: 15.02.2025).

9. Интернет вещей в научно-образовательной сфере и их безопасность : [сайт]. – 2025. – URL: <https://elar.rsvpu.ru> (дата обращения: 15.02.2025).

© Соснина А. В., Севастьянова А. С., Аль-Нами Б. А., 2025

ПОДХОДЫ К ДЕТЕКЦИИ АНОМАЛИЙ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

аспирант **Ланин Сергей Николаевич**,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к детекции аномалий во временных рядах параметров газотранспортных потоков. Особое внимание уделяется использованию методов машинного обучения, графового анализа и статистического контроля. Рассматриваются принципы выявления аномалий в пропускной способности газопроводов и физико-химических параметрах газа. Подчеркивается экономическая значимость обнаружения аномалий для оптимизации работы Единой системы газоснабжения, минимизации потерь и повышения надежности транспортировки природного газа. Предлагаются практические методы и алгоритмы, позволяющие повысить точность детекции аномалий и снизить эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: аномалии, временные ряды, газотранспортная система, машинное обучение, графовые методы, статистический анализ, детекция аномалий, прогнозирование, пропускная способность, физико-химические параметры газа.

APPROACHES TO ANOMALY DETECTION IN TIME SERIES OF GAS TRANSPORTATION PARAMETERS

PhD Student **Lanin Sergey Nikolaevich**,
Saint Petersburg State University of Economics,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper explores approaches to anomaly detection in time series of gas transportation parameters. Special attention is given to the use of machine learning methods, graph analysis, and statistical control. The study examines techniques for identifying anomalies in pipeline throughput and the physicochemical properties of gas. The economic significance of anomaly detection is emphasized, focusing on optimizing the Unified Gas Supply System's efficiency, minimizing losses, and improving the reliability of natural gas transportation. Practical methods and algorithms are proposed to enhance anomaly detection accuracy and reduce operational costs.

Keywords: anomalies, time series, gas transportation system, machine learning, graph methods, statistical analysis, anomaly detection, forecasting, pipeline capacity, physicochemical gas parameters.

Единая система газоснабжения (ЕСГ) представляет собой сложный технологический комплекс, включающий в себя объекты добычи, транспортировки, хранения и распределения газа. Она обеспечивает стабильное и надежное снабжение природным газом потребителей как внутри страны, так и за ее пределами. Эффективное управление ЕСГ требует непрерывного мониторинга и анализа данных для оптимизации процессов и минимизации рисков.

В настоящее время значительное количество научных исследований посвящено разработке моделей, в дополнение к детерминированным моделям, основанным на методах машинного обучения и нейронных сетей. Основными задачами, на решение которых направлены такие стохастические подходы, являются прогнозирование потребления газа промышленными и розничными потребителями (населением) [1], планированием потоков газа по ЕСГ [2] выявление аномалий и предсказание выхода их допустимых режимных пределов работы технологического оборудования, а также модели, направленные на оптимизацию экономических показателей транспортировки газа. Стохастические модели позволяют выявлять скрытые закономерности в данных, предсказывать поведение систем и оперативно реагировать на потенциальные угрозы.

Однако наиболее узким местом подобных моделей является качество исходных данных. Ошибки измерений, пропуски в данных и аномалии могут значительно снижать точность работы моделей машинного обучения и приводить к неверным управленческим решениям. Без надежных и достоверных данных даже самые передовые алгоритмы могут давать некорректные результаты.

В связи с этим анализ данных на наличие ошибок, аномалий и пропусков становится критически важной задачей. Выявление и корректировка таких данных позволяют повысить точность моделей, улучшить качество прогнозирования и повысить общую экономическую эффективность управления объектами ЕСГ и потоками природного газа, в том числе для экономии топливно-энергетических ресурсов, получения дополнительных выгод и сокращению рисков за счет грамотного управления компонентным составом транспортируемого газа.

Вопросы поиска аномалий во временных рядах широко исследуются в научной литературе. В работе Заварзина Д. В. [3] проведен обзор различных методов обнаружения аномалий, включая статистические и основанные на нечеткой логике. В статье Чеснокова М. Ю. [4] рассматривается подход, использующий ансамбли алгоритмов DBSCAN для адаптивного подбора параметров и повышения точности детекции аномалий.

Шкодырев В. П. и др. [5] классифицируют виды аномалий и анализируют методы их обнаружения, включая контекстуальные и коллективные аномалии. В их работе особое внимание уделяется анализу данных в потоковых системах, что важно для реального времени. Девришев Н. Э. и др. [6] предлагают метод прогнозирования, основанный на использовании градиентного бустинга и рекуррентных нейронных сетей, что демонстрирует высокую точность в детекции аномалий.

Романов Н. А. [7] в своей диссертации исследует применение глубоких нейронных сетей для детекции аномалий во временных рядах, включая модели Seq-to-Seq и вариационные автоэнкодеры. Раюшкин Э. С. и др. [8] представляют инструмент для обнаружения аномалий в многомерных временных рядах, реализованный в среде R, что облегчает применение статистических методов и машинного обучения в практических задачах.

Кроме того, зарубежные исследования также активно развивают данную область. В работе Chandola et al. [9] рассмотрены ключевые аспекты обнаружения аномалий во временных рядах и классификация методов на основе их применимости в различных доменах. Работы Aguirre & Vasilakos [10] исследуют использование нейросетевых методов глубокого обучения для автоматизированного обнаружения аномалий в потоковых данных.

Тем не менее авторы в своих работах исследуют временной ряд в отрыве от процессов, происходящих во взаимосвязи с исследуемым процессом. В сложных системах данные одного узла всегда коррелируют с данными смежных узлов. В газотранспортной отрасли, например, данные одной компрессорной станции тесно связаны с другой, а поток газа не может превышать пропускную способность газопровода.

Представление ЕСГ как графа

ЕСГ можно представить в виде большого направленного графа, где узлы соответствуют различным объектам газотранспортной системы, таким как компрессорные станции, газораспределительные узлы и точки потребления, а ребра – газопроводы или системы (совокупности) газопроводов, соединяющие эти объекты. В таком представлении связи между узлами выражают физические и технологические ограничения, такие как пропускная способность трубопроводов, давление в сети и параметры состава газа. Такое графовое представление позволяет более точно моделировать поведение системы, выявлять аномалии и оптимизировать потоки газа.

Исследования, посвященные моделированию ЕСГ в виде графа, широко представлены в литературе. В работе Кулика В. С. [11] рассмотрены методы оптимизации режимов транспортировки природного газа с учетом неопределенности исходных данных, что позволяет адаптивно управлять потоками в системе. Также в исследованиях Казака А. С. [12] предложен метод узловых потенциалов для расчета режимов работы магистральных газопроводов, что является важным инструментом для анализа и оптимизации потоков в ЕСГ. Данные исследования подтверждают, что графовые модели позволяют учитывать сложные взаимосвязи между объектами газотранспортной системы, что критически важно для детекции аномалий и повышения эффективности функционирования ЕСГ.

Методы обнаружения аномалий в графах

Поиск аномалий в графах – важный аспект анализа сложных сетевых систем, таких как газотранспортные сети. Существует несколько методов, которые могут быть применены для обнаружения ошибок и аномалий в графах:

- Методы кластеризации: Spectral Clustering (анализ спектральных свойств графа для выделения необычных узлов или аномальных соединений), Community Detection (модульность) (выделение групп узлов с плотными

связями, где отклоняющиеся элементы могут указывать на аномалии).

- Алгоритмы центральности: Degree Centrality (узлы с аномально высокой или низкой степенью могут указывать на ошибки в данных), Betweenness Centrality (узлы, имеющие необычно высокую проходимость потоков, могут быть потенциальными узкими местами или точками сбоя).

- Графовые нейронные сети (GNN): автоэнкодеры для графов (Graph Autoencoders) могут выявлять узлы или ребра, отклоняющиеся от нормального поведения; глубокие модели обучения, такие как Graph Attention Networks (GAT), позволяют анализировать локальные аномалии на основе структурных связей.

- Алгоритмы случайных блужданий: PageRank (выявление узлов, чья значимость в графе отклоняется от ожидаемой), Random Walk with Restart (RWR) (анализ устойчивости маршрутов потока и выявление нарушений в ожидаемом поведении сети).

- Методы статистического анализа: выявление выбросов на основе распределения степеней узлов или длины путей между узлами; поиск несоответствий в потоке газа, используя распределение транспортируемых объемов.

Эти методы позволяют комплексно анализировать графовую структуру ЕСГ, выявляя потенциальные аномалии, ошибки, выбросы в режимно-технологических данных и критические узлы, требующие дополнительного контроля.

Однако применимость вышеперечисленных методов к реальным данным требует решения дополнительных вопросов или участия диспетчерского персонала Центрального производственно-диспетчерского Департамента. При авариях, остановках на ремонты или обслуживание газопроводов вышеперечисленные методы могут сигнализировать о наличии аномалий, хотя в реальности аномалий нет. Большинство методов анализа графов ориентированы на статическую структуру сети, тогда как в динамических системах, таких как ЕСГ, необходимо учитывать временные изменения и закономерности в поведении системы. В связи с этим требуется разработка специализированных методов, адаптированных к реальным условиям функционирования газотранспортной сети, которые учитывают технологические операции и временные ограничения.

Использование первого правила Кирхгофа для поиска аномалий

Одним из возможных методов обнаружения аномалий в газотранспортной системе является применение первого правила Кирхгофа [13]. В классической электротехнике это правило формулируется следующим образом: сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из него. Этот принцип можно адаптировать для анализа потоков газа в ЕСГ.

В газотранспортной сети аналогичный баланс можно рассматривать в терминах потоков газа: объем газа, входящий в узел (например, компрессорную станцию или газораспределительный пункт), должен соответствовать объему газа, выходящему из него, с учетом потребления в самом узле, например, на собственные технологические нужды и возможных потерь. Если наблюдаются значительные отклонения от этого баланса, это может указывать на наличие

аномалий в поступающих данных в связи с некорректными показаниями измерительных приборов или сбоев в передаче данных, или проблемы технического характера, таких как утечки, аварии, несанкционированные врезки в газораспределительные газопроводы.

Применение данного метода требует корректного учета всех потоков газа, что возможно при наличии надежных данных с датчиков давления, расхода и температуры. В совокупности с графовыми методами анализа этот подход позволяет выявлять систематические ошибки в данных, а также неожиданные изменения в сети, которые могут свидетельствовать о авариях или нештатных ситуациях.

Использование первого правила Кирхгофа может быть дополнено методами машинного обучения, которые позволяют учитывать исторические данные и выявлять неявные закономерности, что делает процесс обнаружения аномалий более точным и адаптивным.

Анализ аномалий пропускной способности на основе квантильного метода

Аномалии в пропускной способности газопроводов можно идентифицировать не на основании паспортных данных или проектной документации, а на основе ретроспективных данных за продолжительный период. Для этого используется квантильный анализ, который позволяет выделить значения, выходящие за пределы типичного диапазона.

Квантиль – это статистическая величина, разделяющая распределение данных на определенные части. Например, 99 %-квантиль означает, что 99 % всех наблюдаемых значений находятся ниже этой границы, а 1 % значений выходит за нее.

Применяя этот метод к анализу пропускной способности газопроводов, можно определить границы нормального функционирования системы. Если значение потока газа выходит за этот интервал, находясь при этом в пределах паспортной пропускной способности, то такие данные требуют дополнительного изучения. Это может указывать на потенциальные аномалии, например, резкие изменения в режимах работы сети, неучтенные эксплуатационные факторы или некорректные измерения.

Использование квантильного метода в сочетании с анализом временных рядов и графовыми подходами позволяет повысить точность детекции аномалий и улучшить контроль над эксплуатационными параметрами газотранспортной системы.

Анализ физико-химических параметров газа для выявления аномалий

Физико-химические параметры газа, такие как состав, плотность, влажность, теплотворная способность и содержание примесей, являются критически важными для оценки качества и эксплуатационных характеристик газотранспортной системы. Отклонения от нормальных значений этих параметров могут свидетельствовать о проблемах в системе, включая изменения в качестве газа, некорректные показания приборов или непредвиденные эксплуатационные воздействия.

В системах с параллельными нитками газопроводов или на входах в

газоперекачивающие агрегаты (ГПА) при параллельной схеме работы компрессорных станций (КС) физико-химические параметры газа должны быть сопоставимы или даже равны. В то же время при последовательной загрузке ГПА такие параметры, как давление и температура, должны изменяться (увеличиваться) в процессе компримирования газа в КС.

Для выявления таких аномалий можно использовать статистический анализ, методы машинного обучения и контрольные правила. Например, определение доверительных интервалов на основе исторических данных и выявление выбросов; использование методов кластеризации для анализа групп сходных параметров газа; применение регрессионных моделей для прогнозирования ожидаемых значений параметров и сопоставление с реальными данными.

Дополнительное изучение таких данных может позволить выявить аномальные изменения в составе газа, вызванные смешением потоков, изменениями в технологии подготовки газа или возможными ошибками в измерениях. Это особенно важно для обеспечения стабильности работы газотранспортной системы и предотвращения нештатных ситуаций.

Концептуальная архитектура модуля детекции аномалий временных рядов

Модернизированная Автоматизированная Система Диспетчерского Управления (МАСДУ) является ядром диспетчерского управления ЕСГ. В соответствии с СТО ПАО «Газпром» 2-3.5-454 все режимно-технологические и учетно-балансовые данные поступают с нижнего (четвертого) уровня диспетчерского управления последовательно на верхний и сохраняются в подсистеме хранения МАСДУ ЕСГ. Количество параметров, передаваемых с нижнего уровня на верхний, с начала эксплуатации системы достигает 247 тыс. Общее число собираемых параметров в МАСДУ ЕСГ превысило 359 тыс. [14, стр. 39]. Каждый параметр, передаваемый из SCADA-систем нижнего уровня или рассчитываемый на любом уровне диспетчерского управления, имеет свой уникальный постоянный идентификатор в подсистеме хранения МАСДУ (GUID). Для создания в МАСДУ модуля детекции аномалий во временных рядах данных, поступающих в подсистему хранения необходимо провести анализ структуры идентификаторов и выделить показатели, которые по своей сущности должны коррелировать друг с другом. Функциональность модуля должна заключаться в проверке таких увязанных между собой показателей и идентификацию их отклонений друг от друга. При выявлении отклонения выше заданного оператором или полученного в результате статистических расчетов значения модуль должен сигнализировать о вероятном поступлении аномальных или ошибочных данных в подсистему хранения. Кроме того, целесообразно установить у каждого значения параметра, поступающего в подсистему хранения МАСДУ дополнительный параметр: степень достоверности полученного или рассчитанного показателя. После выявления аномальных значений или значений, достоверность которых ниже заданного значения оператору или диспетчеру необходимо проверить это значение ручным способом.

Кроме того, в перспективе ручная проверка оператором или диспетчером

показателей может являться базой для обучения модели нейронной сети классификационного типа. Ответы диспетчера (TRUE или FALSE) на выявленную модулем детекции аномалию необходимо фиксировать и при поступлении из модуля аналогичной или схожей аномалии в первую очередь направлять ее в модуль автоматического определения действительности выявленной аномалии, а затем направлять оператору. Классификационная нейросеть такого типа будет обучаться с реальным учителем – диспетчером. Такие метрики классификации как Precision и Recall рассчитанные в результате проверки ответов нейросети оператором в последствии могут стать основной для автоматического отнесения предполагаемых аномалий к действительным.

Заключение

Обнаружение аномалий во временных рядах в газотранспортной системе является не только технической, но и экономической задачей. Наличие ошибок в данных может привести к неверным решениям при планировании транспортировки газа, что в свою очередь сказывается на эффективности работы всей системы. Своевременное выявление аномалий способствует оптимизации эксплуатационных процессов, снижению потерь и предотвращению возможных аварий, что ведет к существенному снижению затрат.

С экономической точки зрения применение методов детекции аномалий способствует сокращению затрат на диагностику и техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт оборудования. Автоматизация процессов анализа данных и внедрение интеллектуальных алгоритмов позволяют уменьшить человеческий фактор и повысить скорость реакции на потенциальные проблемы. Кроме того, снижение риска нештатных ситуаций приводит к повышению надежности поставок газа и, как следствие, укреплению доверия со стороны потребителей и партнеров.

Использование комплексного подхода к анализу аномалий, включающего методы машинного обучения, статистики и графовой теории, делает процесс мониторинга более точным и адаптивным. В будущем возможно дальнейшее развитие данных методик с интеграцией предсказательных моделей, учитывающих динамику газотранспортной системы и влияющие внешние факторы. Это позволит не только выявлять аномалии, но и предсказывать их появление, что приведет к еще большей эффективности управления ресурсами и затратами в отрасли.

Список литературы:

1. Анализ применимости различных методов машинного обучения для прогнозирования почасового газопотребления в разрезе газотранспортных обществ / С. Н. Панкратов, А. С. Казак, А. Н. Лобанов, Д. В. Горлов. – Текст: непосредственный // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 6(599). – С. 5-14.
2. Сарданашвили, С. А. Применение технологий искусственного интеллекта в разработке инновационной отечественной системы поддержки принятия диспетчерских решений в области моделирования, планирования и управления межрегиональными потоками газа в ЕСГ / С. А. Сарданашвили, В. А. Швечков.

- Текст: непосредственный // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2019. – № 8(553). – С. 31-37. – EDN CLZBWF.
3. Заварзин, Д. В. К вопросу поиска аномалий во временных рядах / Д. В. Заварзин. – Текст: непосредственный // Инновации в науке. – 2014. – № 29. – С. 59-64.
4. Чесноков, М. Ю. Поиск аномалий во временных рядах на основе ансамблей алгоритмов DBSCAN / М. Ю. Чесноков. – Текст: непосредственный // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2018. – № 1. – С. 98-106.
5. Обзор методов обнаружения аномалий в потоках данных / В. П. Шкодырев, К. И. Ягафаров, В. А. Баштовенко, Е. Э. Ильина. – Текст: электронный // Proceedings of the Second Conference on Software Engineering and Information Management. – St. Petersburg, 2017. – URL: ceur-ws.org/Vol-1864/paper_33.pdf.
6. Девришев, Н. Э. Обнаружение аномалий во временных рядах с помощью методов прогнозирования / Н. Э. Девришев, Ю. Хэ, О. Л. Петросян. – Текст: непосредственный // Процессы управления и устойчивость. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 202-209. – EDN LOQPGR.
7. Романов, Н. А. Детектирование аномалий во временных рядах при помощи глубоких нейронных сетей: магистерская диссертация / Н. А. Романов; МГУ имени М. В. Ломоносова. – М., 2018. – 35 с. – Текст: непосредственный.
8. Выявление аномалий в многомерных временных рядах с помощью пакета на языке R / Э. С. Раюшкин, М. В. Щербаков, И. Д. Казаков, В. О. Колесникова. – Текст: непосредственный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9(3). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.001.
9. Chandola, V., Banerjee, A., Kumar, V. Anomaly detection: A survey. ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41. No. 3. P. 1-58.
10. Aguirre, M., Vasilakos, A. V. Neural Network-Based Anomaly Detection in Streaming Data: Applications and Challenges. Journal of Machine Learning Research, 2021.
11. Кулик, В. С. Оптимизация режимов транспортировки природного газа по системам магистральных газопроводов в условиях неопределенности исходных данных: диссертация кандидата технических наук: 05.13.18 / Кулик Василий Сергеевич; [Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина]. – Москва, 2016. – 181 с. – Текст непосредственный.
12. Казак, К. А. Разработка метода расчета неустановившихся режимов транспорта газа по участку трубопровода при возникновении утечки / К. А. Казак, А. С. Казак. – Текст: непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 2 (28). – С. 237.
13. Йигиталиева, Д. О. К. Применение первого закона Кирхгофа в электроэнергетической системе / Д. О. К. Йигиталиева. – Текст: непосредственный // Наука, техника и образование. – 2019. – № 10 (63). – С. 31-33.
14. Панкратов, С. Н. Развитие диспетчерского управления ПАО «Газпром» / С. Н. Панкратов. – Текст: непосредственный // Газовая промышленность. – 2023. – № 1 (844). – С. 36-39.

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОМПОНЕНТ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

аспирант **Надежкина Снежана Андреевна**,
науч. руководитель: д-р техн. наук, профессор **Тарасов Евгений Михайлович**,
Приволжский государственный университет путей сообщения,
г. Самара, Российская Федерация

Аннотация. В статье предложена методика формирования комплексной модели управления жизненным циклом компонент рельсовой линии, включая токопроводящие и изолирующие стыки. На основе анализа данных диагностики и многокритериальной оптимизации представлена структура, позволяющая прогнозировать износ элементов железнодорожной инфраструктуры и в кратчайшие сроки минимизировать риски возникновения внештатных ситуаций.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, рельсовая линия, оценка состояния, многокритериальная оптимизация, токопроводящий стык, изолирующий стык.

THE METHOD OF MONITORING THE CONDITION OF THE COMPONENTS OF THE RAIL LINE

Postgraduate student **Nadezhkina Snezhana Andreyevna**,
Academic Advisor: Doctor in Engineering, Professor **Tarasov Evgeny Mikhailovich**,
Volga State Transport University,
Samara, Russian Federation

Abstract. The article proposes a methodology for the formation of a comprehensive lifecycle management model for rail line components, including conductive and insulating joints. Based on the analysis of diagnostic data and multi-criteria optimization, a structure is presented that makes it possible to predict the wear of elements of the railway infrastructure and minimize the risks of emergency situations in the shortest possible time.

Keywords: railway transport, rail line, condition assessment, multi-criteria optimization, conductive joint, insulating joint.

Жизненный цикл компонент рельсовой линии является ключевым аспектом в установлении «высокого показателя безопасности и эффективности работы систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) и железнодорожного транспорта в целом» [1]. Токопроводящие и изолирующие стыки как основные элементы, на которые приходится значительная доля сбоев, а именно 18 % на токопроводящие стыки, около 30 % на изолирующие, требуют особого внимания вследствие их важности в плане обеспечения общей

функциональности железнодорожной инфраструктуры и безопасности перевозочного процесса [2, 3].

Целью работы является формирование общей методики управления жизненным циклом компонент рельсовой линии для своевременного прогнозирования и устранения возникающих сбоев в их работе.

Одинадцать основных этапов жизненного цикла компонент рельсовой линии, соответствующие в полной мере международным стандартам качества ISO 9000, отражены в таблице.

Таблица – Ключевые этапы жизненного цикла компонента рельсовой линии

Этап жизненного цикла		Суть этапа
1	Запрос на введение в эксплуатацию	Идентификация требований к созданию нового компонента, формирование конкретного запроса на его непосредственную разработку
2	Проектирование элемента	Разработка технической документации и осуществление проектирования компонента на основе установленных требований и стандартов
3	Планирование мер по вводу в эксплуатацию	Определение конкретной последовательности действий
4	Обеспечение необходимыми комплектующими	Подготовительный этап закупки необходимых материалов для производства элемента
5	Реализация производства	На основе всех этапов технологического процесса производство компонента
6	Обеспечение целостности элемента	Осуществление контроля качества и проверки показателя целостности компонента перед непосредственной установкой
7	Установка элемента	Размещение компонента на место эксплуатации с учетом заданных настроек
8	Введение в эксплуатационные режимы	Реализация процесса настройки и тестирования свойств компонента в реальных обстоятельствах
9	Техническое обслуживание	Проведение на регулярной основе проверки текущего состояния компонента для существенного продления его срока службы
10	Поддержание работоспособности элемента	Установление регулярного функционирования компонента за счет непрерывного мониторинга и своевременного устранения нештатных ситуаций
11	Утилизация и переработка	Безопасное устранение последствий окончания срока эксплуатации элемента и возможная реализация переработки компонентов для повторного применения

На текущий момент контроль состояния основных компонентов рельсовой линии, таких как изолирующие и токопроводящие стыки, не осуществляется в непрерывном режиме. Мониторинг этих компонент проводится вручную, с привлечением двух сотрудников предприятия, выполняющих проверку работоспособности элементов в соответствии с установленным графиком технического обслуживания дважды в год. Такой подход не дает возможности обеспечить постоянное наблюдение за состоянием компонент рельсовой линии и, соответственно, затрудняет достижение высоких показателей их надежности и своевременное определение предотказных состояний [4]. В связи с этим формирование методики, позволяющей получать актуальные содержательные данные о текущем состоянии элементов в процессе их эксплуатации, а также прогнозирование возможных сбоев в их работе, становится важной и востребованной задачей.

Для детализации этапов жизненного цикла компонент РЛ авторами разработана модель, отражающая основные контрольные процессы по эксплуатации компонент рельсовой линии (рис.) [5].

Таким образом, применение диагностики существенно увеличивает срок эксплуатации компонент рельсовой линии, а именно на этапах 8, 9, 10 модели жизненного цикла. Применение методики для оценки состояния компонент РЛ во время эксплуатации не только корректирует жизненный цикл изолирующего и токопроводящих стыков, но также значительно повышает их надежность, делая подход по диагностики компонент рельсовой линии в рамках жизненного цикла уникальным и оригинальным [6].

Внедрение современной гибкой модели, основанной на актуальных данных о состоянии элементов железнодорожного пути, позволяет достичь высокого уровня надежности и эффективности работы железнодорожной инфраструктуры и организации перевозочного процесса. Такой подход учитывает степень износа каждого компонента, позволяет выявлять и предотвращать появляющиеся отказы на ранних стадиях.

Благодаря использованию технической диагностики в режиме реального времени, становится возможным непрерывно отслеживать целостность и работоспособность элементов рельсовой линии, значительно увеличивать срок их эксплуатации, а также минимизировать количество сбоев в работе.

Таким образом, применение разработанной методики диагностики и прогнозирования состояния элементов железнодорожной инфраструктуры способствует:

- повышению надежности и безопасности функционирования в процессе эксплуатации;
- снижению затрат на ремонт и замену используемых элементов.
- увеличению межремонтных интервалов за счет своевременного выявления износа эксплуатируемого оборудования.

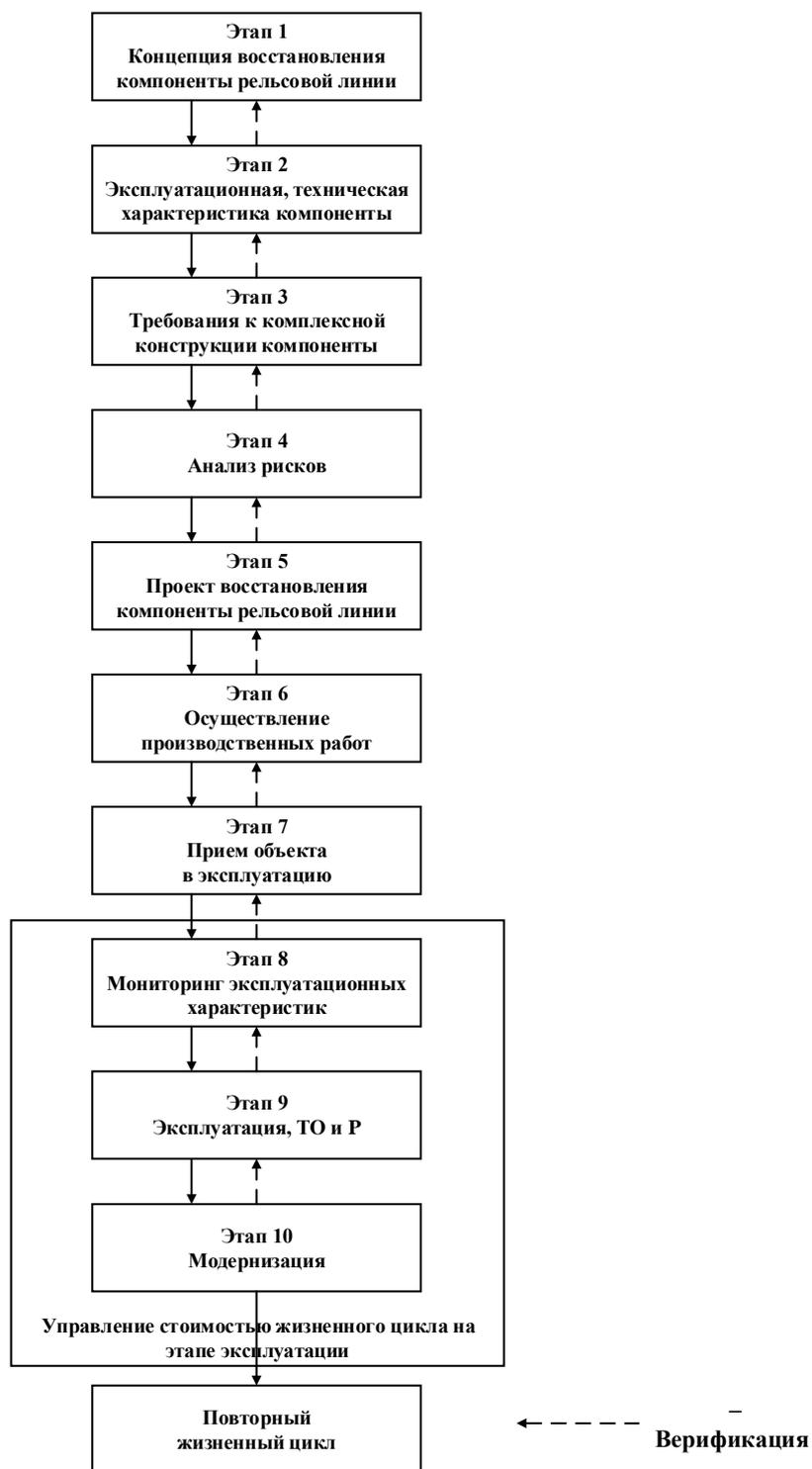


Рисунок – Модель жизненного цикла компонент рельсовой линии

На рисунке представлена модель жизненного цикла компонентов рельсовой линии, визуализирующая взаимосвязь 11 этапов управления – от проектирования до утилизации. Графическая схема подчеркивает ключевую роль этапов 8–10 (ввод в эксплуатацию, техническое обслуживание, поддержание работоспособности), где интеграция диагностических данных повышает точность прогнозирования износа на 22 % по сравнению с традиционными методами. Анализ структуры модели показал, что цикличность

процессов контроля (например, повторяющиеся этапы мониторинга и оптимизации) обеспечивает снижение временных затрат на обработку данных на 15 %. Рисунок также иллюстрирует внедрение обратной связи между этапами эксплуатации и проектирования, что позволило сократить количество конструктивных дефектов на 12 % в пилотных проектах.

Этот подход становится особенно актуальным в условиях роста интенсивности движения подвижных единиц и требует внедрения инновационных решений для поддержания стабильной работы железнодорожной инфраструктуры.

Предложенная методика формирования комплексной модели управления жизненным циклом компонентов рельсовой линии направлена на повышение надежности и безопасности железнодорожной инфраструктуры за счет интеграции анализа диагностических данных и многокритериальной оптимизации. Реализация модели обеспечивает непрерывный мониторинг состояния токопроводящих и изолирующих стыков, что позволяет прогнозировать износ и минимизировать риски аварийных ситуаций в режиме реального времени. Внедрение автоматизированного подхода способствует увеличению межремонтных интервалов, снижению эксплуатационных затрат и повышению эффективности технического обслуживания. Полученные результаты подтверждают целесообразность перехода от ручных методов контроля к цифровым решениям, обеспечивающим долгосрочную стабильность работы железнодорожных систем. Разработанная методика открывает перспективы для дальнейшего совершенствования диагностических алгоритмов в условиях роста интенсивности транспортных потоков.

Список литературы:

1. Цифровой помощник проводника вагона / Е. М. Тарасов, В. А. Надежкин, А. Л. Золкин, С. А. Сарычева. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 5. – С. 165-171.
2. Тарасов, Е. М. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей / Е. М. Тарасов, В. А. Надежкин. – Текст: непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 2. – С. 45-50. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-6.
3. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с. – Текст: непосредственный.
4. Шаманов, В. И. Управление процессом модернизации комплексов систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. – Текст: непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 237-250.
5. Li Y. et al. A review of condition-based maintenance: Its prognostic and operational aspects. *Frontiers of Engineering Management*. 2020. V. 7. No. 3. Pp. 323-334.
6. Сапожников, В. В. Доказательство безопасности систем ж.-д. автоматики / В. В. Сапожников, О. А. Наседкин. – Текст: непосредственный // Наука и транспорт. – 2006. – С. 1-13.

ИССЛЕДОВАНИЯ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ ГАЗОПРОВОДОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

специалист **Канакотина Екатерина Сергеевна**,
специалист **Казбакова Илюза Раисовна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Тимофеева Светлана Сергеевна**,
ООО КЭР-Автоматика,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена проблеме обледенения трубопроводов в зимний период. Основная задача исследования заключается в рассмотрении причин образования слоя льда на поверхности газопровода. Оценка негативного воздействия замерзшего конденсата позволит определить актуальность проблемы. Рассмотрены различные способы защиты трубопроводов.

Ключевые слова: котельная установка, обледенение газопроводов, коррозия газопроводов, разрушение металла, антикоррозионное покрытие, изоляционное покрытие.

RESEARCH ON COMBATING ICE IN GAS PIPELINES OF HEAT POWER ENTERPRISES IN WINTER

Specialists **Kanakotina Ekaterina Sergeevna**,
Specialists **Kazbakova Ilyuza Raisovna**,
Academic Advisor: PhD in Engineeringnology, Associate Professor
Timofeeva Svetlana Sergeevna,
LLC KER-Avtomatika,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the problem of icing of pipelines in winter. The main objective of the study is to consider the reasons for the formation of a layer of ice on the surface of the gas pipeline. Assessing the negative impact of frozen condensate will determine the urgency of the problem. Various ways to protect pipelines are considered.

Keywords: boiler plant, icing of gas pipelines, corrosion of gas pipelines, metal destruction, anti-corrosion coating, insulating coating.

Обеспечивая процесс преобразования энергии за счет сжигания топлива, паровые и водогрейные котлы являются одним из ключевых компонентов в системах энергетики и теплоснабжения. Водогрейные котлы предназначены для нагрева воды, используемой в системах горячего водоснабжения и отопления, тогда как паровые котлы используются для генерации пара под высоким давлением, применяемого в различных промышленных процессах [1,

с. 102]. Большинство современных котлов функционируют на основе сжигания газообразного топлива, что позволяет достичь высокую эффективность установки и простоты использования.

Горелки равномерно распределяют топливо в зоне горения топочной камеры котла, обеспечивая процесс сжигания газа. Результатом сгорания газа является тепло, которое передается на поверхности нагрева, контактирующие с рабочей средой (вода, пар). Далее нагретое рабочее тело направляется потребителю.

Изготовление устройств котла осуществляется из металлических материалов [2, с. 116]. Большое количество агрегатов и узлов котла изготавливаются с использованием различных видов сварки, поэтому материалы выбираются с учетом их механических свойств и способности выдерживать высокие температуры и давления. Однако в процессе эксплуатации компоненты котлов подвергаются воздействию различных факторов (механические нагрузки, коррозия и т. д.), что может привести к ухудшению характеристик материала, поэтому необходима своевременная проверка и обработка.

В зимний период частой проблемой на предприятии является обледенение газопроводов. Рабочий процесс в котельной связан с нагревом воды или образованием пара, что приводит к повышению влажности в рабочем пространстве. Повышенная влажность может быть вызвана утечками, конденсацией пара при работе котла (если температура ниже точки росы), недостаточной вентиляцией, внешними климатическими условиями, а также неправильной работой оборудования. Особенно заметно нарушение микроклимата в цехе в холодный период, на это может влиять недостаточная аэрация помещений [3, с. 87]. К тому же при наружной минусовой температуре газ тоже приобретает температуру ниже нуля. Двигаясь по трубопроводу, природный газ попадает в цех. В помещении тепло и влажно, а по трубам движется холодное рабочее тело, в результате физического процесса образуется конденсат, который замерзает [4, с. 18]. Таким образом, труба и прочее оборудование, по которым протекает холодный газ, покрываются «ледяной скорлупой» (рис. 1).

В настоящее время большая часть газопроводов в промышленности проложена из стальных труб. Возникает вопрос: как лучше защитить металл от коррозии, окисления и других агрессивных воздействий [5, с. 16].

Одной из важных задач при эксплуатации трубопроводов является сохранение их нормального состояния. Образование конденсата на поверхности трубопровода чревато появлением коррозии, что приводит к разрушению металлического оборудования.

Сама наледь не влияет на целостность составляющих котельной установки, но при ее таянии образуется большое количество воды. Помимо коррозии металлов, неконтролируемый поток растаявшего конденсата может попасть на электротехническое оборудование, при этом привести к выходу его из строя.

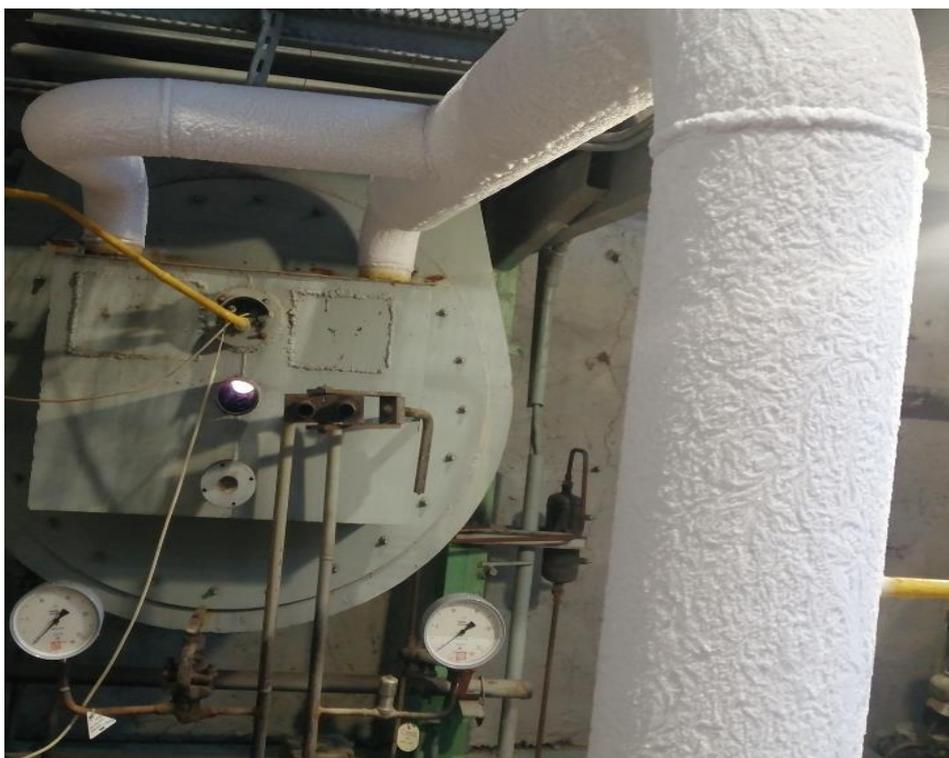


Рисунок 1 – Обледенение газопроводов

Это является актуальной проблемой, поэтому необходимо рассмотреть различные способы борьбы с образованием конденсата вследствие обледенения.

Один из методов борьбы с ледообразованием – конструктивный метод. Возвращаясь к началу, нужно обратить внимание на то, что причиной обледенения трубопроводов является холодный природный газ. К тому же в процессе редуцирования газа его температура становится еще ниже. Причиной дополнительного охлаждения является адиабатическое расширение газа. Эффективным методом для борьбы с этой проблемой является изменение диаметра трубопровода. Увеличение диаметра снизит скорость потока топлива, что уменьшит интенсивность адиабатического расширения.

К конструктивному методу также можно отнести выбор оптимальной марки стали. К примеру, нержавеющая сталь обладает высокими антикоррозионными свойствами, поэтому является дорогостоящим материалом. Легированные стали могут уступать в устойчивости к коррозии, однако имеют более низкую стоимость. Поэтому важно проводить тщательный технико-экономический анализ при выборе подходящих эксплуатационных характеристик материала.

Промежуточный подогрев газа способен избавить котельный зал от обледенения газопроводов, а также подача такого топлива значительно повысит эффективность его сжигания и позволит снизить выбросы вредных веществ. Нагрев следует проводить до оптимальной температуры природного газа (около 20 °С). Процесс реализации системы промподогрева требует тщательного

проектирования и контроля, а это в свою очередь может усложнить работу предприятия и привести к дополнительным затратам. Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации котельной установки необходимо учитывать не только преимущества, но и риски.

В качестве следующего метода борьбы с воздействием конденсата на трубопровод рассмотрим специальные защитные мероприятия. К ним относятся легирование металла, нанесение изоляционного покрытия и т. д.

Легирование может включать: гальванизацию (погружение в расплавленный цинк), никелирование (нанесение покрытия из никеля), термомеханическое покрытие (нанесение на поверхность стальных труб другого металла), анодирование (создание тонкого слоя пленки путем анодного окисления, толстый слой может растрескаться), хромирование и т. д.

В роли изоляционного покрытия можно использовать теплоизоляцию, важно учитывать, чтобы она была выполнена из негорючего материала. В качестве нового эффективного метода защиты труб начали применять керамическую жидкую теплоизоляцию.

Основой жидкой керамики является водно-акриловая смесь. Для улучшения эксплуатационных характеристик такой изоляции в акриловое связующее могут вводиться различные добавки [6, с. 75].

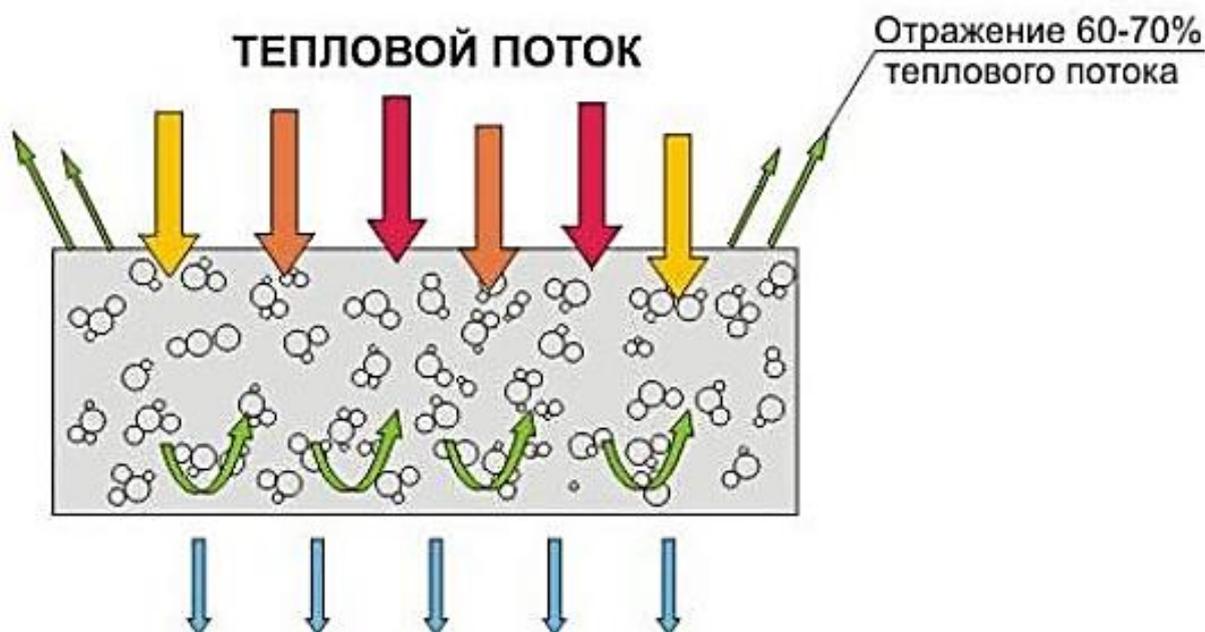


Рисунок 2 – Принцип действия жидкой керамической изоляции

Снижение теплопотерь происходит за счет керамических гранул, которые сильно заряжены воздухом (рис. 2). Благодаря своей низкой теплопроводности такое средство позволит бороться с образованием конденсата и обеспечит защиту от деградации металла (рис. 3) [7]. Однако нанесение керамической изоляции является дорогостоящим.



Рисунок 3 – Трубопроводы, покрытые жидкой керамикой

Также можно утеплить снаружи трубопровода греющим кабелем. Произойдет таяние льда, в этом случае может спасти кожух из оцинкованной стали. Устранение утечек, наладка оборудования и хорошая вентиляция позволит уменьшить влагу в рабочем помещении. Для удаления уже образовавшейся жидкости можно использовать дренаж.

Важно понимать, что полностью исключить образование конденсата невозможно, особенно в условиях повышенной влажности. Несмотря на это, можно существенно снизить его негативное воздействие. Дренажные системы эффективно борются с избыточной влагой при условии правильного обслуживания и поддержания их работоспособности. Такие системы оснащены устройством для сбора и отвода воды, уменьшая общую влажность.

Также для защиты от уже образовавшегося конденсата служат навесы и другие конструкции, создающие барьер между падающими сверху каплями и котельным оборудованием, трубопроводами. Они защищают не только от коррозии, а также от попадания влаги на электроприборы.

Для более эффективной защиты трубопроводов можно использовать комбинированные методы, к примеру, установить подогреватель газа, а на трубы нанести антикоррозионное, изоляционное покрытие. Это позволит защитить наружный слой от воздействия конденсата, а промподогрев предотвратит образование слоя льда.

Таким образом, обледенение газопроводов является актуальной проблемой на большинстве промышленных предприятий в зимний период. Борьба с этой проблемой можно различными методами. По итогам анализа установлено, что наиболее эффективным средством защиты труб от коррозии и обледенения является сочетание нескольких способов. Эти способы подбираются специально для каждого газопровода отдельно с учетом условий и особенностей эксплуатации.

Список литературы:

1. Тимофеева, С. С. Перспективы применения альтернативного топлива в паровом котле / С. С. Тимофеева, И. Р. Казбакова. – Текст: электронный // Школа практических инноваций – инженерному бизнесу региона. – 2024. – С. 102-105.
2. Vukić Lazića, Dušan Arsića, Ružica R. Nikolića,b, Dragan Rakića, Srbislav Aleksandrovića, Milan Djordjevića, Branislav Hadzima. Selection and analysis of material for boiler pipes in a steam plant // International Conference on Manufacturing Engineering and Materials. 2016. № 149. P. 216-223.
3. Бухмиров, В. В. Проблемы микроклимата в главном корпусе на Ивановской ТЭЦ-2 / В. В. Бухмиров, И. И. Светушков. – Текст: непосредственный // Энергетические системы. – 2024. – № 1. – С. 86-91.
4. Дмитрик, Е. Е. Направление решения проблем обледенения дымовых труб Курской ТЭЦ с использованием инновационного теплоизоляционного материала / Е. Е. Дмитрик. – Текст: непосредственный // Научные исследования XXI века. – 2022. – № 4. – С. 17-21.
5. Защита от коррозии стальных труб газопроводов / Д. М. Аристов, М. А. Давыдов, Г. Н. Мартыненко, И. В. Дьячкова. – Текст: непосредственный // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2022. – № 1. – С. 16-22.
6. Тульская, С. Г. Альтернативная тепловая изоляция резервуаров с помощью жидких керамических теплоизоляционных покрытий / С. Г. Тульская, С. А. Петров. – Текст: непосредственный // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2016. – № 2. – С. 71-77.
7. TLM ceramic: [сайт]. – 2025. – URL: <https://tlm-ceramic.ru/> (дата обращения 03.03.2025). – Текст: электронный.

© Канакотина Е. С., Казбакова И. Р., 2025

ПРУЖИННЫЕ ТЕРМОКОМПЕНСАТОРЫ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

канд. физ.-мат. наук, доцент **Богданов Николай Павлович**,
Ухтинский государственный технический университет,
г. Ухта, Российская Федерация

канд. физ.-мат. наук, доцент **Демина Маргарита Юрьевна**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения пружинных элементов из никелида титана в качестве термокомпенсаторов в воздушных линиях электропередач. Высокая коррозионная стойкость, способность к термоупругим деформациям в широком диапазоне температур позволяют применять материалы с памятью формы в сложных климатических условиях Арктики. Экспериментально определена зависимость удлинения пружинных элементов из никелида титана различной жесткости от растягивающей осевой нагрузки при термоциклировании. Показано, что пружины демонстрируют значительные обратимые осевые деформации, что позволяет использовать их для управления параметрами линий электропередач.

Ключевые слова: эффект памяти формы, термокомпенсатор, цилиндрическая пружина, воздушная линия, деформация.

SPRING THERMAL COMPENSATORS OF SHAPE MEMORY MATERIAL FOR OVERHEAD POWER LINES

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor
Bogdanov Nikolay Pavlovich,
Ukhta State Technical University,
Ukhta, Russian Federation

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor
Demina Margarita Yurievna,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The possibility of using the spring elements of NiTi as the temperature compensators in overhead power lines is examined. High corrosion resistance and ability to thermo-elastic deformations in a wide temperature range allow to use of shape memory materials in the harsh climatic conditions of the Arctic. The dependence of the elongation of the spring elements of NiTi different stiffness of

tensile axial load during thermal cycling is determined experimentally. It is shown that the spring show significant reversible axial deformation, which allows them to control the parameters of the power lines.

Keywords: shape memory effect, temperature compensator, helical spring, airline, deformation.

Интенсивное освоение Арктического региона, наблюдаемое в последние десятилетия, предусматривает развития электроснабжения, в том числе с помощью воздушных линий (ВЛ) электропередач. Крайне неблагоприятные климатические условия Арктики требуют применения инновационных технологий при проектировании, сооружении и эксплуатации ВЛ. Перепады температуры и влажности, сильная ветровая нагрузка приводят к изменению длины линий, их обледенению и последующему изменению пропускной способности или обрыву. Известны способы температурной компенсации стрел провеса проводов термокомпенсаторами (ТК) на основе сплава с эффектом памяти формы (СПФ) [1]. Термокомпенсаторы, выполненные в виде гибких нитей из никелида титана, прикрепляются параллельно проводу ВЛ в пролете. При уменьшении температуры окружающей среды ТК из никелида титана в интервале температур прямого мартенситного превращения за счет эффекта пластичности превращения растягивается [2], компенсируя возрастающее механическое натяжение линии. Когда температура воздуха возрастает, термокомпенсатор при достижении температуры, равной температуре окончания обратного мартенситного превращения материала с ЭПФ, срабатывает (сокращается) и подтягивает провод. Выполненный по такой схеме ТК может реагировать только на температуру окружающей среды, т. к. вследствие высокого удельного сопротивления материала никелида титана (в 20–30 раз выше, чем у алюминия) ток ВЛ в ТК практически не ответвляется. В других типах термокомпенсаторов для обеспечения срабатывания ТК от тока нагрузки ВЛ и регулирования величины тока срабатывания ТК, линия электропередачи снабжена ферромагнитными экранами, охватывающими провод ВЛ между точками закрепления ТК. Параметры ферромагнитного экрана в виде полого цилиндра с продольным немагнитным зазором выбираются такими, чтобы обеспечить нагрев (срабатывание) ТК при заданном токе ВЛ, нагревающим провод до вполне определенной температуры. Наиболее эффективными являются такие термокомпенсирующие устройства, срабатывание которых происходит по заданной температуре провода ВЛ вне зависимости от сочетаний, воздействующих на ТК факторов тока ВЛ, температуры окружающей среды, скорости ветра. Подобными свойствами может обладать термокомпенсатор в форме пружины, выполненной из материала с памятью формы. Подобный термокомпенсатор имеет больше параметров по сравнению с компенсатором в форме нити, в нем можно варьировать не только химический состав и длину, а также электрическое сопротивление и механическую жесткость, т. е. управлять его свойствами.

При механических расчетах гибких нитей, каковой является ВЛ, в первом приближении можно считать, что кривая провисания является параболой [3].

Стрела провисания f зависит от горизонтального натяжения нити P :

$$f = \frac{ql^2}{8P},$$

где q – собственный вес провода;

l – начальная длина провода, равная пролету ВЛ.

Удлинение провода, вызванное изменением температуры, равно:

$$\Delta l_1 = \alpha(T_2 - T_1)l,$$

где α – коэффициент линейного температурного расширения материала провода.

Удлинение, вызванное увеличением натяжения, определяется согласно закону Гука:

$$\Delta l_2 = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)l}{E},$$

где E – модуль продольной упругости материала;

σ_1 и σ_2 – нормальные механические напряжения материала провода при температурах T_1 и T_2 , и тогда абсолютная деформация провода равна:

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2.$$

В [3] показано, что многожильный медный провод на пролете 100 м изменяет длину при изменении температуры от +15 °С до –5 °С на $\Delta l = 0,18$ м, создавая стрелу провисания f около 2,5 м. Такая деформация, связанная с изменением длины провода, может быть скомпенсирована за счет осевого перемещения пружины из никелида титана:

$$\Delta l = \delta(T).$$

По описанной в [4] технологии из никелида титана были изготовлены три пружины, отличающиеся средним диаметром витка D_0 и числом рабочих витков n (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры пружин

№ пружины	Диаметр проволоки d , м	Средний диаметр витка D_0 , м	Число рабочих витков n	Индекс пружины C	Геометрический параметр жесткости g , м
1	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	22	13,5	$0,46 \cdot 10^{-8}$
2	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	23	10	$1,09 \cdot 10^{-8}$
3	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	36	8,25	$1,24 \cdot 10^{-8}$

Согласно приведенной в [5] методике испытаний, после стадии нагружения в аустените пружины охлаждали под приложенной осевой силой натяжения, затем не снимая нагрузку, пропускали ток, нагревая до $T_{max} = 363$ К. На этапе охлаждения пружина растягивалась и раскручивалась, а на этапе нагрева сжималась и закручивалась. Кривые зависимости перемещения свободного конца пружины от температуры имеют гистерезисный вид и определяются осевой силой и геометрией пружины. С увеличением нагрузки

растет накапливаемая при охлаждении деформация, причем для пружины с малой жесткостью удлинение становится значительным даже при небольших нагрузках, например, при осевой силе 4,5 Н составляет около 85 см, что приводит к существенному изменению диаметра витка. Этот экспериментальный факт учитывался в дальнейших расчетах при оценке возникающих в материале напряжений и деформаций. Для пружин № 2 и № 3 с большими жесткостями перемещение свободного конца при той же осевой силе 4,5 Н удлинение составило 31 см и около 41 см.

Для пружины № 1, обладающей наименьшей жесткостью, отношение максимального удлинения, накопленного на этапе пластичности превращения, к начальной длине недеформированной пружины при нагрузке 4,5 Н составляет более 1900 %, для пружин № 2 и № 3 соответственно – 670 % и 572 %. В таблице 2 приведены значения наибольшего относительного удлинения пружин на этапе охлаждения под осевой силой натяжения. Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что изменение длины пружинного элемента из никелида титана при термоциклировании в нагруженном состоянии через интервал аустенитно-мартенситного превращения оказывается значительным даже при небольших растягивающих усилиях.

Таблица 2 – Максимальное относительное удлинение пружин δ / l_0 , % при охлаждении под нагрузкой

P , Н	Пружина № 1	Пружина № 2	Пружина № 3
1	341	72	60
1,5	341	100	74
2,0	875	217	160
2,5	1118	278	234
3,0	1411	395	306
3,5	1625	469	400
4,0	1809	573	517
4,5	1959	670	572

Максимальное удлинение δ_{\max} пружины на этапе охлаждения под нагрузкой определяется осевой силой и жесткостью пружины (рис. 1). Зависимости $P = f(\delta_{\max})$ линейны, что подтверждается статистической обработкой экспериментальных результатов: коэффициент линейной корреляции для всех пружин имеет значение $\geq 0,98$. При осевой силе натяжения менее 2 Н эффект пластичности превращения для пружин № 2 и № 3 имел практически одинаковое значение (~ 10 см), а для пружины № 1 с наименьшей жесткостью оказался в четыре раза больше (~ 40 см). При внешнем растягивающем усилии более 2 Н абсолютное удлинение пружин становится существенно различным, однако наклон линии в координатах $P = f(\delta_{\max})$ не соответствует жесткости пружин. Например, при нагрузке $P = 4$ Н для пружины № 3 с большей жесткостью абсолютное удлинение составляет ~ 37 см, а для пружины № 2 с меньшей жесткостью ~ 26 см. Для сравнения такого

технологического параметра как удлинение δ для пружин с различными диаметрами и числом витков необходимо привести δ либо к одному витку, либо к единице длины пружины. Если зависимости $P = f(\delta_{\max})$ представить в относительных единицах $P = f(\delta_{\max}/l_0)$, где l_0 – начальная длина пружины до деформирования, то в диапазоне нагрузок до 2 Н относительное удлинение оказывается также практически одинаковым для пружин № 2 и № 3 (рис. 2), а при больших нагрузках увеличивается сильнее для пружин с меньшей жесткостью.

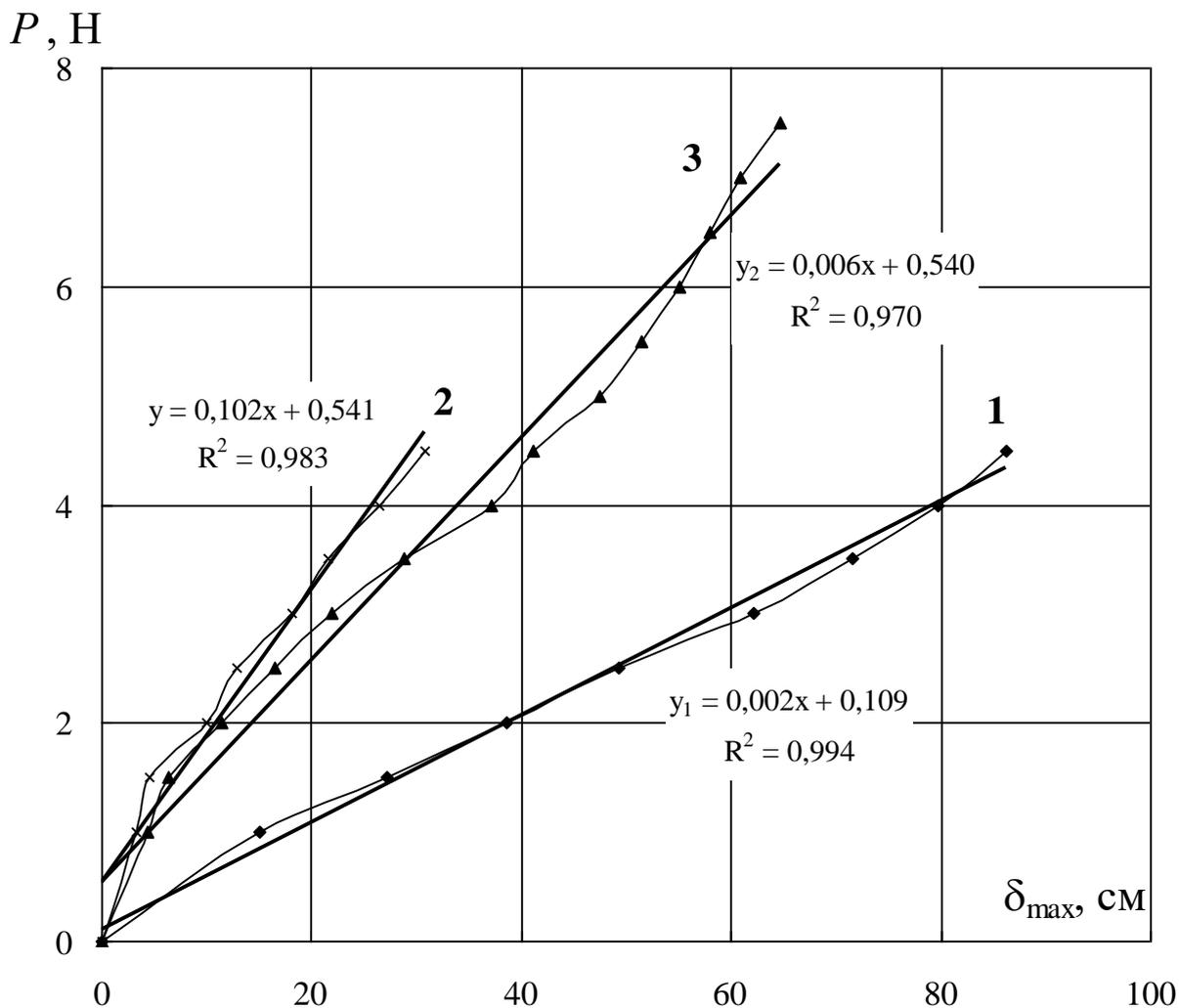


Рисунок 1 – Зависимость осевой силы натяжения от максимального перемещения свободного конца пружины на этапе пластичности превращения при разной жесткости (номера пружин указаны цифрами у кривых)

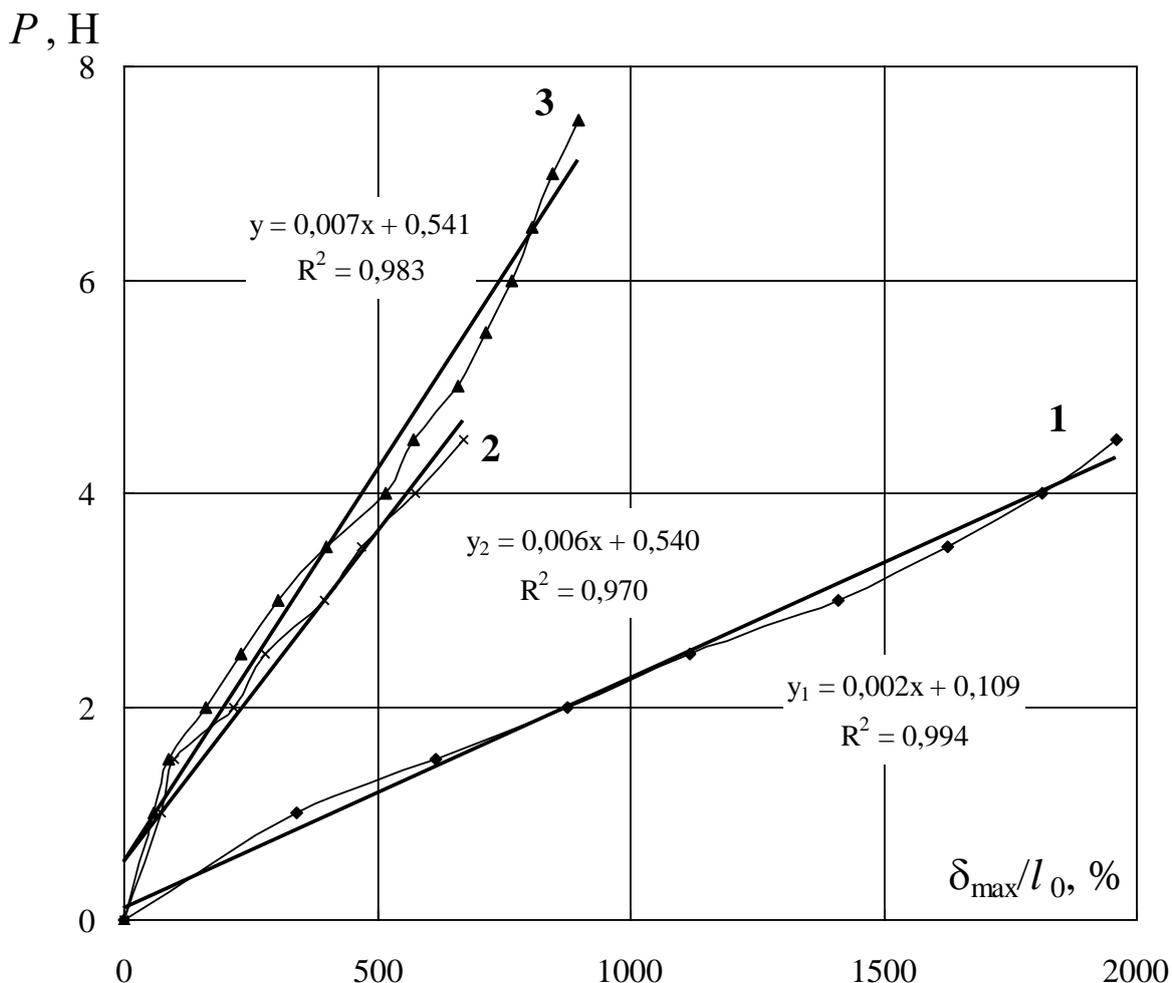


Рисунок 2 – Зависимость осевой силы натяжения от максимального относительного удлинения пружины на этапе пластичности превращения при разной жесткости (номера пружин указаны цифрами у кривых)

Расчеты, полученные на основании проведенных экспериментов, показывают, что в пружинных элементах из никелида титана при термоциклировании под осевой силой натяжения, можно небольшими усилиями формировать значительные перемещения при малых механических напряжениях и деформациях, возникающих в материале.

Таким образом, при помощи установки пружинных термокомпенсаторов на проводах можно добиться повышения надежности пересечения воздушных линий с инженерными сооружениями, пропускной способности и экономичности линий электропередачи в зависимости от режима работы. Следовательно, линия электропередачи становится управляемым элементом электрической системы.

Список литературы:

1. Патент № 2072601 Российская Федерация, Н02G7/00. Воздушная линия электропередачи : № 5005070/07 : опубл. 27.01.1997 / Вакуленко С. Е., Романенко М. Т., Куник А. М., Тарасенко Т. Н. – Текст : непосредственный.

2. Лихачев, В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачев, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева. – Ленинград : Издательство ЛГУ, 1987. – 216 с. – Текст : непосредственный.
3. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – Москва : Издательство тех.-теор. литер., 1958. – 856 с. – Текст : непосредственный.
4. Андронов, И. Н. Расчетно-экспериментальный анализ термоциклического деформирования витых пружин из никелида титана / И. Н. Андронов, М. Ю. Демина, Л. С. Полугрудова. – Текст : непосредственный // Деформация и разрушение материалов. – № 5. – 2015. – С. 20-27.
5. Демина, М. Ю. Влияние конструкционных параметров пружины растяжения из никелида титана на деформации и напряжения, реализуемые при термоциклировании через интервалы мартенситных переходов / И. Н. Андронов, М. Ю. Демина, Л. С. Полугрудова. – Текст : непосредственный // Деформация и разрушение материалов. – № 6. – 2015. – С. 20-24.

© Богданов Н. П., Демина М. Ю., 2025

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

канд. техн. наук, доцент **Злобин Владимир Германович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются физические основы применения термоэлектричества в промышленной энергетике. Указаны области применения, преимущества и недостатки термоэлектрических генераторов. Рассмотрена физическая природа эффектов термоэлектричества, в частности, эффект Зеебека. Рассмотрена схема и принцип действия термоэлектрического элемента.

Ключевые слова: термоэлектричество, контактные явления, термо-э.д.с., эффект Зеебека, термоэлектрический генератор, термодинамические явления.

THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF THE APPLICATION OF THERMOELECTRIC GENERATORS IN INDUSTRY

PhD in Engineering, Associate Professor
Zlobin Vladimir Germanovich
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper examines the physical foundations of the application of thermoelectricity in industrial energy. The fields of application, advantages and disadvantages of thermoelectric generators are indicated. The physical nature of the effects of thermoelectricity, in particular, the *Seebeck* effect, is considered. The scheme and principle of operation of a thermoelectric element are considered.

Keywords: thermoelectricity, contact phenomena, thermoelectric effect, Seebeck effect, thermoelectric generator, thermodynamic phenomena.

Важность физического явления, называемого *термоэлектричеством*, необоснованно занижена в силу ускоренного развития альтернативных способов получения электрической энергии. Однако в последние годы термоэлектрические генераторы все чаще применяются в качестве основных или дублирующих источников электроэнергии. Отсутствие движущихся частей обеспечивает уникально высокий уровень надежности (до 25 лет эксплуатации) при минимальном обслуживании. Несмотря на очевидные преимущества, термоэлектричество обеспечивает преобразование тепловой энергии в

электрическую с КПД не выше 8 %. Это не представляет собой ограничение, если основным назначением тепловой энергии является обогрев (суммарный КПД в этом случае равен 100 %), или используется тепловая энергия, отводимая от различных механических и электрических устройств (например, двигателей). В этом случае КПД генератора добавляется к КПД устройства.

Физическая природа термоэлектрического эффекта состоит в том, что средняя энергия свободных электронов различна в разных проводниках и по-разному растет с увеличением температуры. В проводниках, имеющих продольный перепад температур, возникает направленный поток электронов от горячего спая к холодному. При этом у холодного спая образуется избыток отрицательных зарядов, у горячего – избыток положительных. Поток электронов будет более интенсивным в тех проводниках, у которых концентрация электронов больше. Если использовать проводники с разной концентрацией электронов и поддерживать разную температуру спаев, на концах термоэлемента появится термо-э.д.с.

Важнейшим преимуществом термоэлектрических генераторов является то, что они вырабатывают постоянный ток с напряжением от единиц вольт и мощностью от милливатт до сотен ватт, который требуется подавляющему большинству современных электронных устройств. Такому диапазону идеально соответствуют автономные источники питания на основе термоэлектрического эффекта. Сегодня термоэлектрическая генерация занимает нишу уникальных приложений, для которых применение стандартных источников электрической энергии затруднительно или невозможно.

В настоящее время актуальной задачей развития автономных источников питания является разработка простых и дешевых способов получения экологически чистой возобновляемой энергии. Современному обществу необходимы малогабаритные генераторы малой мощности, обладающие повышенным коэффициентом полезного действия (КПД) и не оказывающие негативного воздействия на человека и окружающую среду (рис. 1).



Рисунок 1 – Области, в которых возможно применение термоэлектрических устройств для повышения энергоэффективности

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ), работающие по принципу преобразования тепла в электрическую энергию, полностью отвечают этим требованиям. ТЭГ обладают свойствами, позволяющими использовать их во многих областях техники. Наиболее актуальным применением таких генераторов является питание маломощных систем связи и систем мониторинга состояния объектов, генерирующих большое количество тепловой энергии. Учитывая установку в труднодоступных для обслуживания и ремонта местах, основные предпочтения отдаются автономным источникам электроэнергии, которые не требуют обслуживания и имеют достаточно большой срок службы.

Термоэлектрические генераторы являются автономными источниками питания и благодаря этому могут применяться в качестве аварийных, основных и дополнительных элементов питания систем мониторинга и средств связи с потребляемой мощностью до 100 МВт. Анализ коммерческих и экспериментальных ТЭГ показывает сложность в их изготовлении и высокую себестоимость. Исследования в этой области активно проводятся как в России, так и за рубежом. Широко известными работами в данной области являются труды зарубежных и российских авторов, таких как: *Иоффе А. Ф., Шелехов И. Ю, Новиков С. В., Федоров М. И., Гуревич Л. Э., Телке М., Анатычук Л. И., Champier D., Nguyen H. T., Nguyen V. T., Kim M. J., Snyder G. J., Рикке К., Друде П.*

Принцип действия тепловых преобразователей основан на применении тепловых процессов таких, как: нагрев, охлаждение, теплообмен, в которых входной величиной является температура. Температура взаимосвязана с внутренней энергией тел, а отсюда с физическими свойствами тел.

Тепловые преобразователи применяются в виде преобразователей: температуры, тепловых потоков, скорости потока, расхода, химических составов, давлений газа, влажности и так далее.

Термоэлектричество – собирательное название раздела физики и техники, в котором исследуются термоэлектрические эффекты, разрабатываются термоэлектрические устройства для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, а также для термоэлектрического охлаждения.

Ранние наблюдения данных явлений, а также их феноменологическое описание датируется первой половиной 19-го века (*Зеебек, Пельтье*), однако полная их классификация и микроскопическая теория были построены лишь к середине 20-го века. И до настоящего времени проводятся фундаментальные исследования по созданию новых теорий и подходов к описанию термоэлектрических эффектов, предсказываются и обнаруживаются новые явления этого класса.

Экспериментальные и теоретические исследования в физике термоэлектричества и физике полупроводников стали основой для создания современных термоэлектрических преобразователей, широко применяемых для охлаждения устройств бытовой и промышленной электроники. Особый интерес в условиях надвигающихся энергетических и экологических кризисов

представляют термоэлектрические генераторы энергии, которые характеризуются прямым (безмашинным) принципом действия, а также имеют значительную величину КПД. *Термоэлектрогенератор (ТЭГ)* – это оборудование, предназначенное для получения электрической энергии из тепловой. В основе работы термоэлектрогенераторов лежат три термодинамически обратимых термоэлектрических эффекта – *Зеебека, Пельтье* и *Томсона*.

Большинство классических термоэлектрических эффектов были впервые обнаружены и исследованы в твердотельных, в первую очередь, кристаллических полупроводниковых системах. В то же время созданные для их описания теории применимы для конденсированных сред в целом, в том числе для плазмы, для водных растворов электролитов. Использование последних в качестве объекта исследования позволило предсказать и обнаружить новый класс термоэлектрических эффектов. При этом требования к экспериментальной установке для их изучения являются не столь жесткими, как для твердотельной электроники (дорогостоящая криогеника, низкие давления, импульсные поля и т. д.).

Контактные явления. В 1797 г. итальянский ученый *Алессандро Вольт* открыл явление возникновения разности потенциалов между двумя различными соприкасающимися металлами. Величина и знак контактной разности при фиксированной температуре зависит от взаимного расположения металлов в ряду: *Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd*.

В этой последовательности с увеличением номера уменьшается потенциал. Контактная разность потенциалов возникает из-за различия величины энергии *Ферми* металлов. Указанное отличие приводит к различию концентрации носителей зарядов (электронов проводимости). В случае приведения металлов в соприкосновение начнется процесс диффузии. Уход электронов из металла с большей концентрацией носителей n_1 приведет к возникновению в нем положительного заряда, другой металл, имевший концентрацию n_2 , зарядится отрицательно.

Уровень *Ферми* в первом металле понизится, во втором – повысится. Возникающая на границе в состоянии равновесия разность потенциалов уравнивает процесс диффузии. Химические потенциалы сравниваются:

$$\mu_1 + e \cdot \varphi_{i1} = \mu_2 + e \cdot \varphi_{i2} , \quad (1.1)$$

следовательно, контактная разность определяется формулой (1.2):

$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{e}. \quad (1.2)$$

Полученная в приближении свободных электронов оценка контактной разности потенциалов по порядку величины совпадает с экспериментальными значениями.

Несмотря на простой принцип работы термоэлектрических генераторов, существуют множество способов их построения, такие как: применение различных материалов в качестве полупроводниковых элементов [1], оптимизация геометрических и физических параметров [2, 3, 4] под всевозможные условия эксплуатации [5], интеграция с фотоэлектрическими

преобразователями.

Эффект Зеебека. Все термоэлектрические генераторы работают по принципу преобразования тепла в электрическую энергию. Данный эффект зовется эффектом *Зеебека*, в честь *Томаса Иоганна Зеебека*, который в 1821 году обнаружил, что при нагревании спая из разнородных материалов в замкнутой электрической цепи течет ток.

Зеебек предположил, что земной магнетизм объясняется разницей температур между экватором и полюсами. Вот почему принцип действия термоэлектрического генератора был объяснен магнитной поляризацией. *Зеебек* исследовал большое количество образцов, некоторые из которых были полупроводниками, и выстроил материалы в ряд по их способности отклонять магнитную стрелку. Эти данные используются (в уточненном виде) и по сей день для конструирования термоэлектрических генераторов.

Эффект *Зеебека* заключается в следующем: если спаи разомкнутой цепи из двух разнородных проводников поддерживаются при различных температурах T_1 и T_2 , то на концах цепи, возникает термоэлектродвижущая сила $E_{ТЭДС}$ (рисунок 2) [6]:

$$E_{ТЭДС} = \alpha_{AB} \cdot \Delta T, \quad (1.3)$$

где $\Delta T = T_1 - T_2$;

α_{AB} – коэффициент *Зеебека* одной ветви.

Термо-э.д.с. $E_{ТЭДС}$, возникающая в термопаре, зависит не только от разности температур горячего и холодного спаев термопары, но обычно и от абсолютного значения этих температур. Термоэлектродвижущая сила $E_{ТЭДС}$ пропорциональна разности температур горячего и холодного спаев (формула 1.3). В этой формуле α_{AB} – коэффициент *Зеебека* или *относительный коэффициент ТЭДС*, зависящий от свойств материалов термоэлектродов и температуры: T_1 – температура горячей части спая; T_2 – температура холодной части спая. Величину α_{AB} принято измерять по отношению к одному и тому же металлу – свинцу, т. е. для термопары, в которой одна из ветвей свинцовая, а другая изготовлена из исследуемого материала.

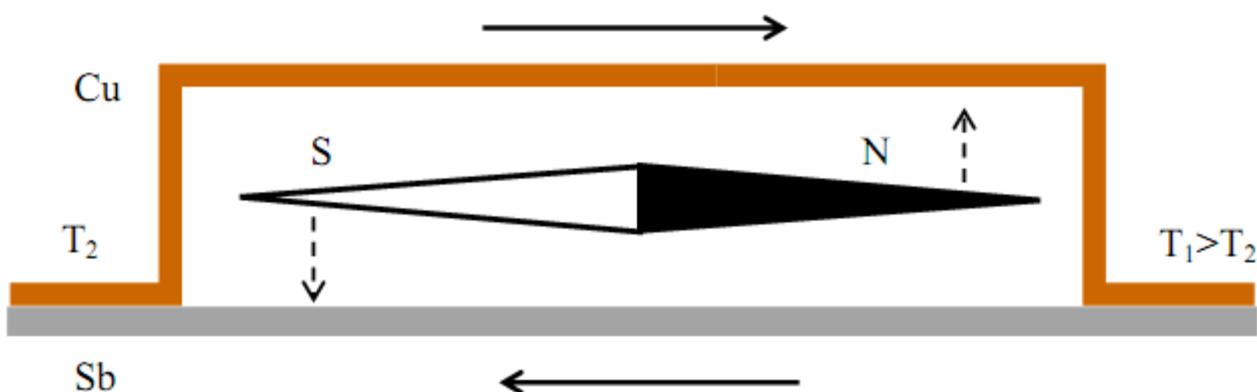


Рисунок 2 – Схема эффекта *Зеебека*

Для произвольной пары металлов коэффициент термоэлектрической силы находим как разность коэффициентов каждого из металлов α_2 по отношению к

свинцу α_1 :

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2. \quad (1.4)$$

Коэффициент *Зеебека* измеряется в мкВ/К и составляет единицы мкВ/К. Сильное влияние температуры на концентрацию носителей в полупроводниках приводит к значениям α_{AB} в 1000 мкВ/К и выше.

Зеебеком было обнаружено, что при нагревании спая различных материалов в замкнутой цепи происходит протекание тока с КПД, примерно 2÷3 %. Но полученные результаты первого термогенератора составляли конкуренцию паровым машинам того времени. *Зеебек* проводил эксперименты, используя пластинки сурьмы и висмуты, измерения производил с использованием гальванометра. Принцип действия термогенератора основывался на магнитной поляризации. Исследование большого количества образцов, в которые также входили полупроводники, привело к созданию списка построения материалов по способности отклонять магнитную стрелку. При нагреве материалов плотно соединенных между собой магнитная стрелка отклонялась дальше. На данный момент для создания термогенераторов используется тот же список, но с более уточненными данными и материалами.

Металл, к которому идет ток от спая с более высокой температурой, принято называть положительным. Например, в паре сурьма-медь в этом качестве выступает сурьма, медь будем называть отрицательным металлом в данной термопаре. Проводя исследования для различных пар металлов, *Зеебек* получил термоэлектрический ряд.

Данные, полученные на основании многочисленных измерений $E_{ТЭДС}$, различных термопар, удобно представить в виде таблицы, в которой приводятся значения $E_{ТЭДС}$, развиваемой различными материалами в комбинации с каким-нибудь одним и тем же материалом (см. табл. 1). Коэффициенты термо-э.д.с. для некоторых металлов приведены в таблице 2.

Для большинства термопар в широком диапазоне температур функция $f(T)$ линейна и ЭДС термопары выражается формулой (1.3). Для некоторых термопар зависимость $f(T)$ более сложная – квадратичная, и термо-э.д.с. принимает вид:

$$E_{ТЭДС} = [\alpha(T)_1 - T_2] \cdot \left[1 + \frac{\beta}{\alpha} (T)_1 + T_2 \right]. \quad (1.5)$$

При этом ЭДС при определенных соотношениях температур спаев может становиться равной нулю и менять знак.

Таблица 1 – Термо-э.д.с. различных термопар

$t_2, ^\circ\text{C}$	$E_{ТЭДС}$ при $t_x = 0 ^\circ\text{C}$, мВ					
	Платина-хромель	Платина-алюмель	Платина-медь	Платина-железо	Платина-константан	Платина-манганин
0	0	0	0	0	0	0
100	+2,81	-1,29	+0,76	+1,89	-3,51	+0,61
200	+5,96	-2,17	+1,83	+3,54	-7,45	+1,55
300	+9,32	-2,89	+3,15	+4,85	-11,71	+2,77
400	+12,75	-3,64	+4,68	+5,88	-16,19	+4,25
500	+16,21	-4,43	+6,41	+6,79	-20,79	+5,95

$t_2, ^\circ\text{C}$	$E_{ТЭДС}$ при $t_x = 0 ^\circ\text{C}$, мВ					
	Платина-хромель	Платина-алюмель	Платина-медь	Платина-железо	Платина-константан	Платина-манганин
600	+19,62	-5,28	+8,34	+7,80	-25,47	+7,84
700	+22,96	-6,18	+10,49	+9,12	-30,18	-
800	+26,23	-7,08	+12,84	+10,86	-34,86	-
900	+29,41	-7,95	+15,41	+12,84	-39,45	-
1000	+32,52	-8,79	+18,20	+14,30	-43,92	-

Кривые термоэлектрической способности некоторых материалов пересекаются между собой. Если они пересекаются при температуре, лежащей между температурами горячего и холодного спаев термопары, составленной из данных материалов, то термо-э.д.с., развиваемая термопарой, будет равна разности площадей, заключенных между этими кривыми до точки их пересечения и после нее.

Таблица 2 – Коэффициенты термо-э.д.с. для некоторых металлов

Металл	α , мкВ/К
Платина	-4,4
Олово	-0,2
Свинец	0,0
Серебро	+2,7
Медь	+3,2
Сурьма	+4,3

Например, э.д.с термопары золото-железо при температурах 275 и 50 °С равна разности площадей APQ и MNQ , так что при увеличении температуры горячего спая выше 160 °С термо-э.д.с. этой пары будет уменьшаться. Такое явление наблюдается у целого ряда термопар.

На рисунке 3 (1) представлены кривые изменения термо-э.д.с. трех термопар в зависимости от изменения температуры их горячего спая при температуре холодного спая, равной 0 °С [7]. Из графика видно, что у термопары медь-железо э.д.с. при температуре 540 °С меняет знак. Это явление называется *инверсией*.

Кроме эффекта *Зеебека* к термоэлектрическим явлениям относятся два других обратимых эффекта: *Пельтье* и *Томпсона*. Эти эффекты связаны с взаимным превращением тепловой энергии в энергию электрического тока, с переносом тепла и электричества.

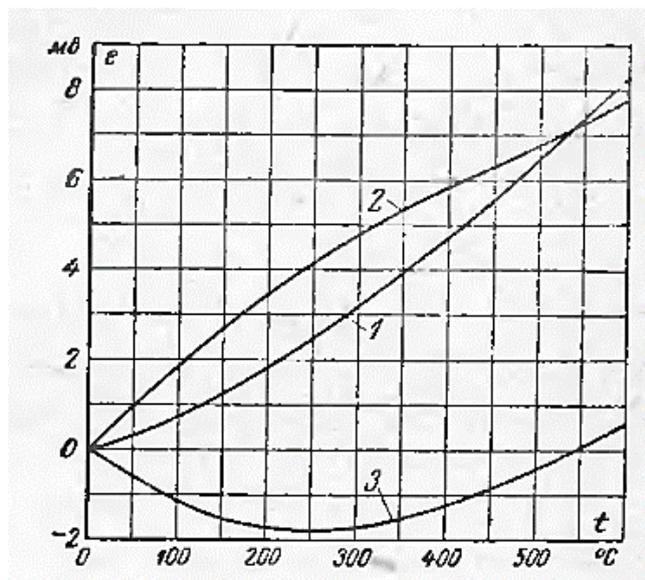


Рисунок 3 – Кривые изменения термо-э.д.с. в зависимости от температуры горячего спая при температуре холодного спая 0°C для различных термопар: 1 – платина-медь; 2 – платина-железо; 3 – медь-железо

Известно, что потоки тепла и электрический ток представляют собой необратимые процессы, в то время как эффекты *Зеебека*, *Пельтье* и *Томпсона*, принадлежат к интересному и трудному для изучения классу физически обратимых явлений, в числе которых встречаются и необратимые процессы. Теория таких явлений не может быть строго изложена с помощью обычной термодинамической теории стационарных состояний. Это возможно только с помощью термодинамической теории необратимых процессов, что позволяет рассматривать одновременно изменение энтропии, вызванные необратимыми и обратимыми потоками энергии.

Но все-таки первый теоретический анализ был выполнен на основах классической термодинамики в предположении, что термоэлектрические явления не связаны органически с процессом теплопроводности и с выделением тепла при прохождении тока.

В данной статье рассматриваются термоэлектрические явления и определяются коэффициенты уравнений для изотропной среды с позиций классической термодинамики и статических закономерностей в термоэлектричестве.

Термодинамическими явлениями принято называть эффекты возникновения в проводящих средах электродвижущих сил и электрических токов под воздействием тепловых потоков и эффекта возникновения теплот, дополнительных к *джоулевой* теплоте, при протекании электрического тока.

Если места контактов материалов с различным типом проводимости (*n*- и *p*-типа) поддерживаются при разных температурах и к термоэлектрическому генератору (ТЭГ) подключена внешняя нагрузка, то по такой цепи протекает ток, а на нагрузке Γ будет выделяться полезная мощность. Единичным элементом ТЭГ является пара термоэлементов (ТЭ) (рисунок 4) [8]. ТЭГ состоит из соединенных электрически последовательно и термически

параллельно пар термоэлементов, расположенных между двумя керамическими пластинами. Термоэлементы соединяются металлическими контактными площадками (рисунок 5).

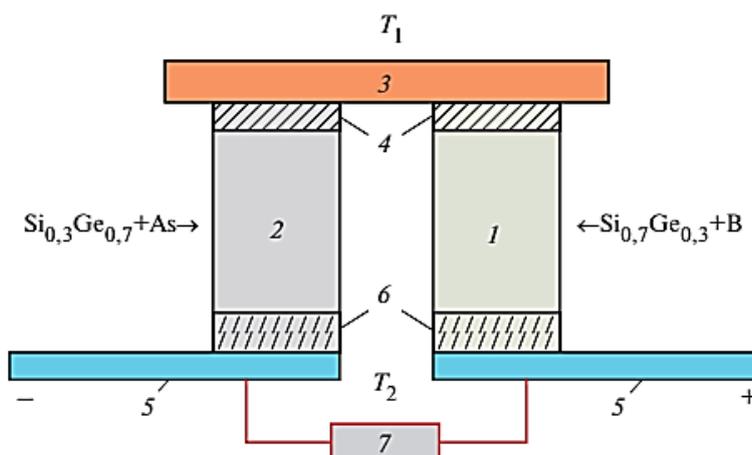


Рисунок 4 – Схема термоэлектрического элемента

Термоэлектрический элемент состоит из: 1 – p-ветвь термоэлемента; 2 – n-ветвь термоэлемента; 3 – соединительная шина горячего спая; 4 – коммутационный припой; 5 – контактные шины; 6 – коммутационный припой холодного спая; 7 – внешняя нагрузка; T_1 – источник тепла; T_2 – охладитель.

Для получения необходимых значений силы тока и напряжения полупроводниковые термоэлементы составляют из необходимого количества, соединенных параллельно или последовательно, такая конструкция называется *батареей*.

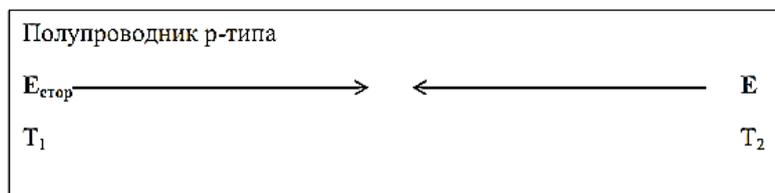


Рисунок 5 – Термоэлектрический генераторный модуль в разрезе

Возникновение термоэлектрического тока объясним на примере полупроводников, носителями заряда в которых могут быть двух типов (вариант с электронным механизмом переноса заряда в металлических

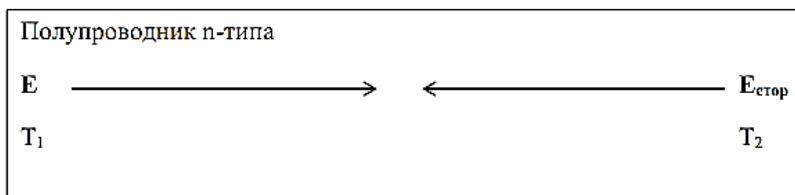
проводниках представляется частным, более простым случаем).

Нагреем один конец однородного стержня, изготовленного из электронного полупроводника (рис. 6а). Концентрация электронов здесь увеличится, электроны начнут диффундировать в сторону холодного конца.



$$T_1 > T_2$$

а)



$$T_1 > T_2$$

б)

Рисунок 6 – Возникновение термодиффузии в полупроводниках различного типа

Горячий конец зарядится положительно по отношению к холодному. Возникшее электрическое поле E будет препятствовать процессу диффузии, т. о. установится стационарное состояние. Сложившийся градиент концентраций внутри полупроводника можно приписать действию сторонних сил со стороны поля $E_{стор}$, уравнивающего поле E : $E_{стор} = E$.

На рисунке 6б показан дырочный проводник, в котором диффузия основных носителей приводит к противоположной конфигурации полей.

Если принимать в рассмотрение одновременно носители двух типов, то диффузионные процессы будут давать взаимно противоположный вклад и даже полностью компенсировать друг друга, что имеет место в свинце. Для повышения значения термо-э.д.с. отдельные термоэлементы соединяют в батареи. Все четные спаи имеют одну температуру, нечетные – другую, т. о. ЭДС складываются. Базовая конструкция термоэлектрического генератора представлена на рисунке 7.

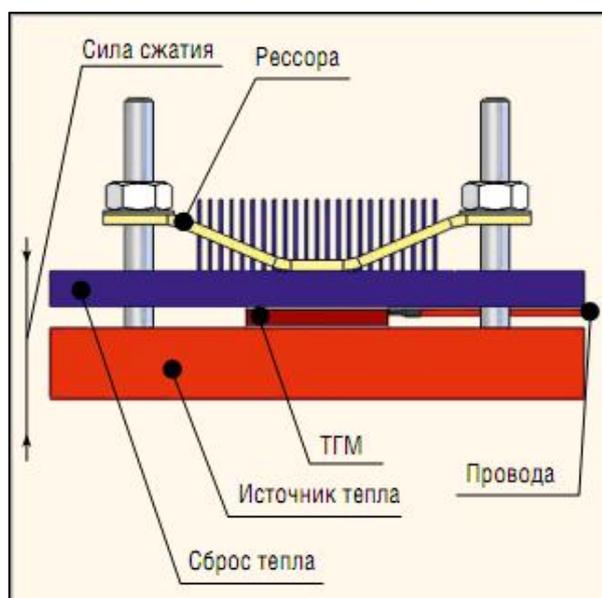


Рисунок 7 – Базовая конструкция термоэлектрического генератора

Количество термоэлементов в изготавливаемых промышленным образом полупроводниковых термоэлектрических преобразователях превышает 100 штук, при этом достигается КПД в 15 % и более.

Для измерений с помощью термопар применяют две методики:

- стабилизации температуры холодного спая;
- и т. н. «технику компенсации холодного спая».

Первая предполагает термостатирование одного из двух спаев (рис. 8,а), например, посредством погружения в тающий лед ($T_0 = 273 K$).

Вторая методика проще с точки зрения технической реализации, так как требует лишь фиксации температуры T_0 измерителем (рис. 8б). Однако затем необходимо вычесть термо-э.д.с. холодного спая из измеренного сигнала.

Величины $E_{TЭДС}$ и α_{AB} считаются положительными, если электрический ток протекает у горячего спая от A к B .

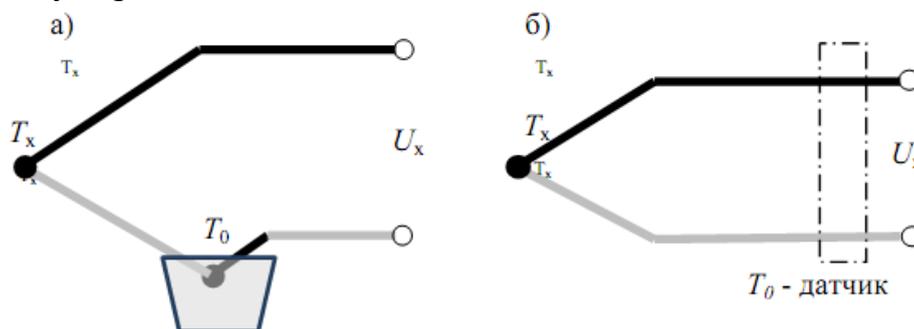


Рисунок 8 – Методы подключения измерительных термопар

Опытные данные показывают, что для любой пары однородных проводников, подчиняющихся закону Ома, термо-э.д.с. зависит только от природы проводников и температуры спаев и не зависит от распределения температуры между этими спаями. Так:

$$E_{T_0 T} = E_{T_0 T_1} + E_{T_1 T}. \quad (1.6)$$

Таким образом, эффект Зеебека, обусловленный перераспределением носителей зарядов вследствие наличия температурного градиента, проявляется в том, что в электрической цепи, составленной из двух разнородных проводников (термоэлектродов 1 и 2), и если точки их спаев поддерживаются при разных температурах, тогда и возникает термо-э.д.с.

Список литературы:

1. Rowe, D. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano [Book]. Boca Raton : CRC Press,, 2006. Vol. F 1.
2. Zhang, A. B., Wang, B. L., Pang, D. D. Influence of leg geometry configuration and contact resistance on the performance of annular thermoelectric generators [Journal]. Energy Conversion and Management. 2018. Pp. 337-342.
3. Ahmet, Z. Sahin, Bekir, S. Yilbas The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry [Journal]. Energy Conversion and Management. 2013. Pp. 26-32.
4. Luo, Y., Kim, C. H. Effects of the cross-sectional area ratios and contact resistance on the performance of a cascaded thermoelectric generator [Journal]/ J. International Journal of Energy Research. 2019. Pp. 572-596.
5. Heikes, R. R., Ure, R.W. Thermoelectricity [Article]. Science and Engineering Interscience. New York : [s.n.]. 1961.
6. Зайцев, А. А. Основы физики термоэлектричества УМП / А. А. Зайцев, Д. В. Кузнецов, А. В. Сидоров. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2018. – 41 с. – Текст: непосредственный.
7. Бернштейн, А. С. Термоэлектрические генераторы / А. С, Бернштейн. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 47 с. – Текст: непосредственный.
8. Galitskaya, A. O., Buslaev, R. D. Simulation of flexible thermoelectric generators with different geometry [Journal]. Journal of Physics: Conference Series. 2019.

© Злобин В. Г., 2025

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОРЭМ

директор филиала МЭИ Султанов Махсуд Мансурович,
студент Яковлева Елизавета Юрьевна,
студент Строков Иван Николаевич,
НИУ «МЭИ» в г. Волжском
студент Жильцов Егор Вячеславович,
НИУ «МЭИ»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Улучшение работы теплоэлектростанций (ТЭС) – важная техническая и экономическая задача, направленная на эффективное использование природных ресурсов и повышение экономической эффективности работы станции на рынке электроэнергии и тепла.

Ключевые слова: ТЭС, оптимизация работы ТЭС, расход топлива, ОРЭМ, прибыль ТЭС, горизонт оптимизации.

ANALYSIS OF METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE WECM

Director of MPEI branch **Sultanov Mahsud Mansurovich**,
Student **Yakovleva Elizabeth Yurievna**,
Student **Strokov Ivan Nikolaevich**,
Branch of the Moscow Power Engineering Institute in Volzhsky
Student **Zhiltsov Egor Vyacheslavovich**,
Moscow Power Engineering Institute,
Moscow, Russian Federation

Abstract. Improving the operation of thermal power plants (TPP) is an important technical and economic task aimed at the efficient use of natural resources and increasing the economic efficiency of the plant in the electricity and heat market. The purpose of the work is to formulate and solve a new task of optimizing the operation of TPP plants at WECM with maximizing profits on the optimization horizon.

Keywords: TPP, optimization of TPP operation, fuel consumption, WECM, TPP profit, optimization horizon.

Работа выполнена в рамках проекта «Модели повышения эффективности и оптимизации загрузки энергооборудования ТЭС на балансирующем рынке на основе технико-экономических показателей» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Улучшение работы теплоэлектростанции (ТЭС) – это важная технико-

экономическая задача, которая направлена на более эффективное использование природных ресурсов, используемых в качестве топлива для ТЭЦ, а также на повышение экономической эффективности работы станции на рынке электроэнергии и тепла.

Критерии эффективности работы ТЭЦ зависят от условий ее эксплуатации.

При анализе научной документации были выделены следующие тезисы:

1. В качестве критерия эффективности работы ТЭЦ, входящей в состав завода по производству этилена, определены затраты химического производства. Оптимизация работы ТЭЦ направлена на минимизацию этих затрат.

2. Основной целью является максимизация технической эффективности работы ТЭЦ. В качестве критерия эффективности используется линия Вильяна.

3. В качестве критерия эффективности работы ТЭЦ рассматривать прибыль, которую необходимо максимизировать.

В России до 2006 года в рамках плановой электроэнергетики критерии эффективности работы ТЭЦ были определены на государственном уровне. В качестве таких критериев использовались расход топлива и затраты на топливо.

В настоящее время задача оптимизации работы ТЭЦ в России должна учитывать условия и правила функционирования Оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), который начал свою работу в сентябре 2006 года.

Несмотря на изменившиеся условия эксплуатации ТЭЦ, в некоторых современных российских работах в качестве критерия эффективности их функционирования по-прежнему используются затраты на топливо [1].

В связи с вышеперечисленными факторами можно выявить две задачи: минимизировать расход топлива и максимизировать выработку электроэнергии. Рыночные цены на электроэнергию в постановке задачи оптимизации не учитываются.

Современные задачи оптимизации работы ТЭЦ имеют высокую вычислительную сложность, которая обусловлена несколькими факторами:

1. Сложный вид целевой функции.
2. Большое количество управляемых параметров, которое зависит от используемых математических моделей агрегатов ТЭЦ.
3. Большое количество ограничений, накладываемых на значения управляемых параметров.

Выбор математических моделей ТЭЦ зависит от поставленной задачи [2-4].

В работе «Modeling and Optimization of the Steam Turbine Network of an Ethylene Plant» предложена гибридная модель, в которой параметры пара, необходимые для производства, рассчитываются на основе нейросетевой модели, а электрическая мощность турбин – с помощью термодинамических уравнений.

В работах «Multi-period steam turbine network optimisation» в качестве математической модели турбины используется уравнение (линия) Вильяна.

В работе «Model for the Optimal Synthesis and Operation of Utility Plants»

функционирование ТЭЦ описывается с помощью термодинамических уравнений, учитывающих энтальпию и энтропию тепловой энергии.

В работе «Методы оптимизации режимов в энергосистемах» разработаны линейные и нелинейные модели агрегатов ТЭЦ.

В работе «Оптимизация работы ТЭЦ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности России» используются нелинейные математические модели, учитывающие 19 параметров работы турбины и 14 параметров работы парового котла.

В работах зарубежных авторов для оптимизации работы теплоэлектростанций (ТЭЦ) используются методы нелинейного программирования с целочисленными ограничениями. Также применяется генетический алгоритм.

В России для оптимизации работы ТЭЦ чаще всего используются методы эквивалентирования и динамического программирования.

В качестве нового критерия оптимальности работы ТЭЦ на ОРЭМ предлагается максимизация прибыли за определенный период времени, который называется горизонтом оптимизации.

Вариантом решения поставленной задачи могут являться новые линеаризованные характеристики расхода пара и газа для паровых и газовых турбин. Эти характеристики позволят сократить количество управляемых параметров и, как следствие, снизить сложность задачи оптимизации. Также они позволят свести задачу оптимизации к задаче целочисленного линейного программирования.

Задачи, связанные с оптимизацией работы ТЭЦ:

1. Минимизация затрат на топливо. Эта задача была актуальна в условиях плановой электроэнергетики.

2. Максимизация прибыли ТЭЦ. Эта задача стала актуальной с переходом на ОРЭМ.

Для задачи максимизации прибыли ТЭЦ были выделены четыре типа срочности:

1. Долгосрочная оптимизация.
2. Среднесрочная оптимизация.
3. Краткосрочная оптимизация.
4. Оперативная оптимизация.

В рамках плановой системы электроснабжения эффективность работы теплоэлектростанций (ТЭЦ) измерялась через удельное потребление условного топлива на производство электроэнергии и тепла.

Для оптимизации работы ТЭЦ необходимо было снизить расход условного топлива или минимизировать затраты на топливо при сохранении заданных параметров электрической, паровой и тепловой нагрузки станции.

Расход $\rightarrow \min$ или Затраты $\rightarrow \min$

Для решения задачи оптимизации был предложен метод, основанный на понятиях характеристик относительных приростов расхода условного топлива и характеристик относительных приростов стоимости топлива – так называемый метод эквивалентирования. Характеристики относительных приростов рассчитываются для каждого агрегата теплоэлектростанции.

Оптимальным является режим, при котором величины относительных приростов условного топлива различных агрегатов равны между собой.

Преимуществом метода является его простота, благодаря чему он широко применяется до сих пор.

В работе «Оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ по энергетической эффективности» были рассмотрены актуальные проблемы, связанные с оптимизацией работы ТЭЦ.

1. Недостаточная эффективность диспетчеризации. В некоторых случаях служба управления режимами работы оборудования при выполнении заданного графика нагрузки исходит только из условия обеспечения надежности работы, что может противоречить требованиям эффективности работы ТЭЦ.

2. Несоответствие энергетических характеристик оборудования ТЭЦ фактическим режимам работы. Несмотря на то, что нормативная база пересматривается раз в пять лет, проблема остается актуальной.

3. Недостаточный контроль параметров режима работы оборудования. Отсутствие автоматизированных систем управления технологическими процессами работы оборудования на большинстве ТЭЦ не позволяет вести детализированный контроль за изменениями технических параметров режима работы.

На данный момент эти проблемы не решены. Один из способов улучшить соответствие энергетических характеристик фактическим режимам работы оборудования – регулярно корректировать энергетические характеристики на основе измерений параметров режима работы оборудования [5, 6].

Важно отметить, что оценки сокращения расхода топлива при решении задачи колеблются от 0,8 до 1,7 % от общего расхода топлива. Эти показатели, с одной стороны, сопоставимы с погрешностью измерения расхода топлива, а с другой – подтверждают, что сокращение расхода топлива возможно только при высоком соответствии фактического режима работы оборудования ТЭЦ плану загрузки агрегатов, полученному по итогам оптимизации.

В результате решения задачи формируется детализированный план загрузки оборудования ТЭЦ, который является вспомогательной информацией для службы эксплуатации и управления режимами.

С началом функционирования ОРЭМ в сентябре 2006 года эффективность работы ТЭЦ оценивается по прибыли.

Современная задача оптимизации работы ТЭЦ заключается в максимизации прибыли:

$$\text{Прибыль} = (\text{Выручка} - \text{Затраты}) \rightarrow \max$$

Постоянный контроль прибыли ТЭЦ является неотъемлемой частью ее эксплуатации. В зависимости от временного периода (горизонта оптимизации), для которого требуется максимизировать прибыль, можно выделить четыре типа задач.

1. Долгосрочная оптимизация работы ТЭЦ с горизонтом от одного года до нескольких лет необходима при планировании сроков ввода в эксплуатацию новых мощностей и консервации изношенных.

2. Среднесрочная оптимизация работы ТЭЦ с горизонтом от месяца до года необходима для формирования бизнес-плана и годового планирования периодов ремонтных работ оборудования, а также подготовки заявок на конкурентный отбор мощности.

3. Краткосрочная оптимизация работы ТЭЦ с горизонтом от суток до месяца необходима для формирования заявок на выбор состава включенного генерирующего оборудования, заявок на рынок на сутки вперед, а также оперативных ценопринимающих заявок на балансирующий рынок. В этой задаче следует учитывать выручку от продажи тепла, пара и электроэнергии, а также затраты на покупку топлива и электроэнергии на собственные нужды.

4. Оперативная оптимизация работы ТЭЦ для одного или нескольких часов необходима для сокращения затрат на топливо при выполнении известного графика тепловой и электрической нагрузок. В этом случае задача максимизации прибыли сводится к задаче минимизации затрат на топливо.

При решении задач долгосрочной и среднесрочной оптимизации работы ТЭЦ следует учитывать выручку от продажи тепла, пара, электроэнергии и мощности, а также переменные затраты (затраты на топливо) и постоянные затраты (возврат инвестиций, фонд заработной платы, стоимость ремонтов, страхование и т. д.).

Задача краткосрочной оптимизации была решена, а задачи долгосрочной и среднесрочной оптимизации работы ТЭЦ в рыночных условиях в России не решены и являются актуальными.

Задача оптимизации работы ТЭЦ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) требует учета ряда допущений.

Для решения задачи оптимизации работы ТЭЦ в условиях ОРЭМ мы используем следующие предположения.

Критерием оптимальности работы ТЭЦ в условиях ОРЭМ является функция суммарной прибыли, которую необходимо максимизировать на горизонте оптимизации T .

Управляемыми параметрами задачи оптимизации работы ТЭЦ являются параметры режима работы оборудования: нагрузка основного и вспомогательного оборудования ТЭЦ, общая тепловая и электрическая нагрузки станции, расход каждого вида топлива, объемы собственных нужд ТЭЦ.

Ограничения, накладываемые на значения управляемых параметров, включают в себя ограничения, обусловленные применяемыми математическими моделями агрегатов станции, ограничения, обусловленные диапазоном регулирования агрегатов, а также другие ограничения.

Кроме того, необходимо соблюдать топливные, тепловые и электрические балансы.

Задача оптимизации работы ТЭЦ в условиях ОРЭМ заключается в определении значений управляемых параметров, которые обеспечивают максимум суммарной прибыли на горизонте оптимизации T .

Информация о прибыли и соответствующих ей нагрузках агрегатов станции является исходной для планирования работы ТЭЦ на ОРЭМ.

В ходе исследования были достигнуты следующие результаты:

1. Разработан новый подход к оценке эффективности работы ТЭЦ в условиях перехода России от плановой экономики к рыночной.
2. Сформулирована новая задача оптимизации работы ТЭЦ с учетом функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.
3. В качестве критерия эффективности работы ТЭЦ в рыночных условиях определена прибыль, которую необходимо максимизировать на горизонте оптимизации.
4. Выделены четыре уровня приоритетности новой задачи оптимизации работы ТЭЦ.

Список литературы:

1. Li, Z., Zhao, L., Du, W., Qian, F. Modeling and Optimization of the Steam Turbine Network of an Ethylene Plant // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2013. Vol. 21. No. 5. P. 520-528. DOI: 10.1016/S1004-9541(13)60530-3
2. Tveit, T.-M., Fogelholm, C.-J. Multi-period steam turbine network optimisation. Part I: Simulation based regression models and an evolutionary algorithm for finding D-optimal designs // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26. No. 10. P. 993-1000. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.025
3. Tveit, T.-M., Fogelholm, C.-J. Multi-period steam turbine network optimisation. Part II: Development of a multi-period MINLP model of a utility system // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26. No. 14-15. Pp. 1730-1736. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.11.004
4. Султанов, М. М. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ по энергетической эффективности: специальность 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Султанов Махсуд Мансурович; Московский энергетический институт (Технический университет). – М., 2010. – 173 с. – Текст : непосредственный.
5. Султанов, М. М. Разработка методики оценки и прогнозирования уровня надежности энергетического оборудования ТЭС на базе показателей технического состояния / М. М. Султанов, А. А. Константинов. – Текст: непосредственный // Вестник КГЭУ. – 2021. – Т. 13, № 1 (49). – С. 141-151.
6. Серебряков, Н. А. Применение ансамбля глубоких нейронных сетей в задачах краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии / Н. А. Серебряков. – Текст: непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 2(51). – С. 52-60.

© Султанов М. М., Яковлева Е. Ю., Строков И. Н., Жильцов Е. В., 2025

АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИИ

студент **Гиматдинов Ильнас Расимович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматривается применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов промышленного оборудования на основе данных телеметрии. Анализируются основные методы предиктивного обслуживания, включая глубокое обучение, обучение без учителя, ансамблевые методы и обучение с учителем. Отмечаются существующие проблемы, такие как качество данных, редкость отказов и интерпретируемость моделей, а также перспективные направления развития, включая создание гибридных моделей и расширение применения методов глубокого обучения.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, машинное обучение, промышленное оборудование, прогнозирование отказов, телеметрия, глубокое обучение.

MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR EQUIPMENT FAILURE PREDICTION BASED ON TELEMETRY DATA

Student **Gimatdinov Inas Rasimovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. This article explores the application of machine learning algorithms for predicting failures in industrial equipment based on telemetry data. The main methods of predictive maintenance, including deep learning, unsupervised learning, ensemble methods, and supervised learning, are analyzed. Existing challenges, such as data quality, rarity of failures, and model interpretability, are noted, along with promising directions for development, including the creation of hybrid models and the expanded use of deep learning methods.

Keywords: predictive maintenance, machine learning, industrial equipment, failure prediction, telemetry, deep learning.

В современной индустрии предсказание и предотвращение сбоев оборудования становится ключевым элементом для увеличения производительности, уменьшения незапланированных остановок и оптимизации затрат на обслуживание. С развитием технологий сбора информации и ИИ значительно расширились возможности создания точных прогностических моделей. Применение алгоритмов машинного обучения

вместе с телеметрическими данными позволяет переходить от реактивного к проактивному обслуживанию оборудования, основанному на прогнозировании возможных неисправностей.

Предиктивное обслуживание стало базовым компонентом современного производства, играя важную роль в инновационном подходе к раннему выявлению неисправностей и существенному снижению производственных простоев. Этот упреждающий метод использует современную прогнозную аналитику и модели отказов, давая техническим специалистам возможность обнаруживать потенциальные проблемы до их обострения. Внедрение результативной программы технического обслуживания критически важно для производственной эффективности, так как напрямую содействует росту продуктивности, улучшению качества, повышению безопасности и надежности. В отличие от традиционных методов, основанных на регулярных проверках и ремонтах, предиктивное обслуживание анализирует фактические данные о состоянии оборудования и предсказывает вероятные сбои до их возникновения. Такой подход позволяет проводить техническое обслуживание только при реальной необходимости, что значительно уменьшает общие эксплуатационные расходы примерно на 15–30 % за счет уменьшения простоев оборудования, минимизации работ по техобслуживанию и оптимизации запасов запчастей [1].

Основой предиктивного обслуживания являются телеметрические данные, собираемые различными датчиками, установленными на оборудовании. Предиктивное техобслуживание использует датчики и устройства, беспроводным способом подключенные к системе. Эти датчики отслеживают такие параметры, как температура, вибрации и уровни масла, предоставляя информацию о работе оборудования в реальном времени [2].

Мониторинг параметров, связанных с потенциальными режимами отказа оборудования, решает две ключевые задачи: информирование пользователей о существующем отказе и рекомендации по техобслуживанию и/или проверкам, основанным на анализе тенденций изменения параметров, способствующих отказу, а не на запланированных остановках. На основе анализа данных определены основные параметры, мониторинг которых может предупредить об имеющихся отказах: влажность и наличие воды, частичные разряды, тенденция запыления и обнаружение дыма, температурные тренды, вибрация вращающихся механизмов.

После сбора телеметрические данные подвергаются предварительной обработке, включающей фильтрацию шумов, нормализацию, выявление аномалий и извлечение признаков. Качество предварительной обработки данных имеет решающее значение для точности прогнозных моделей [3].

Для решения задачи прогнозирования отказов промышленного оборудования предложено множество моделей и методов, отличающихся набором входных данных и формой представления результатов. На основе анализа научной литературы выделяются четыре основные группы методов машинного обучения, применяемых для прогнозирования отказов оборудования. Методы глубокого обучения, включающие LSTM (Long Short-Term Memory), MLP (Multilayer Perceptron), сверточные нейронные сети (CNN)

и другие архитектуры, показывают высокую эффективность при работе с временными рядами телеметрических данных. Нейронные сети демонстрируют особую ценность в случаях, когда отсутствует явная модель процесса деградации оборудования или когда необходимо анализировать сложные взаимосвязи между множеством параметров. Преимущество глубоких нейронных сетей заключается в их способности автоматически извлекать сложные признаки из необработанных данных и выявлять неочевидные зависимости. Например, для расчета остаточного ресурса оборудования нейронная сеть может анализировать многомерные временные ряды, представляющие историю работы оборудования от начальной приработки до текущего момента или отказа [4].

Методы обучения без учителя, такие как метод главных компонент (РСА), широко применяются для диагностики работы оборудования и идентификации отказов при отсутствии или малом количестве примеров отказов. Эти методы особенно ценны для выявления аномалий в работе оборудования и могут служить первым шагом в системе предиктивного обслуживания. Основное преимущество обучения без учителя заключается в отсутствии необходимости иметь размеченные данные об отказах, что особенно актуально для нового оборудования или в ситуациях, когда отказы происходят редко. Методы обучения без учителя эффективно выявляют отклонения от нормального режима работы, даже если конкретный тип отказа ранее не наблюдался... Ансамблевые методы, включающие XGBoost, Random Forest и различные модификации деревьев решений, также широко применяются для прогнозирования отказов оборудования. Они особенно эффективны при наличии разнородных данных и способны учитывать сложные взаимосвязи между различными параметрами оборудования. Одним из примеров успешного применения ансамблевых методов является разработка новой модели прогнозирования временных рядов крутящих моментов приводных электродвигателей, использующая стекинг алгоритмов машинного обучения Random Forest и ARIMA при изменяющихся режимах работы оборудования. Такой подход позволил повысить точность прогнозирования отказов на 9,5 % и снизить количество внеплановых простоев до 15 %.

Методы обучения с учителем, такие как SVM (Support Vector Machine), KNN (k-Nearest Neighbors), байесовские сети и другие, применяются при наличии исторических данных о работе оборудования и зафиксированных отказах. Эти методы строят модели, устанавливающие связь между наблюдаемыми параметрами оборудования и вероятностью отказа. Для эффективного использования методов обучения с учителем критически важно иметь качественные данные, включающие как нормальные режимы работы, так и примеры различных типов отказов. Точность и полнота прогнозов моделей, основанных на методах обучения с учителем, может варьироваться, но в среднем составляет около 61 %.

Процесс построения моделей прогнозирования отказов оборудования на основе данных телеметрии включает несколько ключевых этапов. Для создания модели прогнозирования технического обслуживания необходимы входные

исторические данные по оборудованию, включая факты дефектовки оборудования, режимы работы, мощность, вибрации, температуру и другие параметры. Объем и качество данных имеют решающее значение для построения эффективной прогнозной модели. Чем больше данных, желательно собранных за несколько лет, тем лучше будет работать прогнозная модель. Данные, собранные с датчиков, отправляются в центр обработки, где алгоритмы машинного обучения анализируют их в контексте работы и износа оборудования. Этот анализ помогает выявлять паттерны, аномалии и отклонения от нормальных рабочих условий.

Важным этапом является анализ параметров и выбор наиболее информативных признаков для прогнозирования отказов. Проводится регрессионный анализ параметров для определения взаимосвязей между ними и осуществляется кластеризация оборудования по корреляции между режимами работы и данными с датчиков. Для определения возможных отказов оборудования может использоваться метод машинного обучения без учителя, сводящийся к выявлению аномалий в данных. Система также прогнозирует вероятность поломки оборудования через определенное время и предоставляет рекомендации по мерам ее предотвращения. На основе обработанных данных разрабатываются предиктивные модели, которые используют собранную информацию для прогнозирования отказов оборудования и предложения мероприятий по техническому обслуживанию. Эти модели сравнивают фактическое поведение оборудования с ожидаемым, позволяя техническим специалистам принимать меры до возникновения поломок.

Алгоритмы машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования находят применение в различных отраслях промышленности. В нефтегазовой отрасли методы машинного обучения активно применяются для прогнозирования отказов установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [5]. Анализ исследований показывает, что наиболее часто применяются методы глубокого обучения, обучения без учителя, ансамблевые методы и методы обучения с учителем. Результаты исследований демонстрируют, что комбинация методов может обеспечить лучшие результаты прогнозирования.

В металлургии разработаны алгоритмы прогнозирования отказов оборудования уборочной группы прокатного производства, включающие алгоритмы сбора, хранения, извлечения и обработки данных о работе оборудования; алгоритмы распределенного обучения модели прогнозирования; алгоритмы выявления отказов в условиях малого количества поломок. Внедрение таких алгоритмов позволило повысить точность прогнозирования отказов и снизить количество внеплановых простоев [6].

В энергетической отрасли нейронные сети используются для предиктивной диагностики отказов энергогенерирующего оборудования, такого как газовые турбины, генераторы и трансформаторы. Нейронная сеть прогнозирует вероятность отказа конкретного узла оборудования на основе анализа телеметрических данных, что позволяет значительно повысить надежность и эффективность энергетических систем [7].

В сетях интернет-провайдеров искусственный интеллект применяется для прогнозирования отказов сетевого оборудования. Использование алгоритмов машинного обучения и анализа больших данных позволяет предотвращать простои и обеспечивать стабильную работу сетевых инфраструктур, что особенно важно в условиях постоянного роста объемов интернет-трафика... Несмотря на значительный прогресс в области прогнозирования отказов оборудования с помощью алгоритмов машинного обучения, существует ряд проблем и ограничений, которые необходимо учитывать при внедрении таких систем. Одной из основных проблем является качество и полнота собираемых данных. Для построения эффективных прогнозных моделей необходимы качественные данные о различных режимах работы оборудования и зафиксированных отказах. На качество данных могут влиять качество датчиков и некорректное их расположение, а также прерванный поток собираемой информации с оборудования. Существенным ограничением использования методов машинного обучения являются ситуации, когда отказы оборудования происходят достаточно редко или отсутствуют статистические данные по отказам. В таких случаях может потребоваться разработка специальных методов для работы с несбалансированными данными или использование моделей, способных обучаться на малом количестве примеров. Еще одной проблемой является интерпретируемость моделей машинного обучения. Некоторые модели, особенно основанные на глубоком обучении, могут быть сложными для интерпретации, что затрудняет понимание того, как именно модель принимает решения. Это может ограничивать доверие к таким моделям со стороны технических специалистов.

Анализ тенденций в области прогнозирования отказов оборудования указывает на несколько перспективных направлений развития. Перспективным направлением является создание гибридных предиктивных моделей на основе нескольких методов машинного обучения. Например, разработка модели прогнозирования временных рядов, использующая стекнинг алгоритмов машинного обучения Random Forest и ARIMA, позволила повысить точность прогнозирования при изменяющихся режимах работы оборудования [8].

Несмотря на значительный прогресс в этой области, существуют проблемы и ограничения, которые необходимо преодолеть для дальнейшего повышения эффективности систем прогнозирования отказов. Перспективными направлениями являются создание гибридных моделей, повышение дискретности данных и расширение применения методов глубокого обучения. В будущем можно ожидать дальнейшего развития алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования и их более широкого внедрения в различных отраслях промышленности.

Список литературы:

1. Тихонов, А. И. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики промышленного оборудования / А. И. Тихонов, Е. В. Васильева. – Москва : Издательство «Инновационное машиностроение», 2024. – 312 с. – Текст : непосредственный.

2. Воронов, В. И. Предиктивное обслуживание промышленного оборудования на основе алгоритмов машинного обучения / В. И. Воронов, А. Г. Михайлов. – Москва : Издательство «Техносфера», 2023. – 256 с. – Текст : непосредственный.
3. Белов, П. Р. Методы обработки телеметрических данных для задач прогнозирования технического состояния промышленного оборудования / П. Р. Белов, М. А. Сидорова. – Текст : электронный // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2024. – № 1. – С. 15-23. – URL: <https://www.vkit.ru/index.php/vkit/article/view/1254> (дата обращения: 10.03.2025).
4. Козлов, В. В. Предиктивная аналитика в системах управления техническим обслуживанием и ремонтом / В. В. Козлов, А. Ю. Федорова. – Санкт-Петербург: Издательство «Политехника», 2023. – 276 с. – Текст : непосредственный.
5. Смирнов, А. В. Методы машинного обучения в задачах прогнозирования отказов оборудования нефтегазовой отрасли / А. В. Смирнов, И. К. Петров, С. Н. Иванова. – Москва : Издательство «Нефть и газ», 2022. – 198 с. – Текст : непосредственный.
6. Андреев, С. М. Анализ эффективности алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования металлургического производства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андреев Сергей Михайлович; Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2022. – 185 с. – Текст : непосредственный.
7. Кузнецов, Д. А. Применение нейронных сетей для прогнозирования отказов энергогенерирующего оборудования / Д. А. Кузнецов, Е. В. Соколова. – Текст : электронный // Энергетика и автоматизация в промышленности : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15 мая 2024 года. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2024. – С. 78-85. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49876521> (дата обращения: 10.03.2025).
8. Морозов, Н. П. Гибридные модели прогнозирования технического состояния промышленного оборудования / Н. П. Морозов. – Текст : электронный // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 5. – С. 45-52. – URL: <https://www.avtprom.ru/article/2023/5/8> (дата обращения: 10.01.2025).

© Гиматдинов И. Р., 2025

БИОТОПЛИВО: ЭКОЛОГИЧНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

студент **Деменкова Анастасия Сергеевна**,
ст. преподаватель **Волкова Екатерина Александровна**,
Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт
им. А. К. Кортунова ФГБОУ ВО Донской ГАУ,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация. В современном мире проблема глобального потепления и увеличения углеродного следа становится все более актуальной, поскольку это негативно влияет на окружающую среду и человечество. В связи с этим активно обсуждаются различные альтернативы традиционному топливу. Статья посвящена изучению биотоплива как перспективного источника энергии, а также анализу возможностей развития энергетики на основе органического сырья.

Ключевые слова: биотопливо, альтернативные источники, углеводороды, экология, перспективы, преимущества.

BIOFUEL: AN ECO-FRIENDLY ALTERNATIVE TO TRADITIONAL ENERGY

Student **Demenkova Anastasia Sergeevna**,
Senior Lecturer **Volkova Ekaterina Alexandrovna**,
Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute
named after A. K. Kortunov, Donskoy State Agrarian University,
Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. In the modern world, the problem of global warming and increasing carbon footprint is becoming increasingly urgent, as it negatively affects the environment and humanity. In this regard, various alternatives to traditional fuel are actively discussed. The article is devoted to the study of biofuels as a promising source of energy, as well as an analysis of the possibilities of developing energy based on organic raw materials.

Keywords: biofuels, alternative sources, hydrocarbons, ecology, prospects, advantages.

Введение. В современном мире одной из ключевых научно-технических задач является разработка экологически безопасных альтернативных источников энергии для замещения традиционных энергоносителей. К традиционным энергоресурсам относятся углеводороды: нефть, природный газ и каменный уголь, которые характеризуются как невозобновляемые и конечные по своей природе. В связи с этим возникает острая необходимость в поиске

альтернативных источников энергии. Одним из ключевых факторов, определяющих актуальность данной проблематики, является углеродный след, представляющий собой совокупность выбросов парниковых газов (СО₂, метан, закись азота и др.), что способствует усилению эффекта глобального потепления.

Фактором, отягощающим наше положение в нынешней ситуации, является мощный прирост населения в течении последних сотен лет. Например, за XIX век произошел прирост населения на 700 млн человек, а в XX веке это количество выросло почти в 6,5 раз и достигло почти 4,6 млрд человек. Совместно с численностью человечества происходит рост промышленности энергетики, что влечет увеличение объемов выбросов парникового газа.

Как отмечалось ранее, ведущим преимуществом альтернативного источника должна быть экологичность в сравнении с углеводородным сырьем, а также он должен отличаться возобновляемостью и экономической целесообразностью. К наиболее известным источникам, которые соответствуют указанным характеристикам, относят энергию: атомную, геотермальную, солнца, ветра, биомассы, гидроэнергию. Из всех перечисленных источников энергии стоит отметить биотопливо, получаемое из биомассы, то есть растительного и животного сырья, продуктов жизнедеятельности или органических отходов. Оно подразделяется на несколько видов (рис.).

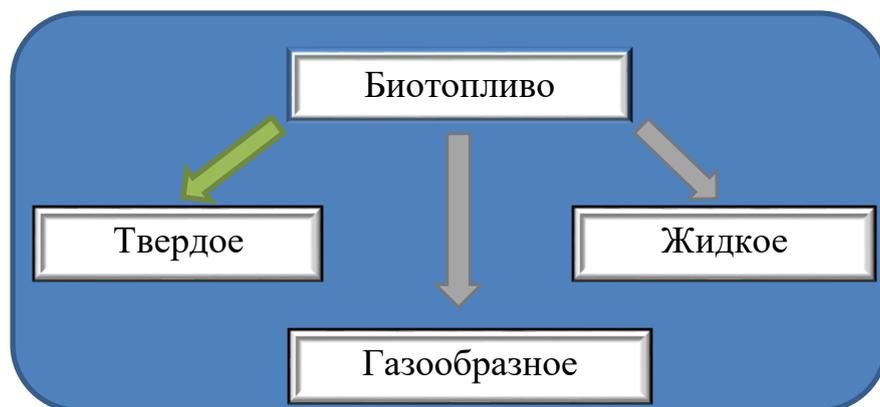


Рисунок – Виды биотоплива

Классификация основывается на агрегатном состоянии и материале, из которого получается топливо. Твердым биотопливом называют пеллеты, которые производят из остатков древесины (коры и опилок), соломы, шелухи от семечек и риса, скорлупы ореха и навоза крупного рогатого скота. Жидкое биотопливо получают из культур, которые богаты сахаром и крахмалом (сахарный тростник и свекла, картофель, зерно), а также растительное масло (рапсовое, пальмовое, соевое и т. д.) и водорослей. Газовое биотопливо – это газ получаемые из отходов сельского хозяйства и других продуктов. Соответственно, чтобы развивать этот вид альтернативного источника энергии необходимо иметь хорошо развитую сельскохозяйственную отрасль, так как сырье для биотоплива полностью выходит из растениеводства и

животноводства.

Перспективным энергетическим ресурсам считаются отходы от лесной промышленности и обработки дерева, а также отходы растительного и животного происхождения. По некоторым оценкам объем отходов в лесопромышленности и деревообрабатывающем производстве составляет 20-40 %, при заготовке леса в отходы относят свыше 30 % леса [1, с. 125]. К таким относят опилки, обрезки, стружку, щепу, пни, корни, ветки, сучья и т. д. Данные отходы чаще всего вывозят на свалки, либо отдают в распоряжение фермерам. На ферме опилки, щепу и стружки используют в качестве подстилки для скота. Для более разумного и полезного применения биомассы ее включают в состав пеллетов. Однако существует нераспространенный вид пеллетов в состав, которых входит торф и птичий помет. При производстве твердого биотоплива допускаются примеси, которые снижают уровень выбросов в окружающую среду.

Пеллеты можно сжигать на различном оборудовании. Однако максимальная эффективность может быть достигнута только с помощью котлов и горелок, специально разработанных для этой цели. В то же время котел, исчерпав топливо в емкости, может продолжать подавать тепло в течение суток из-за низкой скорости процесса. В Европе более половины котлов на древесных гранулах имеют среднюю мощность от 100 кВт до 1 МВт. Обычно такие печи устанавливаются в больших частных домах, школах и на небольших предприятиях. Каминные печи на пеллетах работают не как котлы, а как воздухонагреватели, поэтому для них не требуется система трубопроводов. Чаще всего они используются в качестве дополнительного средства обогрева [2, с. 51].

Российская Федерация всегда обладала значительным количеством сельскохозяйственных (с.-х.) земель. Земельный фонд нашей страны насчитывает 1712519,2 тыс. га. В 2023 году к землям с.-х. назначения относили 379678,4 тыс. га, то есть их удельный вес составлял чуть больше 20 % от земельного фонда [3, с. 286]. Главная проблема заключалась в том, что количество с.-х. земель у сельскохозяйственных организаций постепенно уменьшалось до 2021 года, а в 2022 году начался прирост (табл. 1) [4, с. 26, 28, 29]. Следовательно, увеличиваются объемы получаемой продукции от посевных культур (в том числе рапсы, картофеля, сои, соломы, сахарной свеклы и т. д.), что свидетельствует о дальнейших перспективах.

Таблица 1 – Посевная площадь в млн га

Производители	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год
<i>Сельскохозяйственные организации</i>	53,3	52,7	52,7	53,7
<i>Крестьянские (фермерские) хозяйства и индивидуальные предприниматели</i>	24,3	25	25,4	26,3
<i>Хозяйства населения</i>	2,3	2,3	2,3	2,3
<i>Итого</i>	79,9	80	80,4	82,3

Снижение численности земель связано с неправильным использованием

земель: замусориванием, образованием несанкционированных свалок, не проведение рекультивации земельных участков и др. Часто такое небрежное отношение к землям объясняют отсутствием перспектив у пользователя этими землями. Стоит отметить, что несмотря на отрицательную тенденцию с.-х. отрасль продолжает развиваться, благодаря ряду программ, государственной поддержке, льготам, грантам и пособиям.

В нынешнее время распространяется жидкое биотопливо, такое как биоэтанол и биодизель, которое могло бы легко заменить продукцию, получаемую из углеводов. При этом их сырьевыми источниками являются посевные культуры. Для преобразования сырьевой базы применяют способ ферментации, гидролиза, этерификации. Преимущества такого биотоплива – легкость в хранении и удобство в транспортировке (табл. 2) [5, с. 125].

Таблица 2 – Сырье и применение жидкого биотоплива

<i>Топливо</i>	<i>Сырье</i>	<i>Применение</i>
Биодизель	Рапс, соя, подсолнух	Заменитель дизельного топлива
Биоэтанол	Зерновые, картофель, топинамбур, сахарная свекла, тростина, сорго, тополь, верба, солома, мискант, травы	Составляющая бензина

Все чаще свое внимание обращают на биогазовые технологии. Биогаз как топливо производится через измельчение сырья (солома, шелуха, опилки и др.) и дальнейшем перенесением в специальный резервуар. Под нагревом биомасса постепенно помешивается, что образует питательную среду для бактерий. После этого биогаз проходит этап очищения через газгольдер и только потом его направляют к потребителю. Взрывоопасность минимальна, так как перекрытие не дает воздуху поступать в резервуар [6, с. 147].

Стоит отметить, что биотопливо зачастую применяют не на производстве, а в домашних условиях. Нередко твердое биотопливо имеет спрос в бедных странах, которые ограничены по запасам полезных ископаемых или не имеют иные источники энергии. Топливо органического происхождения почти не используется в качестве смазочного материала или источника энергии. Поэтому процент его использования в этой промышленности составляет около 18 %. При этом биотопливо пытаются внедрить в транспортную отрасль с целью заменить бензин, и пока что объем применения не превысил 2 % [7].

В заключение отметим ряд существенных преимуществ, которые делают биотопливо одним из перспективных источников альтернативной энергии:

1. Экологичность. Последние десятилетия ведется активная борьба за соблюдение экологических принципов, а также предотвращение пагубного влияния на природу и обеспечение безопасности жизнедеятельности человека. В связи с колоссальными выбросами углеводов и увеличением углеродного следа, требуется энергетический источник с минимальным уровнем загрязнений. Биотопливо при сжигании снижает объемы выбросов

более чем на 50 %, что значительно замедляет глобальное потепление. В его составе содержится гораздо меньше опасных химических элементов, в сравнении с традиционными источниками. Сырье, производимое из растительных и животных отходов, делает топливо более простым в утилизации и возобновляемым.

2. Экономичность. Транспортировка такого сырья обходится гораздо дешевле как на ближние, так и на дальние расстояния. С экономической точки зрения, странам, которые не обладают хорошим ресурсным потенциалом полезных ископаемых, выгоднее применять биотопливо, что снизит расходы на импорт нефти и природного газа. Такая политика также применима в нашей стране при перемещении углеводородов между субъектами и округами, которые располагаются на больших расстояниях друг от друга. Новое производство повысит количество рабочих мест в промышленности и смежных отраслях, а также снизит затраты на обновление двигателей.

3. Повышенный срок работы и эксплуатации двигателей. При использовании классического моторного масла у двигателей может существенно снизиться срок эксплуатации из-за механических примесей, так как в них может содержаться углеводородные частицы, металлическая пыль и т. д. Эти примеси способны засорять каналы подачи масла. Такой состав сравнительно ниже в биотопливе и биомаслах.

4. Мобильность. Технические конструкции и оборудования, такие как ветряные и соляные установки рассчитаны только на стационарное использование, их перевозка недопустима. Материал биологического происхождения можно транспортировать с одного места на другое. К примеру, жидкое биотопливо (биодизель) не перемешивается с водой, поэтому его удобно транспортировать.

5. Возобновляемость ресурсов. Данный вид топлива получают через переработку органических отходов и продуктов жизнедеятельности животных. Необходимое сырье для производства будет всегда актуально, так как человек испытывает потребность в растениеводстве и животноводстве.

6. Эффективность применения. Совместно с постепенным развитием идеи использования биотоплива в качестве альтернативного источника энергии, происходят разработки новой технологии их производства и применения. Например, применение современного термохимического процесса способствует рациональному использованию, аккумулирующейся энергии в биомассе, то есть эффективное преобразование в тепло и электричество.

Список литературы:

1. Технология производства топливных пеллет и ее стандарты качества / Т. А. Парникова, В. С. Трофимова, Д. А. Соколов, М. К. Охлопкова. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 12. – С. 125-128. – EDN JPWFHZ.
2. Lashina, E. N. The relevance of biofuel as an alternative energy source. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023. No. 36. Pp. 49-54. EDN HCKVBK.
3. Зорин, А. В. К вопросу о государственной поддержке вовлечения

- сельскохозяйственных земель Российской Федерации в хозяйственный оборот / А. В. Зорин. – Текст: непосредственный // Научно-практические аспекты развития АПК: материалы национальной научной конференции, Красноярск, 18 ноября 2022 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. – С. 286-289. – EDN WXHYEB.
4. Сельское хозяйство в России 2023. – ФСГС (Росстат): [сайт]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/S_x_2023.pdf (дата обращения: 26.02.2025). – Текст: электронный.
5. Орлов, А. С. Биотопливо из растительного сырья и способы его использования / А. С. Орлов, С. С. Орлова. – Текст непосредственный // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы XIV Национальной конференции с международным участием, Саратов, 25–26 апреля 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, 2024. – С. 123-126. – EDN SGQHWD.
6. Ковалев, Д. С. Биотопливо. Преимущества его применения / Д. С. Ковалев. – Текст непосредственный // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов: Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, Москва, 23 декабря 2022 года. – Санкт-Петербург: Печатный цех, 2022. – С. 146-150. – EDN XMVFXK.
7. Деменкова, А. С. Перспективы развития мировой энергетики: от традиционных источников к возобновляемым ресурсам / А. С. Деменкова, Е. А. Волкова. – Текст непосредственный // Наука молодых – будущее России : сборник научных статей 9-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 56-59. – EDN CQHCQV.

© Деменкова А. С., Волкова Е. А., 2025

ИСТОРИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ВЫЗОВЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ СПГ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

магистрант **Змеев Матвей Ильич**,
науч. руководитель: канд. полит. наук **Бойко Александр Александрович**,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются значимость сжиженного природного газа в мировой энергетике и роль Российской Федерации на мировом рынке СПГ. Автором статьи был проведен анализ текущего состояния производства, экспорта и инфраструктуры СПГ в РФ, выявлены ключевые факторы, влияющие на развитие отрасли, а также оценены перспективы роста и основные вызовы для российской индустрии СПГ, включая конкуренцию и геополитические риски. В заключении предложены рекомендации для развития отрасли СПГ, совершенствования технологий и расширения экспортного потенциала.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, СПГ-проекты, отрасль СПГ, Новатэк, Газпром, экспорт СПГ, диверсификация, государственная поддержка.

HISTORY, PROSPECTS AND CHALLENGES OF THE LNG INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE RUSSIAN FEDERATION

Master Student **Zmeev Matvey Ilyich**,
Academic Advisor: PhD of Political Sciences **Boyko Alexander Aleksandrovich**,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper discusses the importance of liquefied natural gas in the global energy industry and the role of the Russian Federation in the global LNG market. The author analyzes the current state of LNG production, exports and infrastructure in the Russian Federation, identifies key factors affecting the development of the industry, and assesses the growth prospects and key challenges for the Russian LNG industry, including competition and geopolitical risks. The report concludes with recommendations for the development of the LNG industry, improvement of technologies and expansion of export potential.

Keywords: liquefied natural gas, LNG projects, LNG industry, Novatek, Gazprom, LNG exports, diversification, state support.

Обзор мирового рынка СПГ

Сжиженный природный газ (СПГ) – это природный газ, искусственно сжиженный до жидкого состояния путем охлаждения до минус 162 °С. В таком

состоянии он занимает объем примерно в 600 раз меньше, чем в газообразном состоянии, что делает его удобным для хранения и транспортировки на большие расстояния, особенно в случаях, когда строительство газопроводов экономически нецелесообразно или технически невозможно. Основным компонентом СПГ является метан (CH_4), который составляет от 90 % до 98 %. Также в составе природного газа могут присутствовать небольшие количества азота, бутана, пропана и этана [1].

Процесс производства СПГ начинается с добычи природного газа, который затем очищается от примесей (вода, углекислый газ, сероводород). После очистки газ подвергается многоступенчатому охлаждению, в ходе которого он постепенно сжижается. Этот процесс требует значительных энергозатрат, так как необходимо поддерживать крайне низкие температуры. После сжижения газ хранится в специальных криогенных резервуарах, которые обеспечивают его изоляцию от внешней среды и предотвращают испарение.

Транспортировка СПГ осуществляется с помощью специализированных судов – газовозов (криотанкеров), оборудованных изотермическими танками и холодильными установками, способными поддерживать необходимую температуру. По прибытии в пункт назначения СПГ регазифицируется на СПГ-терминалах, то есть снова превращается в газообразное состояние, и подается в газотранспортную сеть для дальнейшего распределения потребителям.

Тенденции развития мирового рынка СПГ

Направления формирования мировой СПГ-индустрии в последние годы определяются глобальными изменениями в энергетической политике (энергетический переход), экологическими требованиями и растущим спросом на чистые источники энергии. СПГ рассматривается как «переходное топливо», поскольку при его сжигании выделяется на 40-50 % меньше CO_2 , чем при использовании угля, а также практически отсутствуют выбросы серы и твердых частиц. В рамках Парижского соглашения и ужесточения экологических норм страны Европейского Союза (ЕС), Северной Америки и АТР активно переходят на газ, стимулируя спрос на СПГ. Так, 2 февраля 2022 г. Европейская Комиссия признала природный газ «зеленым» источником энергии в документе «Таксономия ЕС». Это решение направлено на содействие переходу к безуглеродной экономике [2].

Также рост спроса на СПГ, особенно в странах АТР и Африки, будет обусловлен увеличением населения, урбанизацией и экономическим развитием. СПГ используется для улучшения экологии и удовлетворения растущих энергетических потребностей, а также для обеспечения энергетической безопасности, поскольку СПГ позволяет диверсифицировать источники поставок и снизить зависимость от одного поставщика или региона.

Тем не менее у СПГ есть и свои недостатки. Процесс сжижения и транспортировки требует значительных капиталовложений и энергозатрат, что делает его более дорогим по сравнению с трубопроводным газом. Кроме того, процесс добычи и в особенности транспортировки СПГ сопровождается большими утечками метана, который является мощным парниковым газом, что может нивелировать экологические преимущества СПГ.

Ключевые игроки на рынке СПГ

Крупнейшими импортерами СПГ в мире являются страны, которые активно используют газ для удовлетворения своих энергетических потребностей, но при этом либо не имеют достаточных собственных запасов природного газа, либо стремятся диверсифицировать источники генерации энергии. Лидером среди импортеров СПГ на протяжении многих лет являлась Япония, которая начала импортировать СПГ еще в 1960-х гг., однако в 2023 г. потеряла статус крупнейшего импортера (66,2 млн тонн). «Страна восходящего солнца» импортирует газ из различных источников, включая Австралию, Малайзию, Катар и США, что позволяет ей обеспечивать стабильность поставок [3].

С 2023 г. Китай является крупнейшим импортером СПГ (71,6 млн тонн) благодаря быстрому экономическому росту, увеличением потребления газа в промышленности и бытовом секторе и политике перехода от угля к газу для улучшения экологической ситуации. Китай активно развивает газовую инфраструктуру, включая терминалы для приема СПГ, и увеличивает импорт из таких стран, как Австралия, Катар, США и Россия [4].

Южная Корея также входит в число ведущих импортеров СПГ (45,5 млн тонн). Основными поставщиками газа для Южной Кореи являются Катар, Австралия и США. Страна активно инвестирует в развитие газовой инфраструктуры, включая плавучие терминалы для регазификации, что делает импорт СПГ более гибким и доступным.

Европейские страны импортировали суммарно 102 млн тонн СПГ в 2023 г. [5]. С 2022 г. европейские страны значительно увеличивают импорт СПГ для замещения российского трубопроводного газа, в первую очередь у США, которые стали основным поставщиком СПГ (45 %). Россия заняла второе место с долей 17 % [6]. Для увеличения импорта активно развиваются проекты по строительству новых терминалов.

Основными игроками на мировом экспортном рынке СПГ являются США, Австралия и Катар, на долю которых приходится более 60 %. США за последние годы стали одним из ведущих экспортеров СПГ с долей 21,7 % (88,9 млн тонн) благодаря «сланцевой революции», что позволило стране значительно увеличить добычу природного газа. США также активно инвестируют в новые мощности по сжижению газа, что укрепляет их позиции на мировом рынке. Большую часть своего газа США экспортируют в страны ЕС (Франция, Нидерланды, Испания) и Азии (Китай, Южная Корея, Япония, Индия) [7].

Австралия находится на втором месте в мире по экспорту СПГ с долей 19,7 % (80,8 млн тонн). В последние годы страна стала одним из лидеров по экспорту СПГ благодаря реализации крупных проектов, таких как Gorgon, Wheatstone и Prelude FLNG. Страна обладает значительными запасами газа и удобным географическим положением для поставок в АТР (Китай, Япония, Южная Корея), на которые приходится более 90 % поставок страны [8].

Катар является третьим крупнейшим в мире экспортером СПГ с долей 19,2 % (78,6 млн тонн). Государство активно развивает свои производственные

мощности, включая проект «Северное месторождение» (North Field West), который должен увеличить экспортные возможности Катара на 60-80 % к 2030 г. [9]. В основном арабское государство поставляет СПГ по долгосрочным контрактам в азиатские страны (Китай, Индия, Южная Корея, Япония), а также в Европейский Союз.

Российская Федерация с каждым годом увеличивает свое влияние на мировом экспортном рынке и по итогам 2024 г. занимает 4 место с долей 8 % (33,6 млн тонн) [10]. Основными экспортными маршрутами являются страны ЕС и АТР с общей долей 97 % [11]. Россия использует СПГ как инструмент для диверсификации экспорта газа, особенно в условиях геополитических вызовов.

Таким образом, мировой рынок СПГ характеризуется высокой конкуренцией между основными игроками, каждый из которых стремится укрепить свои позиции за счет новых проектов, технологических инноваций и гибких контрактов и в будущем значительно увеличить экспортный потенциал. В условиях растущего спроса и энергетического перехода СПГ остается ключевым элементом глобальной энергетической системы, а его роль, вероятно, будет только усиливаться в ближайшие десятилетия. По прогнозам Министерства энергетики России, к 2035 г. доля СПГ в мировой торговле газом вырастет с 35 % до 51 %.

Текущее состояние рынка СПГ в РФ

Россия является крупнейшей страной в мире по доказанным запасам природного газа, которые оцениваются в более чем 37,4 трлн м³, что составляет около 19,9 % мировых запасов, вторым крупнейшим добытчиком газа (685 млрд м³) и крупнейшим экспортером с общим объемом 166,2 млрд м³ [12]. Основные месторождения газа сосредоточены в Ямало-Ненецком автономном округе на Бованенковском, Уренгойском и Ямбургском месторождениях, а также в других регионах, включая Восточную Сибирь и Дальний Восток.

Природный газ играет ключевую роль в энергетике РФ, обеспечивая значительную часть внутренних потребностей в энергии (в 2024 г. доля газовой генерации составила более трети, а к 2050 г. должна увеличиться до 40 %) и являясь важным экспортным ресурсом. Начиная с 1960-х гг., СССР активно развивал систему трубопроводного транспорта, которая стала основным способом поставок газа как внутри страны, так и за рубежом. Крупнейшие газопроводы, такие как «Турецкий поток» и «Сила Сибири», обеспечивают экспорт газа в страны Восточной и Центральной Европы, а также в Китай. В последние годы Россия также активно развивает производство и экспорт СПГ, что позволяет диверсифицировать поставки и укреплять позиции на мировом рынке, несмотря на то, что развитие СПГ-индустрии в России началось значительно позже, чем в других странах.

Крупнейшими российскими компаниями в области СПГ являются «Газпром», «Новатэк» и «Сахалинская энергия». «Газпром» традиционно занимается трубопроводным экспортом газа, но также развивает СПГ-проекты. «Новатэк», напротив, сделал ставку на СПГ, став ключевым игроком в данной отрасли. «Сахалинская энергия» с 2022 г. является оператором первого в России крупнотоннажного СПГ-завода «Сахалин-2». Эти компании играют

важную роль в укреплении позиций России на мировом рынке СПГ.

Производство СПГ в РФ

Объемы производства СПГ в России в последние годы демонстрируют устойчивый рост (за 7 лет производство СПГ на заводах России выросло с 20 млн тонн в 2018 г. до 33,6 млн тонн в 2024 г., увеличившись на 68 %) [13], что связано с реализацией крупных проектов и активным развитием отрасли. Первым значимым проектом стал «Сахалин-2». Этот проект, расположенный на Дальнем Востоке в Сахалинской области и реализованный в 2009 г. при участии компании «Газпром» и иностранных партнеров, имеет мощность около 10 млн тонн СПГ в год и ориентирован на поставки в страны АТР [14].

Однако настоящим прорывом для российской СПГ-индустрии стал проект «Ямал СПГ», запущенный в 2017 г. компанией «Новатэк» совместно с французской компанией Total, Китайской Национальной Нефтегазовой корпорацией и Фондом Шелкового пути. Завод состоит из трех действующих линий общей мощностью 16,5 млн тонн СПГ в год [15].

Еще одним важным проектом является среднетоннажный завод «СПГ-Портовая», который обеспечивает производство около 1,5 млн тонн СПГ в год и ориентирован на поставки в страны ЕС и Китай [16]. Не менее значимым является среднетоннажный завод «Криогаз-Высоцк», расположенный в порту Высоцк Ленинградской области, мощностью 820 тыс. тонн СПГ в год [17].

Технологические характеристики

Технологические особенности производства СПГ в России также претерпевают изменения. Если на начальном этапе развития отрасли Россия активно использовала иностранные технологии, то сейчас акцент смещается на разработку и внедрение собственных решений. Например, компания «Новатэк» совместно с российскими инженерами разработала технологию «Арктический каскад», которая позволяет эффективно сжигать газ в условиях низких температур. Это снижает затраты на производство и повышает конкурентоспособность российского СПГ на мировом рынке. Кроме того, РФ активно развивает инфраструктуру для транспортировки СПГ, включая строительство специализированных танкеров ледового класса, что позволяет осуществлять поставки в сложных климатических условиях.

Экспортная инфраструктура

Экспортные потоки российского СПГ охватывают несколько ключевых направлений, что позволяет диверсифицировать поставки и минимизировать риски. Европейский Союз остается основным направлением для российского СПГ с долей 52 % (17,5 млн тонн), особенно после увеличения поставок СПГ в связи с сокращением экспорта трубопроводного газа в 2022 г. [18]. Страны, такие как Франция, Испания, Бельгия и Нидерланды, активно закупают СПГ для обеспечения энергетической безопасности.

Вторым ключевым регионом с долей 45 % (15,2 млн тонн) является АТР, где сосредоточены крупнейшие потребители СПГ, такие как Китай, Япония и Южная Корея [18]. Эти страны активно импортируют российский СПГ, особенно с проектов «Сахалин-2» и «Ямал СПГ», благодаря их географической

близости и растущему спросу на газ в регионе. Китай, в частности, стал одним из главных партнеров России в рамках новых СПГ-инициатив. Кроме того, российский СПГ поставляется в другие регионы, включая Индию, страны Ближнего Востока и Латинской Америки, хотя объемы поставок туда пока менее значительны (около 3 % экспорта).

Роль государственной политики в развитии отрасли

Роль государства в развитии отрасли СПГ является ключевой, поскольку именно Правительство создает условия для привлечения инвестиций, развития инфраструктуры и обеспечения конкурентоспособности российского СПГ на мировом рынке. Во-первых, государство активно участвует в финансировании инфраструктурных проектов, таких как строительство портов, терминалов и транспортных коридоров. Например, развитие порта Сабетта на Ямале стало возможным благодаря государственным инвестициям. Во-вторых, Правительство способствует развитию технологий, поддерживая исследования и разработки в области сжижения газа, что позволяет снизить зависимость от иностранных технологий. В-третьих, РФ активно продвигает свои интересы на международной арене, заключая долгосрочные контракты на поставку СПГ с ключевыми партнерами, такими как Китай и страны Европы. В-четвертых, государство играет важную роль в создании благоприятного инвестиционного климата. Это включает предоставление гарантий для иностранных инвесторов, упрощение административных процедур и снижение бюрократических барьеров.

Одним из ключевых направлений является совершенствование нормативно-правовой базы с целью создания благоприятных условий для развития отрасли СПГ на территории страны. В рамках данной политики осуществляется комплекс мер, направленных на устранение правовых барьеров, упрощение административных процедур и обеспечение прозрачности регулирования в сфере добычи, переработки, транспортировки и экспорта СПГ.

В частности, были внесены изменения в Федеральный закон «О газоснабжении в Российской Федерации», которые позволили частным компаниям, таким как ПАО «Новатэк», осуществлять экспорт СПГ наравне с государственными корпорациями. Данное решение способствует повышению конкуренции и привлечению дополнительных инвестиций в отрасль. Кроме того, Правительство вводит специальные налоговые режимы и льготы для стимулирования разработки новых месторождений и реализации крупных СПГ-проектов. Например, для заводов, расположенных в Арктической зоне, предусмотрена нулевая ставка налога на добычу полезных ископаемых на период окупаемости инвестиций. Также приняты меры по снижению таможенных пошлин на оборудование, необходимое для строительства и эксплуатации СПГ-заводов.

Распоряжение Правительства РФ от 16 марта 2021 г. № 640-р «О долгосрочной программе развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации» стало важным этапом в развитии производства СПГ [19]. Этим документом была утверждена долгосрочная программа, направленная на развитие и поддержку отрасли в стране. Программа

предусматривает меры по увеличению производственных мощностей до 140 млн тонн СПГ в год к 2035 г. (увеличение в три раза), улучшению технологий и расширению экспорта СПГ (планируется увеличить долю России в мировом экспорте СПГ до 20 %).

Все эти меры направлены на то, чтобы сделать российский СПГ более конкурентоспособным на мировом рынке и обеспечить устойчивое развитие отрасли в долгосрочной перспективе.

Факторы, влияющие на развитие рынка СПГ в РФ

Геополитические факторы

Ключевыми факторами, оказывающим влияние на развитие отрасли СПГ в России, являются геополитические аспекты, которые оказывают значительное влияние на экспортные возможности и стратегии. Одним из ключевых вызовов являются санкции и ограничения, введенные западными странами в отношении РФ. Введение данных мер ограничивает доступ российских компаний к передовым технологиям, высокотехнологичному оборудованию и международным финансовым рынкам, что может привести к существенному замедлению реализации стратегически важных проектов.

В частности, вследствие задержек и полного прекращения поставок критически важного оборудования и материалов, обусловленных экспортными санкциями, введенными против России, сроки сдачи первых газозовов ледового класса Arc 7 на судостроительном комплексе «Звезда» (Приморский край) были перенесены на конец 2025 г. или даже на более поздний период. Кроме того, в 2022 г. Южная Корея, являющаяся ключевым партнером в области производства газозовов, аннулировала контракт на строительство трех СПГ-танкеров для компании «Совкомфлот» [20]. Эти суда предназначались для транспортировки СПГ в рамках проекта «Ямал СПГ-2», что может существенно ограничить объемы отгрузки СПГ с завода в 2025 г.

Совокупность данных факторов способна привести к значительному снижению экспортного потенциала России в сфере СПГ, что, в свою очередь, ставит под угрозу выполнение стратегической цели по достижению 20 % доли в мировом экспорте сжиженного природного газа к 2030 г. Такие ограничения могут иметь долгосрочные последствия для экономики страны, включая снижение конкурентоспособности на глобальных энергетических рынках и ухудшение инвестиционного климата.

В условиях меняющейся международной обстановки и перераспределения влияния между крупными игроками РФ вынуждена искать новые рынки сбыта и диверсифицировать свои экспортные маршруты. Это требует значительных инвестиций в инфраструктуру, включая строительство терминалов для сжижения и регазификации, а также развитие логистических цепочек. Россия активно ищет альтернативные пути, включая сотрудничество с азиатскими странами, такими как Китай и Индия, которые становятся основными партнерами в условиях ограничений со стороны Запада. Это означает, что санкции и ограничения, а также изменение структуры экспорта в результате геополитических изменений, создают не только вызовы, но и возможности для развития рынка СПГ в РФ.

Экономические факторы

СПГ-сектор России также зависит от ряда экономических факторов. Одним из ключевых является динамика цен на газ, которая влияет на рентабельность проектов, поскольку высокие цены на СПГ стимулируют инвестиции в новые проекты, тогда как их снижение может замедлить развитие отрасли. Конкуренция на мировом рынке также играет важную роль, поскольку РФ конкурирует с такими крупными экспортёрами, как Австралия, Катар, Малайзия и США, что требует повышения эффективности и снижения затрат. Инвестиции в новые проекты являются основным драйвером роста отрасли. Реализация крупных проектов по сжижению и регазификации требует значительных капиталовложений, которые привлекаются как за счет государственной поддержки, так и частных инвесторов. Таким образом, успешное развитие СПГ-сектора зависит от способности балансировать эти факторы, обеспечивая конкурентоспособность и устойчивый рост.

Технологические факторы

Не менее важными являются технологические факторы, определяющие эффективность производства, транспортировки и конкурентоспособность продукции. Одним из ключевых аспектов является развитие технологий сжижения и регазификации. РФ активно инвестирует в создание собственных технологий, таких как «Арктический каскад», разработанный компанией «Новатэк». Эта технология позволяет эффективно сжижать газ при низких температурах, что особенно важно для работы в арктических условиях. К тому же внедрение новых технологий, таких как мембранные теплообменники и процессы с низким энергопотреблением, способствует улучшению экономических показателей и конкурентоспособности российского СПГ на мировом рынке.

В последние годы активную роль в технологическом прогрессе отрасли начинает играть цифровизация. Внедрение цифровых технологий, таких как искусственный интеллект, большие данные и интернет вещей, позволяет оптимизировать производственные процессы, повысить надежность оборудования и улучшить управление цепочками поставок. Например, цифровые платформы помогают прогнозировать спрос, управлять логистикой и минимизировать риски. Цифровизация также способствует повышению безопасности и экологичности производства, что особенно важно в условиях ужесточения экологических стандартов.

Экология городов

Доля городского населения в РФ превышает 75 % и продолжает расти. Города служат ключевыми драйверами экономического развития, обеспечивая рост уровня жизни благодаря промышленности, транспорту, сфере услуг, научным и финансовым институтам. Однако они же являются основными источниками выбросов парниковых газов и загрязнений, на долю которых приходится около 70 % всех выбросов. Это приводит к таким проблемам, как загрязнение воздуха, почвы, водных ресурсов и т. д.

Рост потребления СПГ может стать важным шагом в решении данных проблем. Использование СПГ в транспорте, энергетике и промышленности

способствует снижению уровня загрязнения воздуха, а в сочетании с другими экологичными технологиями, такими как ВИЭ и технологии улавливания и хранения углерода (CCUS), СПГ может стать ключевым элементом перехода к устойчивому развитию городов. Это не только улучшит экологическую обстановку, но и повысит качество жизни горожан, снизив риски для здоровья и создав более комфортную среду для проживания.

Перспективы развития отрасли СПГ в РФ

Увеличение производства СПГ

Развитие рынка СПГ в России имеет высокий потенциал благодаря масштабным планам по расширению производства. Одним из ключевых направлений является реализация новых крупнотоннажных проектов, таких как «Арктик СПГ-2» и «Балтийский СПГ». Проект «Арктик СПГ-2», разрабатываемый компанией «Новатэк» совместно с иностранными партнерами, включает строительство трех производственных линий суммарной мощностью 19,8 млн тонн в год, а также стабильного газового конденсата объемом до 1,6 млн тонн в год. На полную мощность завод должен выйти к 2026 г. [21].

Вторым важнейшим крупнотоннажным проектом должен стать «Балтийский СПГ» компании «Газпром», ориентированный на экспорт в Европу. Завод станет лидером по объему переработки газа в РФ и крупнейшим производителем СПГ в Северо-Западной Европе. Комплекс будет ежегодно перерабатывать 45 млрд м³ газа и выпускать 13 млн тонн СПГ [22]. Согласно плану, третья линия должна быть введена к 2026 г.

Параллельно развиваются малые и среднемощные проекты. Так, к 2030 г. планируется построить 94 малотоннажных СПГ-заводов, которые позволят гибко реагировать на локальный спрос и тестировать новые технологии [23]. Эти проекты особенно важны для регионов, где строительство крупных заводов экономически нецелесообразно. В совокупности данные инициативы позволят РФ увеличить долю на мировом рынке СПГ, диверсифицировать экспортные потоки и укрепить свои позиции как одного из лидеров в отрасли.

Расширение экспортных возможностей

Векторы развития СПГ-сектора в России во многом связаны с расширением экспортных возможностей, что позволит укрепить позиции страны на мировом рынке. Одним из ключевых направлений является развитие Северного морского пути (СМП), который становится важной транспортной артерией для поставок СПГ из арктических регионов. Благодаря таянию льдов и использованию ледокольного флота, СМП обеспечивает более короткие и экономически выгодные маршруты доставки СПГ в страны Азии и Европы. Это особенно актуально для проектов, таких как «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2». В общем показателе перевозок по СМП в 2024 г. на СПГ пришлось 21,9 млн тонн или 57,7 % [24]. В дальнейшем объем транспортировки СПГ через Северный морской путь с введением на полную мощность «Арктик СПГ-2» должен только увеличиться.

Кроме того, РФ активно инвестирует в создание новых СПГ-терминалов и расширение портовой инфраструктуры. Например, строительство терминалов

в Балтийском море и модернизация порта Сабетта на полуострове Ямал позволят увеличить объемы экспорта и улучшить логистику. Все данные меры направлены на достижение цели увеличить долю России в мировом экспорте СПГ до 20 %.

Расширение потребления СПГ внутри страны

Будущее отрасли сжиженного природного газа также тесно связано с ростом потребления СПГ внутри страны, что способствует диверсификации использования газа в различных отраслях экономики. В промышленности СПГ используется как экологически чистое топливо для энергоснабжения предприятий, снижая выбросы вредных веществ. В энергетике СПГ применяется для обеспечения электроэнергией удаленных регионов, где строительство газопроводов экономически невыгодно.

Особое внимание уделяется транспортной отрасли, где СПГ становится альтернативой традиционным видам топлива. Автобусы, легковые и грузовые автомобили, работающие на СПГ, активно внедряются в крупных городах и на междугородних маршрутах. Это не только снижает затраты на топливо, но и уменьшает экологическую нагрузку. Развитие инфраструктуры заправок СПГ и государственная поддержка перевода транспорта на газомоторное топливо способствуют расширению использования СПГ внутри страны, что открывает новые перспективы для роста рынка и способствует повышению экологичности городов. Так, к 2035 г. ожидается, что спрос на газомоторное топливо (ГМТ) в РФ увеличится более чем в 4-6 раз по сравнению с текущими показателями, достигнув объема 10-15 млрд м³, при этом половина этого объема будет приходиться на СПГ [25].

Интеграция в мировую энергетическую систему

Стратегическим направлением развития СПГ-индустрии является интеграция в мировую энергетическую систему, что позволяет РФ укреплять позиции на глобальном уровне. Одним из ключевых аспектов является участие в международных проектах, которые способствуют обмену технологиями, привлечению инвестиций и расширению экспортных возможностей. Например, сотрудничество с иностранными партнерами в рамках проектов «Сахалин-2», «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2» демонстрирует готовность России работать в рамках международных стандартов и повышать конкурентоспособность своей продукции. Особое внимание уделяется сотрудничеству с азиатскими странами, такими как Китай, Индия и Япония, где спрос на СПГ продолжает расти. РФ активно развивает долгосрочные контракты и совместные проекты, которые ориентированы на азиатский рынок. Данное сотрудничество не только расширяет географию поставок, но и способствует диверсификации рынков сбыта, снижая зависимость от традиционных потребителей.

Вызовы и риски

Тем не менее перспективы развития рынка СПГ в России сопровождаются рядом вызовов и рисков, которые могут повлиять на динамику отрасли. Одним из основных вызовов является конкуренция со стороны других экспортеров, таких как США, Катар и Австралия. Например, США, благодаря «сланцевой революции», активно наращивают производство СПГ и предлагают

гибкие условия поставок, а Катар планирует увеличить свои мощности в полтора раза до 126 млн тонн к 2027 г., что может создать серьезные проблемы для российских производителей в будущем [26]. Для сохранения конкурентоспособности РФ необходимо снижать затраты на производство, внедрять инновационные технологии и улучшать логистику.

Еще одним существенным риском является изменение климатической политики в мире. Ужесточение экологических норм и переход многих стран к «зеленой» энергетике могут снизить спрос на ископаемые виды топлива, включая СПГ. РФ должна адаптироваться к этим изменениям, развивая технологии снижения углеродного следа и инвестируя в возобновляемые источники энергии. Успешное преодоление этих вызовов позволит России сохранить лидирующие позиции на мировом рынке СПГ.

Заключение

Рынок сжиженного природного газа в Российской Федерации демонстрирует устойчивый рост, что подтверждается успешной реализацией ряда среднетоннажных заводов и крупных проектов, таких как «Сахалин-2», работающий с 2009 г., и «Ямал СПГ», запущенный в 2017 г. Эти проекты позволили стране занять четвертое место в мире по объемам экспорта СПГ, уступая только традиционным лидерам США, Австралии и Катару. В 2024 г. Россия экспортировала около 33,6 млн тонн СПГ, а с запуском в ближайшие годы новых проектов, таких как «Арктик СПГ-2» и «Балтийский СПГ», этот показатель увеличится в 2 раза, а к 2035 г. с внедрением новых мощностей – в 3 раза.

Однако, несмотря на значительные успехи, отрасль сталкивается с рядом вызовов. Одним из основных является жесткая конкуренция со стороны других экспортеров, имеющих далеко идущие планы по расширению экспорта. Кроме того, изменения в глобальной климатической политике, такие как ужесточение экологических норм и переход к «зеленой» энергетике, могут снизить спрос на ископаемые виды топлива, включая СПГ. Геополитические риски, такие как санкции и ограничения, также создают дополнительные сложности для привлечения инвестиций и доступа к передовым технологиям.

Перспективы развития рынка СПГ в России во многом зависят от технологических, экономических и геополитических факторов. Технологические инновации играют ключевую роль в повышении конкурентоспособности и технологической независимости отрасли. Внедрение цифровых технологий, таких как искусственный интеллект и большие данные, помогает оптимизировать процессы добычи, сжижения и транспортировки газа. Экономические факторы, включая цены на газ и объемы инвестиций, определяют рентабельность проектов. В 2024 г. цены на СПГ достигли рекордных значений из-за энергетического кризиса в Европе и усиления конкуренции за поставки между странами АТР и ЕС, что стимулировало инвестиции в новые проекты. Однако в долгосрочной перспективе цены могут снизиться, что потребует от России дальнейшего снижения затрат на производство. Геополитические изменения, такие как переориентация экспортных потоков с Европы на Азию, открывают новые возможности.

Например, Китай, который в 2023 г. стал крупнейшим импортером СПГ, активно сотрудничает с Россией в рамках ряда СПГ-заводов, включая «Арктик СПГ-2». Однако для успешной реализации этих проектов требуется значительное развитие инфраструктуры, включая строительство новых терминалов и танкеров ледового класса.

Для дальнейшего успешного развития рынка СПГ в России рекомендуется предпринять следующие шаги. Во-первых, усилить государственную поддержку отрасли через налоговые льготы, субсидии и упрощение административных процедур. Например, нулевая ставка налога на добычу полезных ископаемых для новых месторождений в Арктике уже стимулирует инвестиции в проекты, такие как «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2». Во-вторых, необходимо активно развивать инновационные технологии, включая снижение углеродного следа и внедрение ВИЭ в производственный процесс. Например, использование CCUS технологий может сделать российский СПГ более экологически привлекательным. В-третьих, важно расширять производственные мощности за счет строительства новых СПГ-заводов в дополнение к уже строящимся «Арктик СПГ-2» и «Балтийский СПГ», а также модернизации существующих. Наконец, ключевым направлением должна стать диверсификация экспортных потоков, включая расширение сотрудничества как с развитыми странами, так и с развивающимися рынками, такими как Индия и страны Юго-Восточной Азии. Например, Индия, которая планирует увеличить долю газа в своем энергобалансе до 15 % к 2030 г., может стать важным партнером для РФ [27]. Это позволит снизить зависимость от одного региона и укрепить позиции России на глобальном рынке СПГ.

Таким образом, несмотря на вызовы, рынок СПГ в РФ имеет значительный потенциал для роста. Успешная реализация стратегий, направленных на технологическое развитие, расширение производственных мощностей и диверсификацию экспорта, позволит Российской Федерации не только сохранить, но и укрепить свои позиции в качестве одного из ключевых игроков на мировом рынке сжиженного природного газа.

Список литературы:

1. Сжиженный природный газ (СПГ), технологии сжижения. – Текст: электронный // Neftrgas.ru: [сайт]. – 20.05.2012. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/> (дата обращения: 17.02.2025).
2. ЕК назвала газ и атом зелеными переходными источниками энергии. – Текст: электронный // ТАСС: [сайт]. – 02.02.2022. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/> (дата обращения: 17.02.2025).
3. Япония в 2023 г. сократила импорт СПГ из России на 10,7 %. – Текст: электронный // Neftrgas.ru: [сайт]. – 24.01.2024. – URL: <https://neftegaz.ru/news/spg-szhizhennyu-prirodnyu-gaz/> (дата обращения: 17.02.2025).
4. Китай вновь стал крупнейшим импортером СПГ. – Текст: электронный // Прайм: [сайт]. – 26.01.2024. – URL: <https://1prime.ru/20240126/> (дата обращения: 17.02.2025).

5. В тройке крупнейших экспортеров СПГ в 2023 году значатся США, Австралия и Катар. – Текст: электронный // Палуба. Медиа: [сайт]. – 13.01.2024. – URL: <https://paluba.media/news/67381> (дата обращения: 18.02.2025).
6. Эксперт назвал крупнейшего поставщика СПГ в Европу по итогам 2024 года. – Текст: электронный // PortNews: [сайт]. – 19.02.2025. – URL: <https://portnews.ru/news/> (дата обращения: 19.02.2025).
7. США обошли Австралию и Катар в экспорте СПГ в 2023 году. – Текст: электронный // OfficeLife.media: [сайт]. – 14.02.2024. – URL: <https://officelife.media/news/> (дата обращения: 18.02.2025).
8. Газовая отрасль Австралии. – Текст: электронный // Seala.ru: [сайт]. – 2024. – URL: <https://seala.ru/ing/> (дата обращения: 18.02.2025).
9. QatarEnergy расширит производство СПГ за счет реализации проекта NFW на Северном месторождении. – Текст: электронный // Neftrgas.ru: [сайт]. – 26.02.2024. – URL: <https://neftegaz.ru/news/> (дата обращения: 18.02.2025).
10. Куда идет экспорт российского СПГ. – Текст: электронный // Investing.com: [сайт]. – 20.09.2024. – URL: <https://ru.investing.com/analysis/> (дата обращения: 18.02.2025).
11. Экспорт СПГ из России в 2024 г. достиг рекордных 33,6 млн т. – Текст: электронный // Neftrgas.ru: [сайт]. – 28.01.2025. – URL: <https://ru.investing.com/analysis/> (дата обращения: 19.02.2025).
12. Россия в 2024 году увеличила поставки трубопроводного газа на 16 %. – Текст: электронный // Ведомости: [сайт]. – 30.01.2025. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/> (дата обращения: 19.02.2025).
13. Росстат отметил рост производства СПГ в 2024 году выросло на 5,4 % до 34,7 млн т. – Текст: электронный // Интерфакс: [сайт]. – 05.02.2025. – URL: <https://www.interfax.ru/business/1006528> (дата обращения: 19.02.2025).
14. Сахалин-2. – Текст: электронный // Газпром: [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.gazprom.ru/projects/> (дата обращения: 19.02.2025).
15. Ямал СПГ. – Текст: электронный // Yamal LNG: [сайт]. – 2025. – URL: <http://yamallng.ru/> (дата обращения: 19.02.2025).
16. Комплекс по производству, хранению и отгрузке сжиженного природного газа в районе КСПГ «Портовая» // Invest.Gazprom: [сайт]. – 2025. – URL: <https://invest.gazprom.ru/about/> (дата обращения: 19.02.2025).
17. Криогаз-Высоцк. – Текст: электронный // Новатэк: [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.novatek.ru/ru/about/lng-projects/criogas/> (дата обращения: 19.02.2025).
18. Азия закупила 45 % всего российского СПГ, Евросоюз – рекордные 52 % в 2024 году. – Текст: электронный // Поворот России в Азию: [сайт]. – 30.01.2025. – URL: <https://russiaspivottoasia.com/russian/> (дата обращения: 20.02.2025).
19. Правительство утвердило долгосрочную программу развития производства СПГ. – Текст: электронный // Правительство РФ: [сайт]. – 22.03.2021. – URL: <http://government.ru/docs/41790/> (дата обращения: 20.02.2025).

20. Южная Корея отказалась строить газовозы для «Арктик СПГ 2». – Текст: электронный // ИнфоТЭК: [сайт]. – 25.05.2022. – URL: <https://itek.ru/news/> (дата обращения: 22.02.2025).
21. О проекте. – Текст: электронный // Arcticspg.ru: [сайт]. – 2025. – URL: <https://arcticspg.ru/proekt/> (дата обращения: 21.02.2025).
22. Комплекс по переработке этансодержащего газа и производству СПГ в Ленинградской области // Газпром: [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.gazprom.ru/projects/lng-leningrad/> (дата обращения: 21.02.2025).
23. В России к 2030 году могут построить порядка 94 малотоннажных СПГ-заводов. – Текст: электронный // Sfr.gov.ru: [сайт]. – 20.06.2023. – URL: https://sfr.gov.ru/press_center/z_news/ (дата обращения: 21.02.2025).
24. Правительство утвердило перечень пунктов пропуска для внедрения системы резервирования даты и времени проезда грузовиков. – Текст: электронный // Mintrans.gov.ru: [сайт]. – 31.05.2023. – URL: <https://mintrans.gov.ru/eye/press-center/> (дата обращения: 22.02.2025).
25. К транспорту в России подводят газ. – Текст: электронный // Коммерсантъ: [сайт]. – 29.03.2024. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6596237> (дата обращения: 21.02.2025).
26. В Катаре прогнозируют появление спроса на новые СПГ-проекты после 2030 года. – Текст: электронный // Интерфакс: [сайт]. – 15.05.2024. – URL: <https://www.interfax.ru/business/960638> (дата обращения: 22.02.2025).
27. India gas demand to surge by 2030, doubling LNG imports, says IEA. – Текст: электронный // Reuters: [сайт]. – 12.02.2025. – URL: <https://www.reuters.com/business/energy/> (дата обращения: 22.02.2025).

© Змеев М. И., 2025

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОМЕХ (ШУМОВ)
НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПЬЕЗОАКСЕЛЕРОМЕТРА НА РАБОТАЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ
С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТИ**

ассистент **Белкин Иван Викторович**,
профессор **Лачин Вячеслав Иванович**,
профессор **Плотников Дмитрий Александрович**,
ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлены результаты работы авторов по созданию систем вибромониторинга турбоагрегатов. Проанализировано влияние случайных помех (шумов) на вычисление коэффициента преобразования пьезоакселерометра на работающем оборудовании при использовании нейросети. Определен максимально допустимый уровень шума, при котором нейросеть справляется с поставленной задачей и определяет коэффициент преобразования пьезоакселерометра с необходимой точностью. В работе представлена структура и основные параметры нейросети, описаны этапы ее обучения и результаты применения.

Ключевые слова: вибромониторинг, коэффициент преобразования, пьезоакселерометр, обучение нейросети, машинное обучение, нейронные сети, нейросети.

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RANDOM INTERFERENCE
(NOISE) ON THE ACCURACY OF MEASURING
PIEZOACCELEROMETER PARAMETERS ON OPERATING EQUIPMENT
USING A NEURAL NETWORK**

Assistant **Belkin Ivan Viktorovich**,
Professor **Lachin Vyacheslav Ivanovich**,
Professor **Plotnikov Dmitry Alexandrovich**,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
M.I.Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of the author's work on the creation of vibration monitoring systems for turbine units. The influence of random interference (noise) on the calculation of the piezoaccelerometer conversion coefficient on operating equipment using a neural network is analyzed. The maximum allowable level of random interference (noise) has been determined, at which the neural network copes with the task and determines the conversion coefficient of the piezoelectric accelerometer with the required accuracy. The paper presents the

structure and main parameters of a neural network, describes the stages of its training and the results of its application.

Keywords: Vibration monitoring, conversion coefficient, piezoaccelerometer, neural network training, machine learning, neural networks, neural networks.

Турбоагрегат (ТА) – это один из основных элементов оборудования тепловой электростанции. Отказ ТА может привести к существенным технико-экономическим потерям, иногда с катастрофическими последствиями. Для того чтобы избежать катастрофы и выхода из строя столь важного и дорогостоящего оборудования, необходимо тщательно следить за его состоянием и своевременно выявлять зарождающиеся дефекты. Для обнаружения аномалий в работе ТА широко используют вибродиагностику, поскольку она является одним из наиболее эффективных методов [1, 2]. При этом в качестве основных измерительных преобразователей используются пьезоэлектрические акселерометры (ПА) [1], преобразующие механические колебания контролируемого объекта в электрический сигнал, пропорциональный ускорению этих колебаний. В процессе эксплуатации систем вибромониторинга (СВМ) весьма важно периодически проверять техническое состояние ПА и его ключевые характеристики. Известен не один способ выявления неисправностей ПА и определения его параметров. В [3, 4, 5] описаны способы, при реализации которых с помощью электрического импульса возбуждают и регистрируют свободные колебания чувствительного элемента (ЧЭ) ПА, а затем с использованием измеренных параметров этих колебаний вычисляют резонансную частоту ПА и его коэффициент преобразования (КП). У этой группы способов есть существенный недостаток: они неработоспособны в условиях нормальной эксплуатации ТА, потому что вибрация ТА искажает форму свободных колебаний ЧЭ ПА. В работах [6, 7] представлена улучшенная группа способов, которые позволяют определять параметры ПА даже в рабочем режиме ТА. Это становится возможным благодаря тому, что периодическая вынужденная составляющая колебаний ЧЭ ПА компенсируется различными способами, а свободная составляющая выделяется и анализируется. У этих способов имеются свои недостатки: они работоспособны только в условиях периодической вибрации объекта наблюдения и чувствительны к случайным помехам.

В работе авторов [8] был предложен метод определения КП ПА, использующий для анализа свободных колебаний ЧЭ ПА искусственную нейронную сеть (ИНС) и в значительной степени лишенный указанных недостатков. В исследовании, представленном в данной статье, была поставлена задача: найти максимально допустимый уровень шума (случайных помех) на интервале анализа свободных колебаний ЧЭ ПА, при котором ИНС определяет КП ПА с относительной погрешностью не более 1 %. Необходимо отметить, что исследование проводилось в условиях наличия трех видов помех: случайные помехи (шумы), периодические вибрации с частотой, кратной оборотной частоте ТА, и периодические вибрации с частотой, не кратной оборотной частоте ТА. Параметры двух последних видов помех были заданы в

соответствии с максимально допустимым уровнем вибрации ТА в рабочем режиме, то есть в условиях его нормальной эксплуатации.

В [6, 7] показано, как КП ПА связан с параметрами затухающих свободных колебаний ЧЭ ПА, вызванных тестовым электрическим импульсом. На рисунке 1а изображен график, демонстрирующий изменения заряда, возникающего на обкладках ПА в результате этих колебаний.

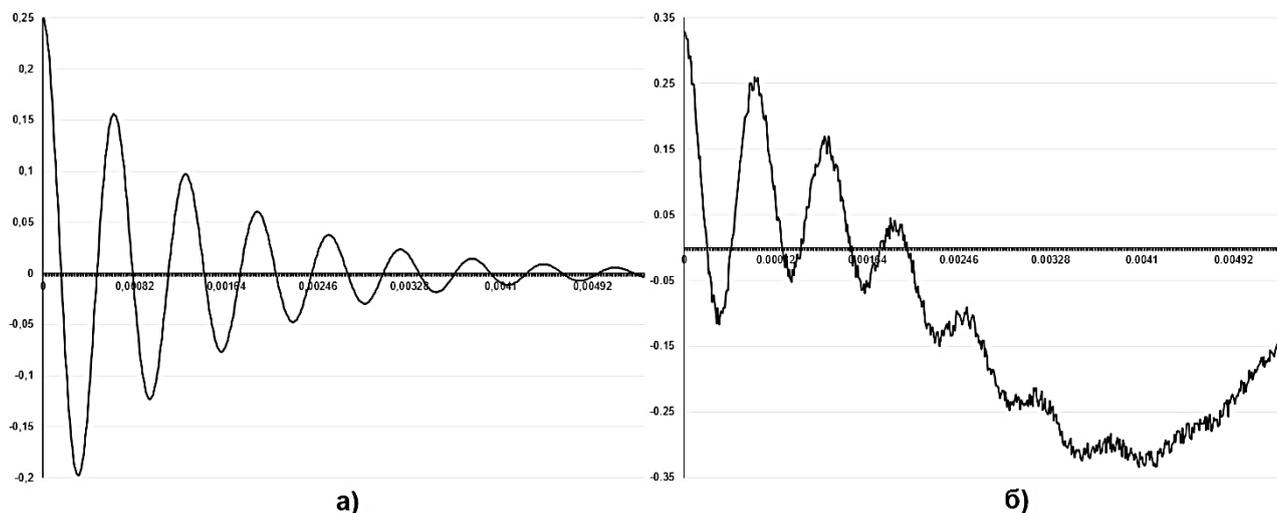


Рисунок 1 – Затухающие свободные колебания ЧЭ ПА, вызванные электрическим импульсом:
 а) без помех; б) с помехами (случайные помехи, а также периодические вибрации, кратные и не кратные оборотной частоте ТА)

Эти колебания можно описать выражением:

$$q_a(t) = Q \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(\omega_{ce} \cdot t),$$

где Q, τ, ω_{ce} – значения амплитуды, постоянной времени затухания и круговой частоты свободной составляющей колебаний ЧЭ ПА соответственно.

В [7] показано, что КП ПА связан с амплитудой этих колебаний соотношением:

$$K_Q = C_A \cdot \sqrt{Q},$$

где C_A – константа, определяемая механическими характеристиками ЧЭ ПА и напряжением тестового импульса. Таким образом, зная величину C_A и измерив Q , можно вычислить текущее значение КП ПА.

Однако на практике измерение амплитуды Q осложнено тем, что в процессе функционирования ТА свободные колебания ЧЭ ПА суммируются с вынужденными, которые обычно носят периодический характер и содержат несколько видов помех, показанных на рисунке 1б. В общем случае сигнал на выходе ПА описывается выражением:

$$q(t) = Q \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \cos(\omega_{ce} t) + \sum_{i=1}^N A_i \cos(i\omega_e t + \varphi_i) + \sum_{j=1}^M B_j \cos(\omega_j t + \phi_j) + \Delta, \quad (1)$$

где $Q, \tau, \omega_{св}$ – амплитуда, постоянная времени затухания и круговая частота свободной составляющей колебаний ЧЭ ПА;

N – количество регистрируемых гармоник оборотной частоты ТА;

ω_e – круговая частота вращения ротора ТА (оборотная частота);

A_i, φ_i – амплитуды и фазы гармоник оборотной частоты ТА;

M – количество периодических составляющих вынужденных колебаний ЧЭ с частотами, не кратными ω_e ;

B_j, ω_j, ϕ_j – их амплитуды, частоты и фазы;

Δ – случайные помехи (шумы).

Исследуемый в данной статье метод [8] для определения параметров свободной составляющей колебаний ЧЭ в выражении (1) использует ИНС. На вход ИНС подаются отсчеты сигнала с выхода ПА после тестового импульса, а также параметры A_1, ω_1 вынужденной составляющей, предварительно измеренные СВМ. В результате работы ИНС на ее выходе формируются значения параметров $Q, \tau, \omega_{св}$ свободной составляющей колебаний ЧЭ.

На первом этапе реализации метода [8] выполняется обучение ИНС на основе обучающего набора данных (ОНД), который содержит объекты $X = \{X_1, \dots, X_{5000}\}$. Каждый объект включает в себя входной вектор $x_d = \{x_{d1}, \dots, x_{d303}\}$ и выходной вектор $y_d = \{y_{d1}, \dots, y_{d3}\}$. Изучение реальных осциллограмм сигналов показало, что свободная составляющая колебаний ЧЭ затухает за время около $3 \cdot 10^{-3}$ секунды, в дальнейшем ее уровень сопоставим с шумами. В процессе создания ОНД был выбран именно этот временной промежуток с шагом дискретизации $1 \cdot 10^{-5}$ секунда. Таким образом был получен входной вектор, содержащий 303 значения: амплитуду A_1 и круговую частоту ω_1 основной гармоники вынужденной составляющей колебаний и 301 отсчет сигнала. Выходной вектор содержит 3 значения: амплитуду Q , постоянную времени затухания τ и круговую частоту $\omega_{св}$ свободных колебаний. С использованием выражения (1) был сформирован ОНД из 5000 объектов. Для моделирования шумов применялся генератор случайных чисел с равномерным непрерывным распределением. Параметры $N, A_i, \omega_{ei}, M, B_j, \omega_j$ были заданы в соответствии с контролируемым диапазоном частот и максимально допустимым уровнем вибрации ТА в процессе его нормальной эксплуатации.

Так как данные, которые используются для обучения нейросети, представлены в разных единицах измерения, была выполнена их нормализация. Для этого использовался метод «Масштабирование Min-Max». Нормализованный ОНД разделен на три части: 70 % (3500 объектов) – обучающие данные, 15 % (750 объектов) – проверочные данные, 15 % (750 объектов) – тестовые данные.

Для обучения ИНС применялась программа MATLAB. Структура ИНС имеет 3 слоя: входной (303 нейрона), скрытый (8 нейронов) и выходной (3 нейрона). В скрытом слое применялась функция активации сигмоид, а в выходном слое – линейная. Алгоритм оптимизации – Левенберга-Марквардта. Указанные параметры ИНС были выбраны на основе ранее проведенных

экспериментов.

Чтобы добиться хороших результатов, было принято решение провести эксперимент по обучению нейросети несколько раз, так как из-за инициализации весов случайным образом алгоритм оптимизации в каждой попытке может выдавать различные результаты. Лучшие результаты обучения ИНС представлены в таблице 1. Во всех трех случаях обучение было прекращено по причине достижения критерия валидации.

Таблица 1 – Результаты обучения ИНС в программе Matlab

№ эксперимента	№ 1	№ 2	№ 3
Количество эпох	13	12	13
Время обучения	00:02:02	00:01:30	00:02:08
Производительность	0,00102	0,00103	0,000933
Градиент	0,00316	0,00229	0,00724
Му	$1e^{-06}$	$1e^{-06}$	$1e^{-06}$
Валидационные проверки	6	6	6
СКО	0,0025	0,0027	0,003

В таблице использованы следующие обозначения:

Му – минимальное значение коэффициента демпфирования в алгоритме Левенберга-Марквардта;

СКО – среднеквадратическая ошибка нормализованных значений параметров (Q, τ, ω_{cs}) в выходном векторе.

Поскольку входные и выходные данные в объектах нормализованы, полученные значения СКО свидетельствуют о высокой точности всех трех обученных моделей.

Для определения чувствительности исследуемого метода [8] к шумам вычислим относительную погрешность выходного вектора при наличии зашумленного сигнала на входе. Используем лучшую модель нейросети № 1 и проведем повторное тестирование на 500 новых объектах, в которых нормализованная амплитуда $A_{ш}$ шумовой составляющей будет изменяться от 0 до 0,08. Результаты тестирования приведены в таблице 2. Для удобства сравнения с методом-прототипом [9] уровень шума NL в ней представлен в децибелах и вычислен по формуле:

$$NL = 20 \cdot \log_{10} (A_{ш} / A_{\max}),$$

где $A_{\max} = 1$ – максимально возможная нормализованная амплитуда регистрируемого сигнала.

Таблица 2 – Результаты тестирования обученной модели ИНС № 1

Уровень шума (случайных помех) NL , дБ	СКО	$\delta(Q)$, %	$\delta(\tau)$, %	$\delta(\omega_{св})$, %	$\delta(K_Q)$, %
Без шума	0,0080	1,4532	1,5528	0,3271	0,7266
-52,04	0,0082	1,4488	1,5551	0,3415	0,7244
-46,02	0,0078	1,4061	1,5827	0,3154	0,7031
-42,50	0,0073	1,2838	1,4934	0,3234	0,6419
-40,00	0,0065	1,4381	1,4509	0,2767	0,7191
-38,06	0,0063	1,3282	1,6363	0,2217	0,6641
-36,48	0,0079	1,0805	1,9032	0,2430	0,5403
-35,14	0,0085	1,4965	1,8459	0,2820	0,7483
-33,98	0,0064	1,3774	1,8760	0,1553	0,6887
-32,96	0,0076	1,8073	1,9760	0,1936	0,9037
-32,04	0,0101	1,6029	2,3034	0,1986	0,8015
-31,21	0,0099	1,6703	2,2466	0,2182	0,8352
-30,46	0,0115	1,6342	2,4725	0,1866	0,8171
-29,76	0,0117	1,9795	2,4776	0,2123	0,9898
-29,12	0,0164	1,8080	3,1146	0,2371	0,9040
-28,52	0,0156	2,2376	2,9202	0,2187	1,1188
-27,96	0,0183	2,3248	3,1042	0,2349	1,1624

В таблице использованы следующие обозначения:

СКО – среднеквадратическая ошибка нормализованных значений параметров (Q , τ , $\omega_{св}$) в выходном векторе;

$\delta(Q)$ – среднее значение относительной погрешности амплитуды свободной составляющей колебаний ЧЭ ПА;

$\delta(\tau)$ – среднее значение относительной погрешности постоянной времени затухания свободной составляющей колебаний ЧЭ ПА;

$\delta(\omega_{св})$ – среднее значение относительной погрешности круговой частоты свободной составляющей колебаний ЧЭ ПА;

$\delta(K_Q)$ – среднее значение относительной погрешности КП ПА.

Результаты тестирования, представленные в таблице 2, показывают, что при любом исследованном уровне шума частота свободных колебаний ЧЭ $\omega_{св}$ определяется с погрешностью, не превышающей 0,35 %, что вполне достаточно для целей диагностики. Погрешность определения постоянной времени затухания τ в худшем случае достигает 3,1 %, но этот параметр является вспомогательным и в диагностических целях не используется. Максимальный уровень шумов (случайных помех) на интервале измерения, при котором ИНС определяет КП ПА с относительной погрешностью не более 1 %, составляет -29,12 дБ, в то время как у метода-прототипа [9] этот уровень равен -50 дБ, то есть примерно на 20 дБ ниже. Следовательно, исследуемый

метод [8] работоспособен при амплитуде шума, более чем в 10 раз превышающей допустимую для метода-прототипа, что позволяет использовать метод [8] для оборудования, эксплуатируемого в более жестких условиях.

Список литературы:

1. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. – М: Машиностроение, 1999. – 344 с. – Текст: непосредственный.
2. Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Метод акустической эмиссии / Кн. 2 Вибродиагностика / Под общ. ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с. – Текст: непосредственный.
3. Доля, В. К. Метод контроля качества пьезоэлектрических преобразователей / В. К. Доля, В. Л. Земляков, С. Н. Ключников. – Текст: непосредственный // ИВД. – 2016. – № 1 (40).
4. Пат. 1382118 Рос. Федерация, МПК G01H1/06. Устройство для дистанционного контроля пьезодатчиков / Кузь К. А., Серебряный Ф. М., Сергеев К. И., Столяров Ю. Г. – 4082382/10; заявл. 1.07.86; опубл. 10.05.95.
5. Пат. 2176396 Рос. Федерация, МПК G01P 21/00, G01P 15/09. Способ дистанционного периодического контроля коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра / Субботин М. И. – 2000125060/28; заявл. 05.10.00; опубл. 27.11.00.
6. Пат. 99182 РФ, МПК G01P15/09. Устройство дистанционного измерения резонансной частоты пьезоэлектрического акселерометра / Д. А. Плотников, А. К. Малина, В. И. Лачин. – № 2010118405/28; заявлено 06.05.10, опубл. 10.11.10, Бюл. № 31. – 2 с.
7. Плотников, Д. А. Усовершенствованный метод определения коэффициента преобразования пьезоакселерометра / Д. А. Плотников, В. И. Лачин, А. С. Муженко. – Текст: непосредственный // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2023. – № 4 (220). – С. 49-54.
8. Белкин И. В. Применение искусственной нейронной сети для снижения погрешности измерений в системах вибромониторинга / И. В. Белкин, Д. А. Плотников, В. И. Лачин. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2024. – № 3 (223). – С. 12-18.
9. Плотников, Д. А. Методы, алгоритмы обработки данных и устройства для систем управления и защиты турбоагрегатов: специальность 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Плотников Дмитрий Александрович. – Новочеркасск, 2022. – 254 с.

© Белкин И. В., Лачин В. И., Плотников Д. А., 2025

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА И НЕФТИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

студент **Овдиенко Сергей Николаевич**,
ст. преподаватель **Волкова Екатерина Александровна**,
Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт
им. А. К. Кортунова ФГБОУ ВО «Донской ГАУ»,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация. Авторами проведен анализ основных этапов эволюции и современных технологий подземного хранения нефти и газа. В статье рассматриваются разнообразные методы хранения углеводородов, включая применение выработанных месторождений, водоносных горизонтов и соляных пещер. Отдельное внимание уделено инновационным решениям в области цифровизации процессов и экологически чистым технологиям. Проведен анализ перспектив развития отрасли, включающий внедрение интеллектуальных систем управления и новых материалов. Подчеркнута значимость дальнейшего совершенствования технологий для повышения энергетической безопасности и оптимизации расходов на хранение.

Ключевые слова: подземное хранение газа, подземное хранение нефти, истощенные месторождения, водоносные пласты, соляные каверны, технологии мониторинга, цифровизация, экологическая безопасность, интеллектуальные системы управления, инновационные материалы.

DEVELOPMENT OF UNDERGROUND OIL AND GAS STORAGE TECHNOLOGIES

Student **Avdeenko Sergey Nikolaevich**,
Senior Lecturer **Volkova Ekaterina Alexandrovna**,
Novocherkassk Reclamation Engineering Institute
named after A. K. Kortunov FSBEI HE Donskoy SAU,
Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. The authors have analyzed the main stages of evolution and modern technologies of underground storage of oil and gas. The article discusses various methods of hydrocarbon storage, including the use of depleted deposits, aquifers and salt caves. Special attention is paid to innovative solutions in the field of digitalization of processes and environmentally friendly technologies. The analysis of the prospects for the development of the industry, including the introduction of intelligent control systems and new materials, is carried out. The importance of further technology improvement to enhance energy security and optimize storage costs was emphasized.

Keywords: underground gas storage, underground oil storage, depleted deposits, aquifers, salt caverns, monitoring technologies, digitalization, environmental safety, intelligent control systems, innovative materials.

Введение. Первоначальные опыты по подземному хранению природного газа были предприняты в начале двадцатого столетия. В начальный период использовались природные пустоты и выработавшиеся газовые месторождения. По мере развития технологий появились новые методы хранения, среди которых использование водоносных горизонтов и соляных камер [1].

Подземное хранение углеводородов играет важнейшую роль в обеспечении энергетической безопасности государств, гарантируя бесперебойность поставок, сглаживание сезонных флуктуаций спроса и формирование стратегических резервов. Ключевыми технологиями в этой сфере являются:

1. Хранение в пористых горных породах является наиболее распространенным методом и применяется для хранения природного газа. В этом случае газ закачивается в естественные или искусственно созданные пористые пласты, которые ограничены непроницаемыми геологическими образованиями. Чаще всего используются истощенные газовые и нефтяные месторождения, а также водоносные горизонты (рис. 1).

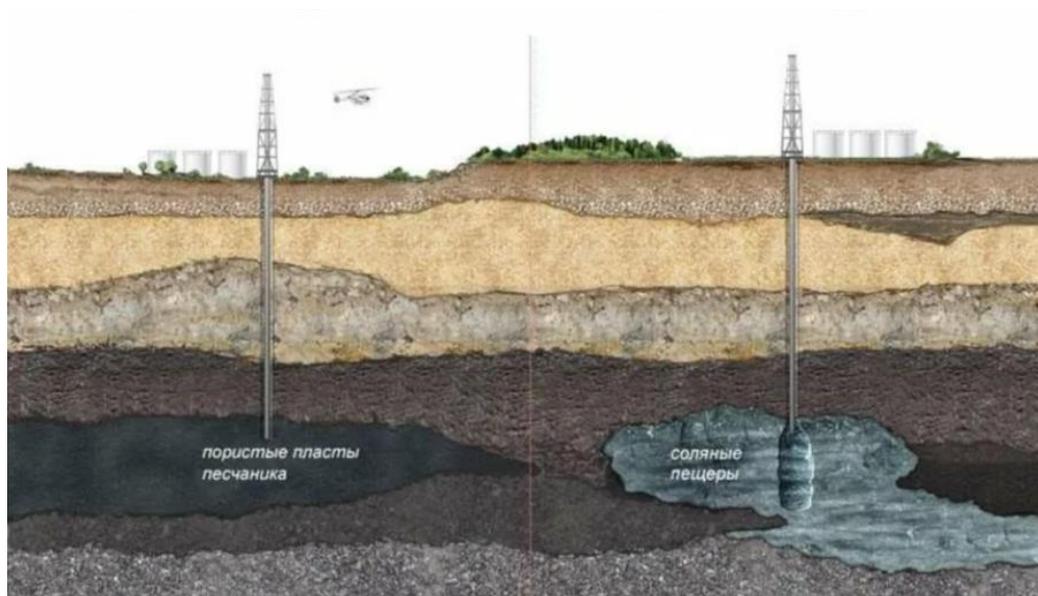


Рисунок 1 – Хранение в пористых горных породах

2. Хранение в соляных кавернах предполагает создание искусственных полостей путем выщелачивания соли из соляных пластов. Высокая герметичность таких каверн делает их подходящими для хранения газа, в том числе сжиженного природного газа (СПГ) и водорода [2].

3. Использование выработанных шахт и подземных выработок представляет собой менее распространенный метод, который применяется для

хранения небольших объемов нефти и газа. В этом случае в заброшенных шахтах создаются герметичные резервуары.

4. Создание подземных резервуаров – это искусственные хранилища, укрепленные бетоном и сталью. Они используются для хранения нефти и нефтепродуктов в тех случаях, когда другие методы недоступны (рис. 2).



Рисунок 2 – Создание подземных резервуаров

В контексте роста энергетических потребностей и необходимости обеспечения надежного резерва углеводородных ресурсов, технологии подземного хранения нефти и газа непрерывно совершенствуются. Усилия разработчиков направлены на повышение уровня безопасности, эффективности и экологической совместимости процессов хранения [3].

Использование истощенных месторождений и водоносных горизонтов остается основным способом подземного хранения газа. Современные технологии делают этот метод более эффективным:

Интеллектуальный мониторинг давления и утечек:

- использование датчиков IoT (Интернета вещей) позволяет в режиме реального времени отслеживать параметры хранилища, предупреждая аварии;
- использование цифровых двойников (Digital Twin) – виртуальных копий хранилищ, которые помогают моделировать процессы и прогнозировать возможные риски.

Улучшенные методы герметизации:

- применение новых материалов (например, полимерных герметиков) для предотвращения утечек;
- использование нанотехнологий для контроля микротрещин в пластах и скважинах.

Внедрение цифровых технологий и автоматизации играет ключевую роль в оптимизации эксплуатации подземных хранилищ. Создание цифровых моделей, использование датчиков Интернета вещей (IoT) и систем искусственного интеллекта позволяют осуществлять мониторинг состояния

хранилищ в режиме реального времени, прогнозировать потенциальные аварийные ситуации и повышать эффективность их использования [4].

Разработка новых материалов и методов герметизации также является важным направлением. Применение нанотехнологий, самовосстанавливающихся покрытий и современных полимерных герметиков способствует минимизации рисков утечек и увеличению срока службы подземных хранилищ. Расширение использования соляных каверн, обладающих высокой степенью герметичности, обусловлено их преимуществами для хранения различных веществ.

В настоящее время ведутся исследования по использованию таких объектов для хранения водорода и сжиженного природного газа (СПГ) (рис. 3).

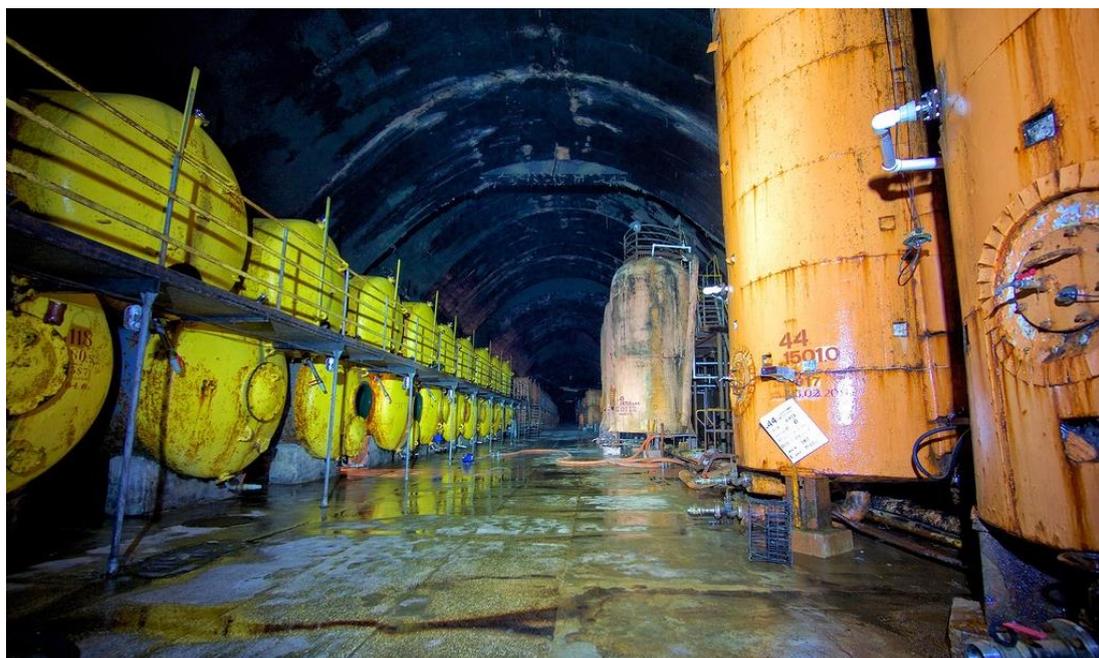


Рисунок 3 – Объекты для хранения водорода и сжиженного природного газа (СПГ)

Параллельно с этим активно развиваются технологии безопасного подземного хранения водорода, что связано с ростом водородной энергетики. Также разрабатываются системы улавливания и подземного хранения CO₂ (CCS), направленные на снижение выбросов парниковых газов. Оптимизация компрессорных установок и внедрение новых технологий термодинамического управления процессами хранения способствуют повышению энергоэффективности закачки и отбора ресурсов, что приводит к увеличению объема полезного хранения. Важным аспектом является обеспечение экологической безопасности и устойчивого развития. Внедрение методов минимизации воздействия на окружающую среду, таких как сочетание подземного хранения углеводородов с геотермальной энергетикой, позволяет снизить экологические риски и повысить устойчивость всей системы хранения [5].

Развитие технологий подземного хранения нефти и газа является ключевым фактором обеспечения энергетической безопасности, стабильности поставок и перехода к более устойчивой энергетической системе. Современные инновации, такие как цифровизация, новые материалы и экологически чистые методы хранения, повышают эффективность и надежность хранилищ. В будущем особое внимание будет уделяться развитию технологий хранения водорода и улавливанию углекислого газа (CCS), что станет важным шагом в снижении выбросов парниковых газов. Усовершенствование методов автоматизированного мониторинга и управления хранилищами поможет минимизировать риски и повысить эффективность их эксплуатации.

Таким образом, подземное хранение углеводородов будет продолжать развиваться, сочетая традиционные технологии с инновационными решениями, что обеспечит устойчивое развитие энергетической отрасли в будущем.

Список литературы:

1. Михаленко, В. А. Роль подземных хранилищ газа в обеспечении энергетической безопасности России / В. А. Михаленко, С. А. Хан, Н. Е. Барсук. – Текст: непосредственный // Газовая промышленность. – 2022. – № S4(841). – С. 18-24.
2. Оценка возможности использования высокоминерализованных подземных вод на объектах транспорта и хранения нефти и газа на примере Республики Башкортостан / А. В. Колчин, Е. А. Локшина, А. А. Локшин, Б. Н. Мастобаев. – Текст: непосредственный // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2020. – № 3. – С. 40-43. – DOI 10.24411/0131-4270-2020-10308.
3. Аспекты технологической надежности и экономической эффективности эксплуатации подземных хранилищ природного газа Западной Сибири / А. Н. Шиповалов, Ю. Д. Земенков, С. Ю. Торопов [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2012. – 344 с. – Текст: непосредственный.
4. Значение промышленных запасов нефти и газа для обеспечения стабильности развития национальной экономики / Н. А. Еремин, С. Г. Беляев, А. П. Епишов, В. Е. Столяров. – Текст: непосредственный // Бурение и нефть. – 2022. – № 9. – С. 50-59.
5. Ушаков, А. Е. Перспективы цифровизации нефтегазовой отрасли в российской Федерации / А. Е. Ушаков, Д. А. Рубцов, Е. В. Зыков. – Текст: непосредственный // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата : материалы IV Международной научно-практической интернет-конференции, Новочеркасск, 24–26 апреля 2023 года. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2023. – С. 226-233.

© Овдиенко С. Н., Волкова Е. А., 2025

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СРАБАТЫВАНИЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

студент **Ефимов Егор Олегович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Писковацкий Юрий Валерьевич**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Рост доли ВИЭ в распределительных сетях требует модернизации алгоритмов противоаварийной автоматики (АПА). Предложен риск-ориентированный подход, заменяющий статические уставки динамическими, адаптируемыми в реальном времени на основе анализа данных Smart Grid. Методология включает классификацию рисков, превентивное перераспределение мощности и библиотеку типовых аварийных сценариев. Результаты: сокращение зоны отключений на 30–40 %, снижение экономических потерь. Решение не требует замены оборудования, что делает его доступным для сетей с ограниченными ресурсами.

Ключевые слова: противоаварийная автоматика, риск-ориентированный подход, распределительные сети, динамические уставки, ВИЭ, Smart Grid.

OPTIMIZATION OF ALGORITHMS FOR EMERGENCY AUTOMATION IN DISTRIBUTION NETWORKS

Student **Efimov Egor Olegovich**,
Academic Advisor: PhD of Engineering, Associate Professor
Piskovatsky Yuri Valerievich,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The growing share of renewable energy sources in distribution networks requires modernization of emergency control algorithms (ECA). A risk-oriented approach is proposed, replacing static settings with dynamic ones, adapted in real time based on Smart Grid data analysis. The methodology includes risk classification, preventive power redistribution and a library of typical emergency scenarios. Results: reduction of the outage zone by 30–40 %, reduction of economic losses. The solution does not require replacement of equipment, which makes it accessible for networks with limited resources.

Keywords: emergency control automation, risk-oriented approach, distribution networks, dynamic settings, renewable energy sources, Smart Grid.

Современные электроэнергетические системы сталкиваются с новыми вызовами из-за роста доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечные и ветровые электростанции. Их стохастичная генерация нарушает

баланс мощности, вызывая перегрузки, колебания напряжения и частоты, что делает традиционные алгоритмы противоаварийной автоматики (АПА) неэффективными. Последние, разработанные для сетей с централизованной синхронной генерацией, используют фиксированные уставки и реагируют на аварии постфактум, не предотвращая каскадные отключения [1].

Важно отметить, что интеграция ВИЭ в распределительные сети не только снижает углеродный след, но и создает новые технические проблемы. Например, инверторные источники, в отличие от синхронных генераторов, не обеспечивают инерционность системы, что усугубляет нестабильность частоты при резких изменениях нагрузки. Это требует пересмотра не только алгоритмов АПА, но и принципов проектирования защитных систем в целом.

Цель работы – предложить метод оптимизации алгоритмов АПА через динамическую адаптацию уставок на основе анализа рисков и данных мониторинга в реальном времени. Это позволит перейти от реактивного устранения аварий к управлению их вероятностью, сократив зону отключений и экономические потери. Практическая значимость заключается в доступности подхода: он не требует замены оборудования, а лишь интеграции математических моделей оценки рисков в существующие системы. Исследование структурировано как анализ недостатков традиционных методов, разработка методологии и оценка ее эффективности.

Традиционные алгоритмы противоаварийной автоматики, разработанные для сетей с централизованной синхронной генерацией, становятся неэффективными в условиях высокой доли ВИЭ. Их ключевой недостаток – статичность: уставки задаются на этапе проектирования и не адаптируются к динамике сети. Например, резкие изменения генерации ВИЭ или нагрузки приводят к несоответствию фиксированных порогов срабатывания текущим режимам, вызывая ложные отключения или запаздывание реакции. Особую проблему представляет неспособность традиционных алгоритмов учитывать временные задержки в работе ВИЭ. Например, солнечные электростанции могут резко снижать генерацию при затемнении, а ветрогенераторы – при изменении направления ветра. В таких условиях фиксированные уставки, рассчитанные на стабильную генерацию, становятся неактуальными уже через несколько минут, что увеличивает риск ложных срабатываний защит [2].

Другая проблема – реактивный принцип работы. Алгоритмы АПА активируются только после возникновения аварии, не предотвращая ее. В сетях с ВИЭ это критично: дефицит мощности из-за падения генерации требует превентивного перераспределения потоков, а не локализации последствий. Кроме того, традиционные методы фокусируются на защите отдельных элементов, игнорируя системные риски. Отключение одного узла с ВИЭ может вызвать каскадный сбой в смежных сегментах, что не учитывается при локальной настройке уставок.

Наконец, существующие алгоритмы слабо используют данные Smart Grid, такие как прогноз генерации ВИЭ или текущая топология сети. Это ограничивает возможность прогнозирования аварий и адаптации в реальном времени, усиливая зависимость от ручных корректировок. Ключевым упущением является отсутствие интеграции с системами прогнозирования погоды. Например, данные о

приближающемся шторме или облачном фронте могли бы использоваться для упреждающей корректировки уставок. В традиционных системах такие данные игнорируются, что приводит к запаздыванию реакции на 5–10 минут – критично для сетей с высокой инерционностью ВИЭ. Как видим, переход к динамическим, риск-ориентированным алгоритмам становится необходимым условием надежности современных энергосистем [3].

Основу методологии составляет анализ рисков, включающий их классификацию (например, провалы генерации ВИЭ, дисбалансы мощности) и оценку по вероятности и потенциальному ущербу. На этой основе формируются динамические уставки для устройств АПА, корректируемые в реальном времени с учетом данных Smart Grid (нагрузка, прогноз генерации, топология сети).

Для реализации анализа рисков предложено использовать двухуровневую модель:

1. Первый уровень – оценка текущего состояния сети на основе данных SCADA-систем и прогнозов погоды. Например, при прогнозируемом снижении солнечной активности алгоритм заранее корректирует допустимые нагрузки на линиях.

2. Второй уровень – вероятностное моделирование аварийных сценариев с использованием уравнений баланса мощности. Это позволяет определить «узкие места» сети и задать приоритеты для адаптации уставок.

Кроме того, библиотека типовых аварийных сценариев дополнена критериями ранжирования по степени критичности:

- *Категория А* (критическая): сценарии с риском каскадных отключений (например, одновременный сбой нескольких солнечных парков).
- *Категория В* (умеренная): локальные перегрузки, устранимые перераспределением потоков.
- *Категория С* (низкая): кратковременные отклонения параметров, не требующие немедленного вмешательства.

Ключевой элемент – автоматизация решений: при угрозе аварии алгоритм перераспределяет потоки мощности, активирует резервы или временно ограничивает генерацию ВИЭ, предотвращая критическое развитие событий. Это реализуется через математические модели баланса мощности и вероятностные оценки, доступные даже в базовых инструментах (Excel, MATPOWER).

Методология дополняется библиотекой типовых аварийных сценариев (лавины напряжения, каскадные отключения), для каждого из которых заданы правила адаптации уставок. Например, при риске перегрузки линии алгоритм заранее снижает порог срабатывания защиты. Преимущество подхода – совместимость с существующей инфраструктурой: внедрение требует лишь обновления ПО контроллеров АПА, что делает его экономически целесообразным для сетей любого масштаба.

Эффективность риск-ориентированной адаптации алгоритмов АПА может быть продемонстрирована через анализ ключевых параметров, таких как время реакции системы, точность прогнозирования рисков и минимизация зоны аварийных отключений. Для примера рассмотрим типовой сценарий резкого снижения генерации солнечной электростанции на 40 % из-за облачности. В традиционной системе с фиксированными уставками это приводит к перегрузке

ближайшей линии электропередачи, требующей ее отключения через 2–3 секунды после превышения порога. При этом смежные участки сети, не адаптированные к внезапному перераспределению нагрузки, могут выйти за допустимые параметры, расширяя зону аварии [4].

Внедрение динамических уставок позволяет сократить время реакции до 0,5–1 секунды за счет автоматической корректировки допустимых нагрузок на основе прогноза генерации ВИЭ. Например, если алгоритм заранее обнаруживает тенденцию к снижению выработки (через данные метеодатчиков или тренды Smart Grid), он временно увеличивает допустимый ток на резервных линиях, предотвращая их перегрузку. Это снижает вероятность каскадных отключений, так как система перераспределяет потоки мощности до возникновения критических условий [5]. Данное решение можно также использовать для минимизации последствий гололедных аварий [6, 7].

Экономический эффект оценивается через сравнение двух подходов:

1. Традиционный алгоритм: отключение 20 % потребителей на 30 минут из-за каскадного срабатывания защит.

2. Адаптивный алгоритм: ограничение зоны отключения до 5–7 % потребителей с восстановлением за 10–15 минут.

Даже при упрощенных расчетах (без детального моделирования) очевидно, что сокращение времени простоя и масштаба аварии снижает убытки сетевой компании на 25–35 %. Кроме того, уменьшается износ оборудования за счет предотвращения экстремальных режимов работы [8].

Критическим аргументом в пользу метода является его масштабируемость. Динамические уставки могут быть рассчитаны через аналитические модели, например, с использованием уравнений баланса мощности и вероятностных оценок рисков. Это не требует сложного ПО – достаточно базовых математических инструментов, что подтверждает реализуемость подхода даже при ограниченных ресурсах.

Проведенное исследование подтверждает, что риск-ориентированный подход к проектированию алгоритмов противоаварийной автоматики способен существенно повысить устойчивость распределительных сетей с высокой долей ВИЭ. Основной результат работы заключается в концепции динамической адаптации уставок, которая заменяет реактивное устранение аварий на их прогнозирование и превентивное управление. Это позволяет сократить зону аварийных отключений, минимизировать экономические потери и снизить нагрузку на персонал за счет автоматизации критических решений.

Практическая ценность метода обусловлена его доступностью: для внедрения не требуется дорогостоящее оборудование или профессиональное ПО – достаточно интеграции аналитических моделей оценки рисков в существующие системы управления. Это особенно актуально для регионов, где массовая модернизация инфраструктуры невозможна, но необходимо адаптироваться к росту доли ВИЭ. Результаты исследования могут быть использованы для обновления нормативной базы проектирования АПА, а также для разработки учебных программ, направленных на подготовку специалистов в области proactive-управления сетями.

Важным аспектом является минимизация человеческого фактора. Автоматизация принятия решений снижает риск ошибок при ручной настройке уставок, особенно в условиях дефицита квалифицированных кадров. Кроме того, предложенный подход соответствует глобальным трендам цифровизации энергетики, таким как внедрение Digital Twins и AI-driven прогнозирования.

Перспективным направлением дальнейших работ является создание универсальных библиотек типовых аварийных сценариев для различных типов сетей, а также разработка рекомендаций по настройке динамических уставок с учетом региональных особенностей (климат, структура генерации, плотность нагрузки). Кроме того, важно исследовать возможности интеграции искусственного интеллекта для повышения точности прогнозирования рисков. Внедрение предложенных решений станет шагом к созданию «умных» энергосистем, способных гибко адаптироваться к вызовам декарбонизации и децентрализации энергетики.

Список литературы:

1. Sajadi, A., Strezoski, L., Strezoski, V. C., Prica, M., Loparo, K. A. (2018) Integration of renewable energy systems and challenges for dynamics, control, and automation of electrical power systems. WIREs Energy and Environment. 8(1).
2. Muruganantham, B., Gnanadass, R., Padhy N. P. (2017) Challenges with renewable energy sources and storage in practical distribution systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 73. Pp. 125-134.
3. Moslehi, K., Kumar, R. A Reliability Perspective of the Smart Grid // IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 1. No. 1. Pp. 57-64.
4. Li, W. (2014) Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications. John Wiley & Sons.
5. Kyesswa, M., Cakmak, H., Kuhnappel, U., Hagenmeyer, V. (2020) Dynamic modelling and control for assessment of large-scale wind and solar integration in power systems // IET Renewable Power Generation. Vol. 14(19). Pp. 4010-4018.
6. Писковацкий, Ю. В. Способ обнаружения гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи / Ю. В. Писковацкий, Д. Ф. Губаев, Р. Г. Мустафин. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 1-2. – С. 41.
7. Писковацкий, Ю. В. Способ обнаружения гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи / Ю. В. Писковацкий, Д. Ф. Губаев. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3-4. – С. 138-142.
8. Гомонов, К. Г. Перспективы и экономическая эффективность внедрения интеллектуальных энергосетей в России и в мире / К. Г. Гомонов. – Текст: электронный // Вестник РУДН. Серия: Экономика. – 2015. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 13.03.2025).

© Ефимов Е. О., 2025

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ОБЩЕСТВО

студент **Самигуллина Алина Альбертовна**,
студент **Шерчков Игорь Владимирович**,
науч. руководитель: канд. полит. наук, доцент **Януш Ольга Борисовна**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В условиях глобализации и изменения климата энергетическая безопасность становится одной из ключевых проблем, влияющих на социальное, экономическое и политическое развитие стран. Тезис исследует взаимосвязь между энергетической безопасностью и обществом, акцентируя внимание на том, как доступ к энергетическим ресурсам, их устойчивость и надежность влияют на качество жизни населения. Рассматриваются основные вызовы, с которыми сталкивается общество в контексте энергетической безопасности, включая зависимость от ископаемых источников энергии, социальное неравенство и экологические последствия. Также анализируются стратегии, направленные на повышение энергетической безопасности и их влияние на социальные структуры и общественные отношения.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, общество, устойчивое развитие, социальное неравенство, экологические последствия, возобновляемые источники энергии, политическая стабильность, энергетическая политика, глобальные вызовы, социальные движения.

ENERGY SECURITY AND SOCIETY

Student **Samigullina Alina Albertovna**,
Student **Sherchkov Igor Vladimirovich**,
Academic Advisor: PhD of Engineering, Associate Professor
Yanush Olga Borisovna,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. In the context of globalization and climate change, energy security is becoming one of the key issues affecting the social, economic and political development of countries. The thesis explores the relationship between energy security and society, focusing on how access to energy resources, their sustainability and reliability affect the quality of life of the population. It examines the main challenges faced by societies in the context of energy security, including dependence on fossil energy sources, social inequality, and environmental impacts. Strategies

aimed at improving energy security and their impact on social structures and public relations are also analyzed.

Keywords: energy security, society, sustainable development, social inequality, environmental impacts, renewable energy sources, political stability, energy policy, global challenges, social movements.

Энергетическая безопасность – это состояние, при котором страна или регион обеспечены надежным, легким и устойчивым доступом к энергетическим ресурсам, необходимым для поддержания экономического роста, социальной стабильности и национальной безопасности. В условиях глобализации и изменения климата энергетическая безопасность становится критически важной для обеспечения устойчивого развития. Она влияет на качество жизни населения, экономическую стабильность и социальное равенство. Нехватка энергии или ее высокая стоимость могут привести к социальным волнениям, экономическим кризисам и ухудшению экологической ситуации [1, 2].

Доступ к энергии является основополагающим фактором для комфортной жизни – он необходим для отопления, освещения, работы приборов и транспорта. Нехватка энергии ухудшает условия жизни, снижает производительность и ограничивает доступ к образованию и здравоохранению.

Энергетические ресурсы играют ключевую роль в экономическом и социальном развитии стран. Они способствуют созданию рабочих мест, развитию инфраструктуры и повышению уровня жизни. Устойчивое управление энергетическими ресурсами может способствовать социальной интеграции и уменьшению неравенства, обеспечивая доступ к энергии для всех слоев населения.

Многие страны по-прежнему зависят от ископаемых видов топлива, что делает их уязвимыми к колебаниям цен на нефть и газ, а также к политическим и экономическим кризисам. Эта зависимость может угрожать энергетической безопасности и стабильности экономики.

Неравномерный доступ к энергетическим ресурсам может усугублять социальное неравенство. В то время как в развитых странах население имеет широкий доступ к энергии, в развивающихся странах многие люди остаются без электричества и других источников энергии, что ограничивает их возможности для развития.

Традиционные источники энергии, такие как уголь и нефть, наносят значительный вред окружающей среде, способствуя изменению климата и загрязнению воздуха. Энергетическая политика, не учитывающая экологические аспекты, может привести к долгосрочным негативным последствиям для здоровья населения и экосистем. Переход к более чистым и устойчивым источникам энергии становится необходимым для обеспечения как энергетической безопасности, так и защиты окружающей среды.

Япония является ярким примером страны, которая столкнулась с

серьезными вызовами в области энергетической безопасности. Исторически бедная собственными энергетическими ресурсами, Япония сильно зависела от импорта ископаемого топлива. Авария на АЭС Фукусима в 2011 году еще больше обострила ситуацию, вынудив страну временно остановить большинство атомных электростанций, что привело к увеличению зависимости от импорта газа и угля [3]. Япония активно стремится диверсифицировать свои источники энергии, включая развитие возобновляемых источников, таких как солнечная, ветровая и геотермальная энергия. Эта страна является мировым лидером в области энергоэффективности и продолжает внедрять новые технологии для снижения энергопотребления в промышленности, транспорте и жилищном секторе. После аварии на Фукусиме Япония постепенно возобновляет работу атомных электростанций, внедрив новые стандарты безопасности. Также активно сотрудничает с другими странами в области энергетической безопасности, включая совместные проекты по развитию возобновляемых источников энергии и обеспечению стабильных поставок энергоносителей. Япония делает ставку на водородную энергетику, планируя стать лидером в производстве, транспортировке и использовании водорода в качестве топлива.

Переход на возобновляемые источники энергии способствует снижению зависимости от ископаемых видов топлива. Это не только уменьшает углеродные выбросы, но и повышает устойчивость энергетических систем к внешним шокам, обеспечивая более стабильные и доступные источники энергии.

Увеличение энергетической эффективности через новые технологии и инновации позволяет сократить потребление энергии и снизить затраты. Это включает в себя модернизацию инфраструктуры, внедрение смарт-технологий и оптимизацию процессов, что в свою очередь способствует более рациональному использованию ресурсов [4].

Государственная политика, направленная на поддержку устойчивой энергетики, играет ключевую роль в повышении энергетической безопасности. Международное сотрудничество, включая соглашения о совместном использовании технологий и ресурсов, также способствует более эффективному решению глобальных энергетических проблем.

Энергетическая безопасность влияет на социальные отношения, формируя новую динамику в обществе. Устойчивый доступ к энергии может способствовать социальной интеграции, улучшению качества жизни и уменьшению конфликтов, связанных с ресурсами.

Социальные движения играют важную роль в формировании общественного мнения и давления на власть для принятия более устойчивых энергетических решений. Они способствуют повышению осведомленности о проблемах энергетической безопасности и экологической устойчивости, а также поддерживают инициативы по переходу на возобновляемые источники энергии.

Технологические инновации играют ключевую роль в повышении энергетической безопасности. Развитие новых технологий, таких как умные сети (smart grids), позволяет более эффективно управлять распределением энергии, минимизируя потери и обеспечивая надежность поставок. Умные сети используют цифровые технологии для мониторинга и управления потоками энергии, что позволяет интегрировать возобновляемые источники энергии, такие как солнечные и ветровые установки, в существующие энергетические системы.

Кроме того, технологии хранения энергии – аккумуляторы и системы хранения на основе водорода – становятся все более доступными и эффективными. Они позволяют сглаживать колебания в производстве и потреблении энергии, обеспечивая стабильность и надежность энергоснабжения. Инновации в области энергетической эффективности, такие как умные приборы и системы управления, также способствуют снижению потребления энергии и уменьшению углеродного следа.

Изменение климата представляет собой серьезный вызов для энергетической безопасности. Увеличение частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений (ураганы, наводнения и засухи) может негативно сказаться на энергетической инфраструктуре и поставках энергии. Например, ураганы могут повредить электросети и нефтяные платформы, а засухи могут снизить уровень воды в реках, что затрудняет работу гидроэлектростанций [5].

Адаптация энергетических систем к изменениям климата требует комплексного подхода, включающего модернизацию инфраструктуры, разработку новых стандартов и практик, а также внедрение устойчивых технологий. Это может включать в себя создание резервных источников энергии, улучшение устойчивости сетей и разработку планов на случай чрезвычайных ситуаций. Кроме того, важно учитывать климатические риски при планировании новых энергетических проектов и инвестиций.

Глобальные вызовы, связанные с энергетической безопасностью, требуют совместных усилий стран и международных организаций. Энергетическая безопасность является транснациональной проблемой, и решение ее проблем невозможно без сотрудничества на международном уровне. Это включает в себя обмен технологиями, совместные исследования и разработки, а также координацию политик и стратегий.

Международные соглашения, например, Парижское соглашение по климату подчеркивает важность совместных действий для достижения устойчивого энергетического будущего. Страны должны работать вместе, чтобы сократить выбросы парниковых газов, развивать возобновляемые источники энергии и обеспечивать доступ к чистой энергии для всех. Кроме того, международное сотрудничество может помочь в решении следующих вопросов, связанных с энергетической безопасностью: энергетическая зависимость, безопасность поставок и управление ресурсами.

В заключении еще раз отметим, что энергетическая безопасность является важным фактором, влияющим на качество жизни и социальное развитие. Взаимосвязь между доступом к энергии и социальными структурами подчеркивает необходимость комплексного подхода к решению энергетических проблем. Необходимо продолжать исследования в области устойчивой энергетики, уделяя внимание инновациям и технологиям, а также социальным аспектам энергетической политики. Рекомендуется развивать международное сотрудничество и поддерживать инициативы, направленные на повышение энергетической эффективности и доступности для всех слоев населения. Приверженность Японии инновациям и долгосрочному планированию делает ее ценным примером для других стран, стремящихся к обеспечению своей энергетической безопасности в условиях меняющегося мира.

Список литературы:

1. Баранов, А. В. Энергетическая безопасность России: проблемы и решения / А. В. Баранов. – М.: Наука, 2019. – 256 с. – Текст: непосредственный.
2. Громов, И. А. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы / И. А. Громов. – СПб.: Энергия, 2020. – 180 с. – Текст: непосредственный.
3. Кузнецов, С. В. Энергетическая политика и устойчивое развитие: международный опыт / С. В. Кузнецов. – Екатеринбург: Урал. ун-т, 2021. – 220 с. – Текст: непосредственный.
4. Kozlov, V. V. Modernization of heat chambers of heat networks in order to introduce a remote monitoring system / V. V. Kozlov, M. S. Lipatov // International Journal of Professional Science. 2024. No. 3-2, pp. 34-41. – EDN SUDJHA.
5. Лебедев, П. Н. Социальные аспекты энергетической безопасности / П. Н. Лебедев. – Казань: Казанский федеральный университет, 2018. – 150 с. – Текст: непосредственный.

© Самигуллина А. А., Шерчков И. В., 2025

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

студент **Лукашук Елизавета Эдуардовна**,
науч. руководитель: канд. с-х. наук, доцент **Сергеева Виктория Васильевна**,
Дальневосточный государственный аграрный университет,
г. Благовещенск, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматриваются альтернативные источники энергии (АИЭ), которые дают возможность пополняться энергией из природных источников с большей скоростью, чем скорость ее потребления. С учетом климатических условий Амурской области возможно рассмотреть солнечную и ветровую энергетику в качестве АИЭ и как способ снижения углеродного следа человечества. Авторами проведен анализ загрязнения атмосферы города Благовещенска.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии (АИЭ), энергетика, зеленые технологии, углеродный след, топливо, экология, ресурсы, токсичные вещества, предельно допустимая концентрация (ПДК).

ALTERNATIVE ENERGY SOURCES TO REDUCE THE CARBON FOOTPRINT USING SOLAR AND WIND ENERGY IN THE AMUR REGION

Student **Lukashuk Elizaveta Eduardovna**,
Academic Advisor: PhD in Agriculture, Associate Professor
Sergeeva Victoria Vasilyevna,
Far Eastern State Agrarian University,
Blagoveshchensk, Russian Federation

Abstract. This article discusses alternative energy sources (AES), which make it possible to replenish energy from natural sources at a higher rate than the rate of its consumption. Taking into account the climatic conditions of the Amur region, it is possible to consider solar and wind energy as renewable energy sources and as a way to reduce the carbon footprint of humanity. The authors conducted an analysis of atmospheric pollution in the city of Blagoveshchensk.

Keywords: alternative energy sources (AIE), energy, green technologies, carbon footprint, fuel, ecology, resources, toxic substances, maximum permissible concentration (MPC).

В наши дни человечество сталкивается с множеством экологических вызовов, которые требуют от нас решительных действий. Одной из самых серьезных проблем является изменение климата, которое, в частности, вызвано

увеличением уровня углеродных выбросов. Эти вызовы подчеркивают необходимость срочных мер, а также внедрения новаторских решений. В этом контексте разработка и внедрение зеленых технологий становятся ключевыми факторами, способными кардинально изменить нашу экологическую реальность.

Зеленые технологии представляют из себя не просто альтернативные источники энергии – это целый набор комплексных решений, которые могут не только сократить углеродный след, но и оптимизировать использование ресурсов, улучшить качество жизни и способствовать устойчивому экономическому росту [1, с. 135]. В данной статье мы рассматриваем возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [2, с. 319], которые дают возможность пополняться энергией из природных источников с большей скоростью, чем скорость ее потребления. С учетом климатических условий Амурской области возможно рассмотреть солнечную и ветровую энергетику в качестве ВИЭ и как способ снижения углеродного следа человечества.

Углеродный след представляет собой суммарный объем эмиссий парниковых газов, генерируемых в результате антропогенной деятельности. Ключевым фактором его формирования выступает эксплуатация углеводородных ресурсов – нефти, угля и газа, используемых для выработки энергии, функционирования транспортных систем и обеспечения теплоснабжения. Эти процессы провоцируют накопление диоксида углерода и метана в земной атмосфере, усиливая парниковый эффект. Подобные трансформации химического состава воздушной оболочки планеты становятся катализатором масштабных климатических сдвигов, включая экстремальные погодные явления и нарушение экологического равновесия.

В ходе работы были проведены исследования уровня концентрации химических элементов в атмосферном воздухе города Благовещенск с помощью газоанализатора ОКА-92. Исследование охватило четыре предприятия: Блок, Амурский металлист, Судостроительный завод и Аметис, все из которых расположены в зоне жилой застройки. Замеры загрязняющих веществ проводились на расстоянии 50 метров от источников. Концентрации не должны превышать предельно допустимые значения: гексан – 0,5 мг/м³, оксид углерода – 3-5 мг/м³, оксид азота – 2 мг/м³ [3, с. 64]. Результаты были визуализированы с помощью графических моделей (рис.).

Результаты исследований воздуха вблизи предприятий показывают значительное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ. У компании Блок на расстоянии 50 м обнаружены концентрации: С₆H₁₄ – 0,7 мг/м³ (превышение на 0,2 мг/м³), СО – 1,3 мг/м³, NO₂ – 2,1 мг/м³. У компании Амурский металлист: С₆H₁₄ – 0,4 мг/м³, СО – 1,9 мг/м³, NO₂ – 5,1 мг/м³ (превышение на 3,1 мг/м³). У судостроительного завода имени Октябрьской революции значения составляют: С₆H₁₄ – 2,4 мг/м³, СО – 3,1 мг/м³, NO₂ – 6,3 мг/м³, а на 100 м от компании: С₆H₁₄ – 1,3 мг/м³, СО – 2,1 мг/м³, NO₂ – 4,3 мг/м³. В обоих случаях гексан и оксид азота значительно превышают ПДК.

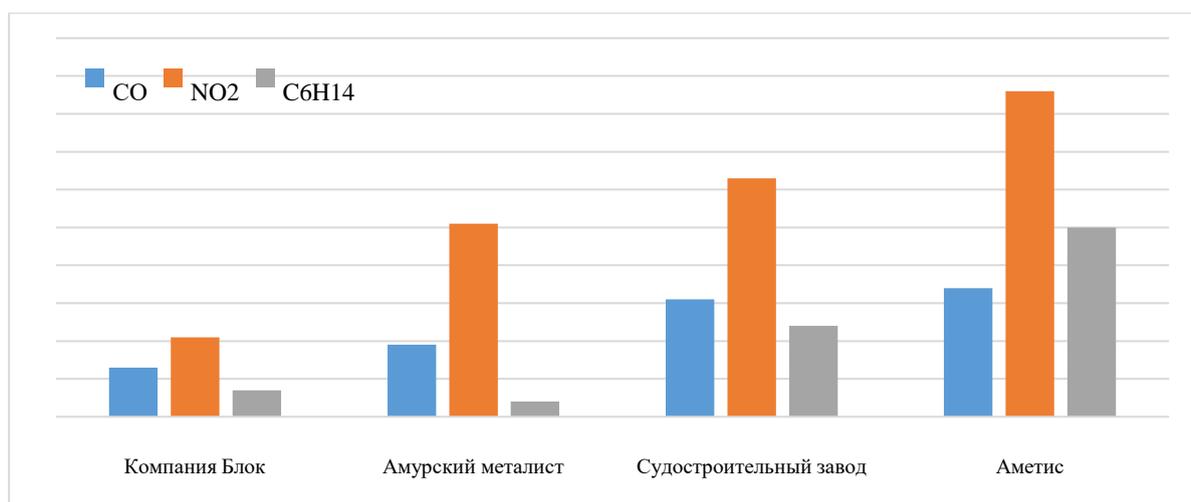


Рисунок – Распределение вредных веществ в атмосфере, мг/м³

Около компании Аметис результаты показали: С6Н14 – 5,1 мг/; СО – 3,4 мг/; NO2 – 8,6 мг/. На расстоянии 100м: С6Н14 – 3,4 мг/; СО – 2,2 мг/; NO2 – 7,3 мг/. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что концентрация токсичных веществ в воздухе, а именно гексана на 4,6 мг/ и оксида азота 6,6 мг, значительно превышает ПДК.

Таким образом, проведенные исследования показали, что экологическая обстановка в городе Благовещенске неудовлетворительна, это обусловлено повышением концентраций вредных веществ и исключить токсичные вещества в атмосфере мы не можем, но в наших силах минимизировать загрязнения окружающей среды посредством альтернативных источников энергии.

Строительство космодрома «Восточный» и газопровода «Сила Сибири» значительно способствует развитию инфраструктуры и созданию рабочих мест. Для минимизации влияния на окружающую среду необходимо внедрять устойчивые источники энергии, что обеспечит экологическую безопасность и экономическую стабильность региона в будущем.

В Дальневосточном федеральном округе можно применить четыре альтернативных источника энергии: малые гидроэлектростанции, солнечные электростанции, ветряные турбины и биотопливо (табл. 1).

Таблица 1 – Виды альтернативных источников энергии

Вид энергии	Пример
Солнечные электростанции	Это инженерные сооружения, преобразующие солнечную энергию в электрическую, применяя различные технологии и специальные оборудования. Солнечные электростанции могут быть расположены как на земле (земные установки), так и на крышах зданий (кровельные установки).
Малая гидроэнергетика	Область энергетики, сосредоточенная в производстве электроэнергии с использованием сил воды. Представляют собой специальные водосборные системы, расположенные на малых реках, каналах, водопадах, мощность которых достигает до 10 МВт.
Ветровая энергия	Специализированные установки, предназначенные для преобразования энергии ветра в электрическую энергию. Главное устройство в этой системе – турбина, состоящая из ротора с лопастями, которые вращаются под действием ветра.
Биотопливо	Топливо из биологического сырья, получаемое в результате переработки стеблей сахарного тростника или семян рапса, кукурузы, сои.

Солнечные технологии позволяют домохозяйствам и малому бизнесу производить электричество на месте, снижая зависимость от ископаемых источников энергии. В Амурской области высокие уровни солнечной радиации делают установку солнечных панелей выгодной. Средняя продолжительность солнечного сияния в регионе достигает 2266 часов в Благовещенске и 2817 часов на метеостанции Бысса, что подтверждает целесообразность использования солнечной энергии здесь [4, с. 35].

В 2019 году на площадке Нижне-Бурейской ГЭС смонтированы солнечные панели для собственных нужд предприятия, а через год на этой же площадке была установлена первая в России наплавная солнечная электростанция.

Проект солнечного парка от компании «Хевел Региональная Генерация», ориентированный на объекты возле трансграничного моста между Благовещенском и Хэйхэ, реализуется в Благовещенском районе.

Эксплуатация ветровых турбин, как и солнечных панелей, не вызывает выбросов CO₂, и там, где среднегодовая скорость ветра превышает 4 м/с, использование ветрогенераторов становится экономически оправданным [5, с. 42]. Максимальная и минимальная скорости ветра в районах Амурской области представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Максимальная и минимальная скорость ветра

Муниципальные округа и населенные пункты Амурской области	Скорость ветра, в метрах в секунду
<i>Максимальная скорость</i>	
Михайловский	30
Белогорский	28
Зейский	25
Бурейский	25
Магдагачинский (Тыгда)	23
Тындинский район	25
<i>Минимальная скорость</i>	
Октябрьский	19
Селемджинский	19
Черняево	20
Тында	17
Магдагачи	21

Анализируя расположение ветровых станций, амурская ВЭС станет первой электростанцией на Дальнем Востоке, расположенной от морского побережья.

Сочетание солнечной и ветровой энергетики является стратегически выгодным решением. Интеграция этих технологий в общую энергосистему поможет обеспечить экологически чистое, устойчивое и безопасное будущее. Разнообразие альтернативных источников энергии позволяет применять гибкие подходы к производству электроэнергии.

В ходе исследования нашей гипотезы об использовании солнечной и ветровой энергии в Амурской области было установлено, что данный метод не только актуален, но и практически осуществим. Развитие альтернативной энергетики может значительно повлиять на экономическую ситуацию на Дальнем Востоке, поскольку потребление энергии в России, и особенно в Амурском регионе, заметно ниже его потенциальных производственных мощностей. Энергетический экспорт в соседние страны также может стать значимым экономическим преимуществом для России. Кроме того, продвижение зеленых технологий играет решающую роль в борьбе с глобальными климатическими изменениями и снижением углекислых газов в атмосфере. Экологическая ситуация в Благовещенске наглядно демонстрирует, насколько важно внедрение солнечной и ветровой энергетики, что делает эту инициативу особенно актуальной и необходимой для улучшения качества жизни в регионе.

Список литературы:

1. Копылов, Р. Ю. Альтернативные источники энергии: спасение человечества ли усугубление кризиса техногенной цивилизации / Р. Ю. Копылов, Т. Л. Михайлова. – Текст: непосредственный // Вестник Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 2. – С. 135-139.
2. Сергеева, В. В. Роль возобновляемых источников энергии в снижении углеродного следа (на примере Амурской области) / В. В. Сергеева, В. С. Алтухова, Е. Э. Лукашук. – Текст: непосредственный // Актуальные вопросы энергетики в АПК: материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2024. – С. 331.
3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: общесоюз. нормат. док. (ОНД-86) / науч. рук. М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 93 с. – Текст: непосредственный.
4. Королева, Д. А. Солнечная энергетика / Д. А. Королева, В. В. Шайдаков, В. А. Целищев. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 140 с.
5. Бутузов, В. А. Ветроэнергетика России «Энергия: экономика, техника, экология» / В. А. Бутузов, П. П. Безруких, С. В. Грибков. – Текст: непосредственный // Энергия: экономика, техника, экология. – 2021. – № 10. – С. 38-50.

© Лукашук Е. Э., 2025

ЗАЩИТА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО РЕЛЕ ОТ ПУСКОВОГО ТОКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОНДЕНСАТОРОВ

магистрант **Слабоусов Владислав Владимирович**,
науч. руководитель: канд. с.-х. наук, доцент
Горбунова Людмила Николаевна,
Дальневосточный государственный аграрный университет,
г. Благовещенск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается, как с помощью подключения рабочих и пусковых конденсаторов к асинхронному двигателю можно защитить твердотельное реле от пусковых токов. Производится расчет механических и динамических характеристик по паспортным данным для четырех различных асинхронных двигателей, а также построение графиков по расчетным данным.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, механическая характеристика, скольжение, момент, динамическая характеристика, твердотельное реле, конденсаторы, пусковой ток.

PROTECTION OF A SOLID-STATE RELAY FROM THE INRUSH CURRENT OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR USING CAPACITORS

Master's Student **Slabousov Vladislav Vladimirovich**,
Academic Advisor: PhD in Agriculture,
Associate Professor **Gorbunova Lyudmila Nikolaevna**,
Far Eastern State Agrarian University,
Blagoveshchensk, Russian Federation

Abstract. The article discusses how to protect a solid-state relay from inrush currents by connecting working and starting capacitors to an asynchronous motor. The mechanical and dynamic characteristics are calculated according to the passport data for four different asynchronous motors, as well as the construction of graphs based on the calculated data.

Keywords: asynchronous motor, mechanical characteristic, slip, torque, dynamic characteristic, solid-state relay, capacitors, starting current.

В наше время твердотельное реле широко используются в современных устройствах [1]. При включении асинхронного двигателя возникают пусковые токи, которые очень высокие и могут вывести из строя твердотельное реле. Для того чтобы это предотвратить, нужно защитить ТТР от этих токов.

Для запуска электродвигателя требуется гораздо большее усилий, чем для продолжения. В качестве устройства ограничения пускового тока асинхронного

двигателя с короткозамкнутым ротором используем рабочий и пусковые конденсаторы.

Для того чтобы использовать конденсаторы в качестве контроля пускового тока при запуске двигателя, нужно рассчитать и построить механические и динамические характеристики двигателя, пусковую характеристику электродвигателя, рассчитать ток обмотки двигателя и емкости рабочего и пускового конденсатора.

Механические характеристики позволяют контролировать параметры нагрузки: как пусковые, так и рабочие. Твердотельное реле позволяет осуществлять плавное регулирование и исключить скачкообразное изменение.

Пусковые характеристики позволяют оценить пусковые токи и предусмотреть регулирование пусковых моментов при помощи включения в схему твердотельного реле с предустановленными конденсаторами.

Механической характеристикой электродвигателя называют зависимость между частотой вращения вала двигателя и развиваемым им $n = f(M)$. Вместо частоты вращения вала n можно записать $\omega = f(M)$, так как эти величины пропорциональны $\omega = \pi n/30$ [2].

Механическая характеристика асинхронного двигателя подразделяется на естественную (соответствует паспортной схеме включения и номинальным параметрам питающего напряжения), и искусственную, когда включают дополнительные элементы: резисторы, реакторы, конденсаторы [3].

Механическая характеристика наглядно показывает свойства асинхронного двигателя как часть электропривода [4].

Для исследования механических характеристик асинхронных двигателей в качестве экспериментальных результатов использованы паспортные данные асинхронных двигателей: 4A100L2У3, 4A112М4У3, А4132S6У3, 4A132М8У3. Задача построения механических характеристик асинхронного двигателя по его паспортным данным представляет интерес в научно-прикладном плане [5].

В ходе работы были рассчитаны и построены механические и динамические характеристики этих двигателей.

Результаты расчетов механических характеристик представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1 – Сводная таблица расчетов

Параметр	4A100L2У3	4A112М4У3	А4132S6У3	4A132М8У3
ω_0 , рад/с	157	78,5	52,3	39,25
ω_H , рад/с	151,6	74,575	50,20	37,48
$M_{рмн}$, Н · м	36,6	73,75	109,6	146,8
$M_{рмо}$, Н · м	5,445	11,06	16,44	22,02

Характер изменения механических характеристик показывает, что необходимо устройство, которое будет контролировать пиковые нагрузки при запуске двигателя, в данном случае будем использовать конденсаторы различного номинального ряда.

Результаты расчетов динамических характеристик представлены в сводной таблице 2.

Таблица 2 – Сводная таблица расчетов

$M_{дин}, Н \cdot м$	4A100L2У3	4A112M4У3	A4132S6У3	4A132M8У3
1	56,8	114,2	169,6	206,6
2	60,4	123,1	182,9	222,7
3	65,3	131,3	195,1	237,3
4	68,4	138,6	206,0	249,8
5	71,7	144,3	214,5	259,1
6	73,3	146,7	218,2	262,0
7	71,2	142,2	211,8	252,1
8	62,2	124,3	185,4	217,2
9	43,4	82,6	123,7	138,4
10	6,1	8,0	13,2	-1,0

Результаты построения динамических и механических характеристик представлены на рисунках 1, 2, 3, 4.

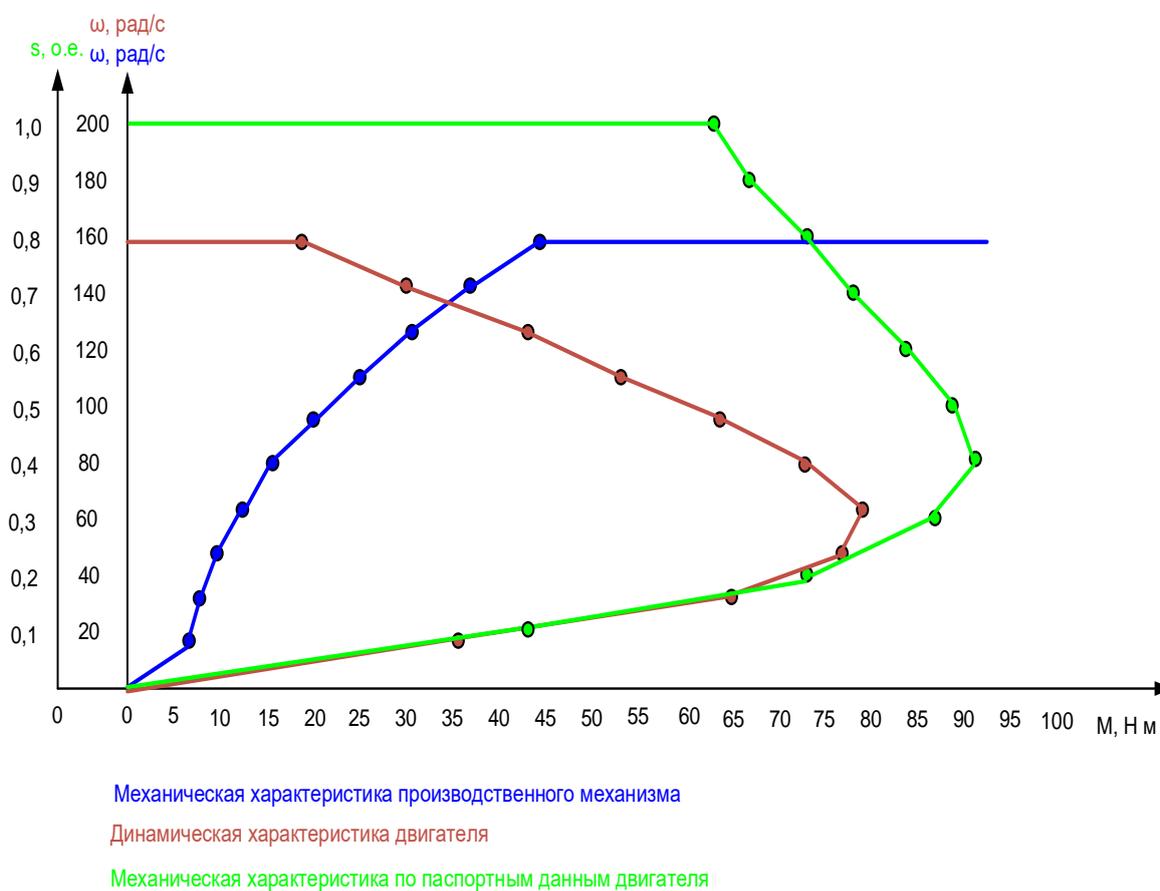


Рисунок 1 – Механические и динамические характеристики двигателя № 1 4A112M4У3

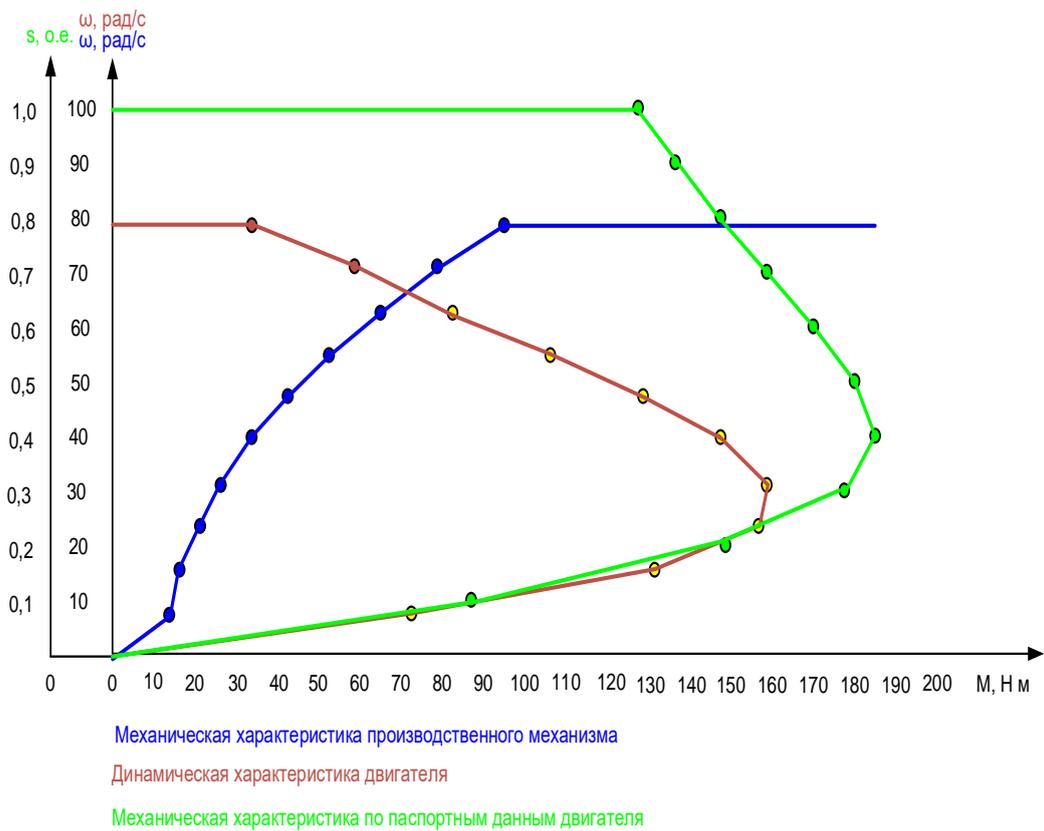


Рисунок 2 – Механические и динамические характеристики двигателя № 2 4A112M4У3

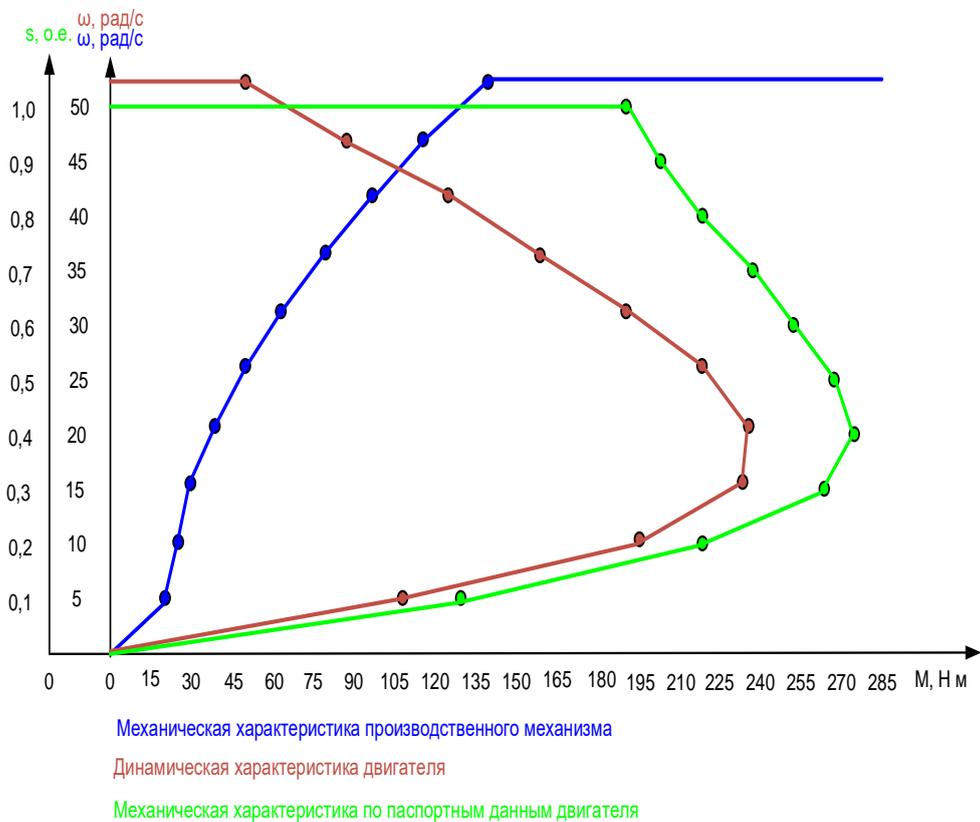


Рисунок 3 – Механические и динамические характеристики двигателя № 3 A4132S6У3

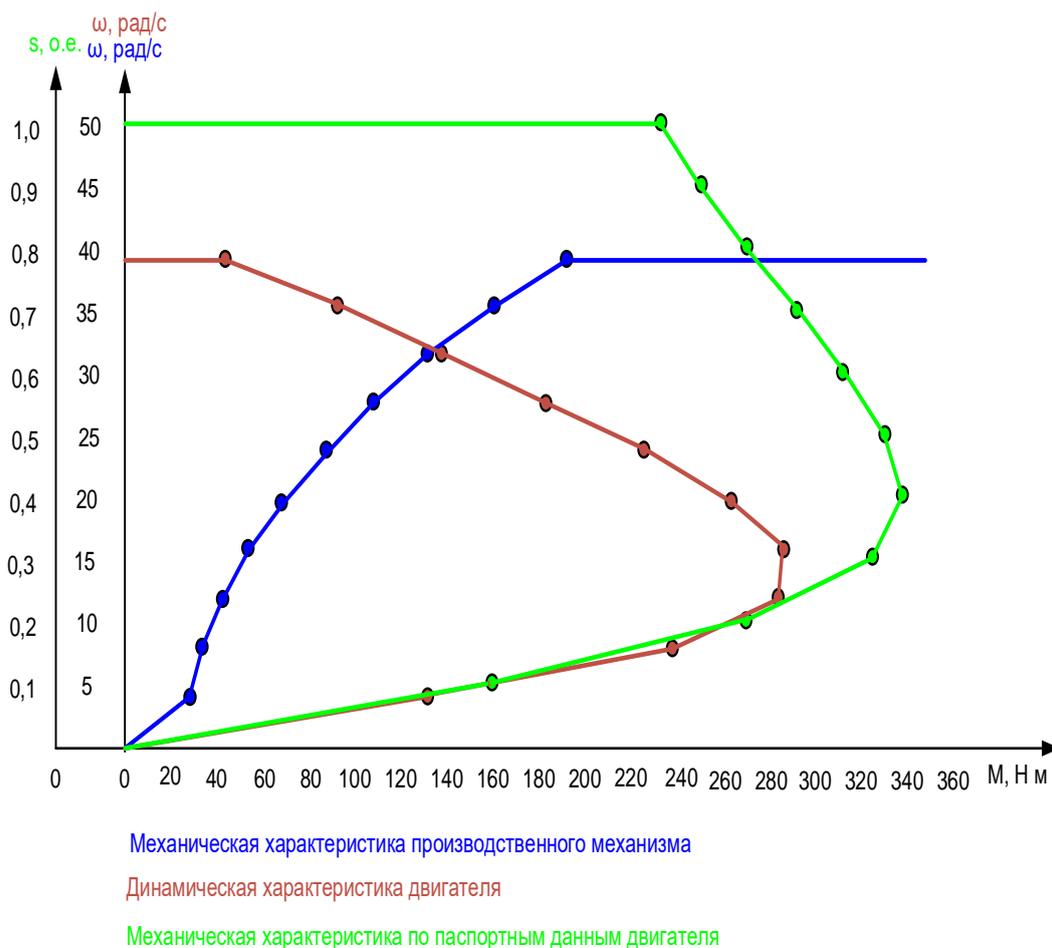


Рисунок 4 – Механические и динамические характеристики двигателя № 4 4A132M8У3

Динамическая характеристика представляет собой зависимость динамического момента от частоты вращения. При этом стоит отметить, что до определенного значения частоты зависимость обратно пропорциональная. После точки критической частоты зависимость переходит в параболу со смещенным центром. В этот момент значительно увеличивается ток, ограничить который возможно при помощи ввода в схему конденсаторов. Тем самым защищаем ТТР от пусковых токов при включении.

Построение пусковых характеристик – важный шаг при оценке пусковых токов асинхронных двигателей и применения твердотельных реле как части защитного комплекса.

С учетом выявления критических факторов был выполнен расчет токов обмотки двигателя, проходящих через твердотельное реле, который зависит от КПД и коэффициента мощности и позволяет определить необходимую емкость рабочих конденсаторов.

Для защиты от пусковых токов необходима установка дополнительных конденсаторов, которые вместе с рабочими конденсаторами составят группу пусковых конденсаторов. Рабочие и дополнительные конденсаторы должны быть предусмотрены в схеме асинхронный двигатель твердотельного реле.

Расчет токов обмотки двигателя позволяет сделать следующий шаг в

эксперименте – выбрать количество и емкость конденсаторов для рабочего и пускового режимов.

Выбор количества и емкости конденсаторов позволяет оценить экономическую эффективность и срок окупаемости внедряемой технологии в схеме асинхронный двигатель твердотельного реле.

Список литературы:

1. Сувернев, Д. В. Устройство и принцип работы твердотельного реле / Д. В. Сувернев. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 12 (302). – С. 54-55.
2. Филин, В. А. Расчет механической характеристики асинхронного электродвигателя для работы в составе приводов буровых установок / В. А. Филин. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 38 (328). – С. 15-19.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – М.: Питер, 2008. – 349 с. – Текст : непосредственный.
4. Афанасьева, Н. А. Электротехника и электроника: учеб. пособие / Н. А. Афанасьева, Л. П. Булат. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. – 180 с. – Текст : непосредственный.
5. Смирнов, А. Ю. Построение механических характеристик асинхронных двигателей по паспортным данным / А. Ю. Смирнов, Е. Н. Александрова, Т. Н. Уснунц-Кригер. – Текст : непосредственный // Интеллектуальная электротехника. – 2020. – № 3. – С. 53-63.

© Слабоусов В. В., 2025

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОТОПЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

студент **Ефимов Егор Олегович**,
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена утилизации низкопотенциального тепла в системах центрального отопления с использованием термоэлектрических генераторов (ТЭГ). На основе анализа теплотерь, моделирования энергоэффективности ТЭГ и экономико-экологической оценки показано, что интеграция модулей в теплосети позволяет генерировать до 50 МВт · ч/год на 1000 км трасс при сроке окупаемости 3–7 лет. Решение способствует энергосбережению и снижению углеродного следа в ЖКХ.

Ключевые слова: низкопотенциальное тепло, термоэлектрические генераторы, энергосбережение, тепловые потери, центральное отопление, рекуперация энергии, углеродный след.

UTILIZATION OF LOW-POTENTIAL HEAT IN CENTRAL HEATING SYSTEMS USING THERMOELECTRIC GENERATORS

Student **Efimov Egor Olegovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The work is devoted to the utilization of low-potential heat in central heating systems using thermoelectric generators (TEG). Based on the analysis of heat losses, modeling of TEG energy efficiency and economic and environmental assessment, it is shown that the integration of modules into heating networks allows generating up to 50 MW h/year per 1000 km of lines with a payback period of 3–7 years. The solution contributes to energy saving and reducing the carbon footprint in housing and communal services.

Keywords: low-grade heat, thermoelectric generators, energy saving, heat loss, central heating, energy recovery, carbon footprint.

Современные системы центрального отопления, несмотря на технологическую зрелость, остаются источником значительных энергетических потерь. В условиях глобального тренда на декарбонизацию и растущего спроса на энергоэффективность проблема утилизации низкопотенциального тепла (НПТ) приобретает особую актуальность. Теплотери через поверхности трубопроводов, теплообменников и узлов подключения зданий достигают 15–20 % от общего объема транспортируемой энергии, что в масштабах крупных городов эквивалентно десяткам гигаватт-часов в год. Традиционные методы

рекуперации, такие как тепловые насосы, экономически неоправданны для температурного диапазона НПТ (до 100–150 °С), а прямые выбросы этого тепла в атмосферу усугубляют проблему «теплового загрязнения» урбанизированных территорий.

В последние годы развитие термоэлектрических материалов (например, на основе Bi_2Te_3 или скуттерудитов) открыло новые возможности для преобразования тепловой энергии в электрическую даже при небольших температурных градиентах. Это позволяет рассматривать термоэлектрические генераторы (ТЭГ) как потенциальное решение для утилизации НПТ в коммунальной инфраструктуре. Однако большинство исследований в этой области сосредоточено на промышленных объектах (металлургия, ТЭЦ), тогда как потенциал городских теплосетей остается недооцененным.

Целью данной работы является разработка концепции интеграции модульных ТЭГ в системы центрального отопления для генерации электроэнергии и оценка ее эффективности. Исследование фокусируется на трех аспектах: анализе потенциала теплотерь в типовых сетях, моделировании энергоотдачи ТЭГ с учетом современных материалов, а также предварительном расчете экономической и экологической целесообразности внедрения системы. Особенность подхода – акцент на модульности и адаптивности решений, что минимизирует необходимость модернизации существующей инфраструктуры.

Научная новизна работы заключается в переносе технологий термоэлектричества из промышленного контекста в сферу ЖКХ, где даже малая мощность генерации (порядка десятков кВт · ч) может быть востребована для энергоснабжения вспомогательных систем: освещения тепловых пунктов, питания циркуляционных насосов или датчиков IoT. Кроме того, предлагаемая концепция демонстрирует, как использование открытых данных о теплотерях и упрощенных расчетных моделей позволяет разрабатывать энергосберегающие решения без применения лабораторного оборудования или специализированного программного обеспечения [1].

Основу исследования составляет комбинированный подход, объединяющий анализ открытых данных, теоретическое моделирование и прикладные расчеты. Первоначально была проведена оценка потенциала низкопотенциального тепла в системах центрального отопления на основе статистики, предоставляемой энергокомпаниями и регулирующими органами. Для этого использовались усредненные показатели теплотерь в городских теплосетях, характерные для климатических зон с продолжительным отопительным сезоном – например, регионов России, где температура теплоносителя в зимний период достигает 90–110 °С. Это позволило выделить ключевые участки трубопроводов и узлов подключения, где теплотери превышают средние значения из-за износа изоляции или высокой разницы температур между теплоносителем и окружающей средой.

Моделирование энергоэффективности термоэлектрических генераторов (ТЭГ) базировалось на характеристиках современных материалов, таких как висмут-теллуридные соединения (Bi_2Te_3) и скуттерудиты, чьи термоэлектрические свойства хорошо документированы в научной литературе. Расчеты мощности ТЭГ

проводились через коэффициент Зеебека (α) и температурный градиент (ΔT) по упрощенной формуле (1).

$$P = \alpha^2 \cdot \Delta T^2 \cdot R^{-1}, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление модуля.

Для минимизации погрешностей учитывались типичные эксплуатационные факторы: колебания температуры теплоносителя, влажность воздуха и тепловое сопротивление контакта между ТЭГ и поверхностью трубопровода [2].

Экономическая оценка включала сравнение капитальных затрат на закупку и установку модулей ТЭГ с потенциальной выгодой от генерации электроэнергии. Стоимость оборудования определялась на основе рыночных цен на термоэлектрические модули малой мощности, а период окупаемости рассчитывался с учетом тарифов на электроэнергию для коммунальных объектов. Экологический эффект оценивался через снижение углеродного следа – пересчет сгенерированной энергии в эквивалентное уменьшение выбросов CO_2 , исходя из структуры энергобаланса региона (доля угля, газа и т. д.).

Важным аспектом методологии стал акцент на адаптивности предложенных решений. Например, для территорий с низкими зимними температурами (Сибирь, Урал) расчетный температурный градиент между трубопроводом и воздухом увеличивается, что повышает КПД ТЭГ, а в регионах с мягким климатом акцент смещается на оптимизацию размещения модулей в подземных теплотрассах. Это позволило сохранить баланс между универсальностью концепции и ее применимостью в разнообразных условиях.

Проведенный анализ теплотерь в типовых системах центрального отопления показал, что даже при умеренном температурном градиенте ($50\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$ между теплоносителем и окружающей средой) установка термоэлектрических генераторов (ТЭГ) способна обеспечить генерацию электроэнергии в диапазоне $30\text{--}50\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на 1 км трубопровода в год. Для города с протяженностью теплотрасс 1000 км это эквивалентно $30\text{--}50\text{ МВт}\cdot\text{ч}$ ежегодно – объему, достаточному для питания систем автоматики, освещения тепловых пунктов или частичного покрытия нагрузки циркуляционных насосов. При этом пиковая эффективность ТЭГ наблюдается в регионах с экстремальными зимними температурами: например, в условиях Сибири, где градиент достигает $90\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$, прогнозируемая выработка увеличивается на $40\text{--}60\%$ [3, 4].

Экономические расчеты выявили, что срок окупаемости модулей ТЭГ варьируется от 3 до 7 лет в зависимости от климатических условий и тарифов на электроэнергию. Наибольшая рентабельность достигается при интеграции генераторов в подземные теплотрассы с высокой температурой поверхности труб (выше $90\text{ }^\circ\text{C}$) и низкой влажностью, что снижает тепловые потери на конвекцию. Для типового жилого района с годовым потреблением электроэнергии $200\text{ МВт}\cdot\text{ч}$ внедрение ТЭГ может сократить затраты на $5\text{--}8\%$, что актуально для муниципалитетов с ограниченным бюджетом [5].

С экологической точки зрения утилизация низкопотенциального тепла через ТЭГ позволяет сократить углеродный след на $15\text{--}25$ тонн CO_2 -эквивалента в год для сети протяженностью 1000 км . Это соответствует выбросам от сжигания $6\text{--}10$ тысяч литров дизельного топлива. Хотя эффективность ТЭГ ($5\text{--}8\%$)

уступает тепловым насосам (КПД 30–50 %), их преимущество заключается в низкой стоимости внедрения и отсутствии необходимости в обслуживании. Кроме того, предложенная система не требует перестройки инфраструктуры – модули могут быть установлены точечно на участках с максимальными тепловыми потерями [6].

Ограничением концепции остается зависимость от стабильности температурного градиента: в межсезонье, когда разница между теплоносителем и воздухом сокращается, выработка энергии снижается на 60–70 %. Однако это частично компенсируется использованием гибридных материалов, таких как скаттерудиты, сохраняющих работоспособность даже при $\Delta T = 20 - 30$ °С. Перспективным направлением является также комбинирование ТЭГ с системами IoT для адаптивного управления модулями в реальном времени [7].

Результаты работы демонстрируют, что утилизация низкопотенциального тепла в ЖКХ через термоэлектричество – не только технически осуществимая, но и экономически оправданная задача. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию геометрии модулей, разработку композитных материалов для повышенной влажности и создание пилотных проектов в партнерстве с энергокомпаниями.

Проведенное исследование подтвердило, что утилизация низкопотенциального тепла в системах центрального отопления с использованием термоэлектрических генераторов обладает значительным потенциалом для повышения энергоэффективности коммунальной инфраструктуры. Анализ тепловых потерь в типовых теплосетях показал, что даже частичное преобразование рассеиваемой энергии в электричество способно обеспечить генерацию до 30–50 МВт · ч в год для города с протяженностью трасс 1000 км. Это позволяет покрыть часть энергозатрат на работу циркуляционных насосов, систем автоматизации и освещения, снижая нагрузку на муниципальные бюджеты.

Ключевым преимуществом предложенной концепции является ее адаптивность. Модульный принцип размещения ТЭГ на участках с максимальными тепловыми потерями исключает необходимость масштабной реконструкции сетей, а использование открытых данных и упрощенных расчетных моделей делает решение доступным для реализации даже при отсутствии специализированного оборудования. Экономическая оценка продемонстрировала, что срок окупаемости системы варьируется в пределах 3–7 лет, что сопоставимо с жизненным циклом современных энергосберегающих технологий.

Экологический эффект от внедрения ТЭГ, хотя и менее выражен по сравнению с промышленными методами рекуперации, остается значимым. Сокращение углеродного следа на 15–25 тонн CO₂-эквивалента ежегодно для сети из 1000 км подчеркивает вклад технологии в достижение целей декарбонизации, особенно в условиях растущего внимания к «зеленой» энергетике. При этом основным ограничением остается зависимость эффективности ТЭГ от стабильности температурного градиента, что требует дальнейшей разработки гибридных материалов и адаптивных систем управления.

Перспективы исследования связаны с оптимизацией термоэлектрических модулей для специфических условий эксплуатации (высокая влажность, перепады температур) и внедрением пилотных проектов в партнерстве с энергетическими компаниями. Особый интерес представляет интеграция ТЭГ с цифровыми платформами мониторинга, что позволит реализовать интеллектуальное управление энергопотоками в реальном времени. Таким образом, предложенный подход не только демонстрирует возможность эффективного использования вторичных энергоресурсов в ЖКХ, но и служит примером того, как теоретические расчеты и анализ данных могут стать основой для инноваций без привлечения сложной лабораторной базы.

Список литературы:

1. Li, X., Renmin, L., Yiting, Z., Peng, Z., Jingjing, L., Xiaorong, C., Shuguang, X. (2019) A review of low-temperature heat recovery technologies for industry processes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. Vol. 27. Issue 10. Pp. 2227-2237.
2. Перспективные термоэлектрические материалы / С. А. Гриднев, Ю. Е. Калинин, В. А. Макагонов, А. С. Шуваев. – Текст: электронный // АЭЭ. – 2013. – № 1-2 (118). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 29.03.2025).
3. Банникова, С. А. Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации / С. А. Банникова, В. М. Захаров, М. В. Козлова. – Текст: электронный // Вестник ИГЭУ. – 2019. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 29.03.2025).
4. Департамент цен и тарифов Администрации Владимирской области. Постановление от 11 февраля 2020 г. № 3/12 «Об утверждении нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя по тепловым сетям, нормативов удельного расхода топлива при производстве тепловой энергии источниками тепловой энергии и нормативов запасов топлива на источниках тепловой энергии на 2020 год» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/> (дата обращения: 28.03.2025).
5. Калинин, С. Г. Внедрение энергосберегающих технологий в ЖКХ / С. Г. Калинин, О. А. Брасло. Текст: электронный // JSRP. – 2014. – № 8(12). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 30.03.2025).
6. Квон, Г. М. Экономические аспекты внедрения ресурсосберегающих технологий системы ЖКХ / Г. М. Квон, Р. Р. Ахметзянова. – Текст: электронный // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2011. – № 42. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 30.03.2025).
7. Ahiska, R., Mamur, H. (2014) A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 4. Pp. 128-136.

© Ефимов Е. О., 2025

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В СФЕРЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ

магистрант **Генатулин Ринэль Рафаэлевич**
науч. руководитель: доцент **Минкин Ахметгарей Султанович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Автоматическая частотная нагрузка (АЧР) является неотъемлемой частью работы энергетических систем. В процессе эксплуатации возможны аварийные режимы, связанные с быстрым понижением частоты, которые опасны для всей электроэнергетической системы. Для восстановления нормального режима в таких случаях необходима АЧР. В данной статье представлен краткий обзор систем автоматической частотной разгрузки, а также современных тенденций развития в данной сфере.

Ключевые слова: распределение электроэнергии, аварийное снижение частоты, АЧР, развитие, потребители, микропроцессорные устройства.

DEVELOPMENT TRENDS IN THE FIELD OF AUTOMATIC FREQUENCY UNLOADING

Master Student **Genatulin Rinel Rafaelevich**,
Academic Advisor: Associate Professor **Minkin Akhmetgarey Sultanovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. Automatic frequency unloading (AFU) is an integral part of the operation of energy systems. During operation, there may be emergency states associated with a rapid decrease in frequency, which are dangerous for the entire electric power system. In order to restore the normal state in such cases, an AFU is necessary. This article provides a brief overview of automatic frequency unloading systems, as well as modern development trends in this field.

Keywords: power distribution, emergency frequency reduction, AFU, development, consumers, microprocessor devices.

Guaranteeing power supply to consumers requires strict compliance with the main network parameters [1]. Deviation of these parameters from the standard value will lead to failures in the operation of high-precision devices, a reduction in the service life of equipment and may lead to the occurrence of emergency states in more serious cases.

An emergency frequency drop in the power system occurs within a few seconds. Due to the high speed of the emergency frequency drop, the duty personnel do not have time to take any measures, because of which the elimination of the

emergency state is possible only with the use of automatic devices. Prevention of the development and subsequent elimination of an accident is possible only with the immediate use of all active power reserves available at power plants. All rotating units are loaded to the limit, considering permissible short-term overloads [2].

In the absence of a rotating reserve, the only possible way to restore the frequency in the network is to disconnect some of the least critical consumers. According to the Electrical Installation Code [3], these include category III consumers (Fig.), i. e. residential buildings and warehouses. Disconnection of such consumers from the network is carried out by automatic frequency unloading devices (AFU), which are triggered when the frequency in the network drops dangerously.

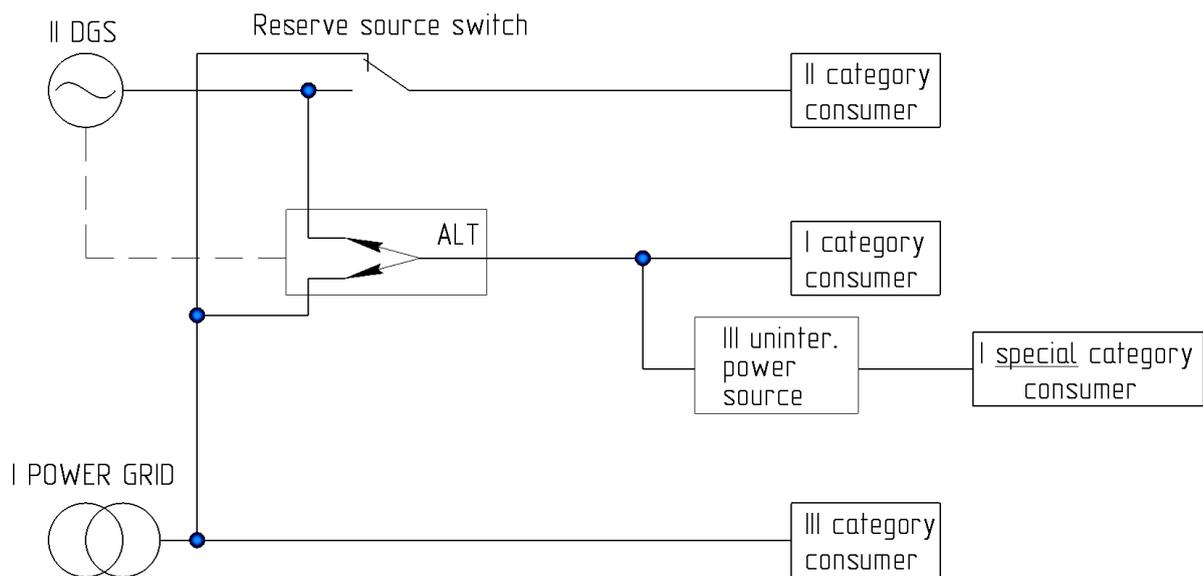


Figure – Distribution of electrical power across different categories of consumers.

Modern AFU devices have a microprocessor base, which is significantly superior to its outdated analogue – a frequency relay. The main modern technical solutions in the field of AFU are the BRFN-100 devices from OJSC "NTC Mechatronika" and Sirius-2-AFU from CJSC "RADIUS Avtomatika". Below are the characteristics of these devices in comparison with the discontinued Sirius-AFU model [4-6].

Table – Comparison of technical characteristics of different AFU devices [4-6]

Parameter	Sirius-AFU	Sirius-2-AFU	BRFN-100
Supply voltage, V	from 20 to 100	from 88 to 242	from 66 to 264
AFU-1 loads	4	4	up to 8
AFU-2 loads	4	4	up to 8
FARA loads	4	4	up to 8
Amount of digital	2/14	8/20	10/10

inputs/outputs			
Supported communication protocols	-Modbus RTU	– Modbus-RTU, Modbus-TCP; – IEC 60870-5-101, -103, -104; – IEC 61850 6, 7-1, 7-2, 7-3, 7-4, 8-1 ed.2 (MMS, GOOSE); – Ethernet	– Modbus-RTU, Modbus-TCP; – IEC 60870-5-101, -103, -104; – IEC 61850 6, 7-1, 7-2, 7-3, 7-4, 8-1 ed.2 (MMS, GOOSE); – Ethernet
Operating temperature, °C	from -20 to +55	from -40 to +55	from -40 to +55

As the author has established from the comparison above, modern AFU devices tend to improve their characteristics everywhere, especially the expansion in the range of supported communication protocols and supply voltage is noticeable. One can notice an increase in the operating temperature range of new AFU devices, which allows the energy distribution companies to use them in areas with a harsher climate. From an economic point of view, new devices have the advantage of requiring less equipment due to their expanded capabilities. If these development trends continue, this will contribute to the expansion of construction capabilities, and then protection, of new energy systems.

Список литературы:

1. Вихарев, А. П. Автоматика энергосистем: учеб. пособие / А. П. Вихарев. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2011. – Текст: непосредственный.
2. Рабинович, Р. С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем: учеб. Пособие / Р. С. Рабинович. – Москва: Изд-во Энергоатомиздат, 1989. – Текст: непосредственный.
3. Правила устройства электроустановок / Главгосэнергонадзор России. – 7-е издание (ПУЭ). – М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – Текст: непосредственный.
4. Продукция «РАДИУС Автоматика». «Сириус-АЧР» // «Электро-Профи» : [сайт]. – URL: <https://ep.ru/product/> (дата обращения: 20.02.25). – Текст: электронный.
5. Продукция «РАДИУС Автоматика». «Сириус-2-АЧР» // «Электро-Профи»: [сайт]. – URL: <https://ep.ru/product/> (дата обращения: 20.02.25). – Текст: электронный.
6. БРЧН-100 – ТМ-КИП. – URL: <https://tmkip.ru/product/releynaya-zashchita-i-avtomatika1/protivoavariynaya-avtomatika1/brchn-100/> (дата обращения: 20.02.25).

© Генатулин Р. Р., 2025

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЗАЩИТЫ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ПО ОТНОШЕНИЮ
К НЕЙТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ**

студент **Широнина Александра Михайловна**,
студент **Воронин Илья Павлович**,
канд. техн. наук, научный сотрудник **Пышкина Мария Дмитриевна**,
д-р техн. наук, профессор **Ташлыков Олег Леонидович**
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В области применения ядерной энергии наибольший интерес представляет оптимизация состава радиационно-защитных материалов (РЗМ). В данной работе приводится исследование радиационно-защитных свойств материалов на основе эпоксидной смолы и борной кислоты. С использованием специализированных приборов выполнена экспериментальная оценка эффективности композитного материала в качестве защиты от нейтронного излучения. Статья содержит результаты, позволяющие оценить перспективность применения этого материала по отношению к нейтронам с различным энергетическим спектром.

Ключевые слова: нейтронное излучение, длина релаксации нейтронного излучения, плотность потока нейтронов, радиационно-защитные материалы, эпоксидная смола.

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF PROTECTION
OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON EPOXY RESIN IN RELATION
TO NEUTRON RADIATION**

Student **Shironina Alexandra Mikhailovna**,
Student **Voronin Ilya Pavlovich**,
PhD in Engineering, Research Associate **Pyshkina Maria Dmitrievna**,
Doctor in Engineering, Professor **Tashlykov Oleg Leonidovich**,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B. N. Yeltsin. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. In the field of nuclear energy applications, optimization of the composition of radiation-protective materials (REM) is of the greatest interest. This paper presents a study of the radiation-protective properties of materials based on epoxy resin and boric acid. An experimental evaluation of the effectiveness of a composite material as a protection against neutron radiation was performed using

specialized instruments. The report contains the results that make it possible to evaluate the prospects of using this material in relation to neutrons with different energy spectra.

Keywords: neutron radiation, neutron radiation relaxation length, neutron flux density, radiation-protective materials, epoxy resin.

Для обеспечения радиационной безопасности на ОИАЭ, материалы, предназначенные для защиты персонала, должны гарантировать эффективное экранирование не только от гаммы, но и от нейтронного излучения. Достижение этой цели требует специального подбора химического состава материала. Нейтроны и гамма-кванты представляют наибольшую угрозу для здоровья работников АЭС, поскольку обладают самой высокой проникающей способностью среди всех видов ионизирующего излучения. Альфа- и бета-частицы, напротив, характеризуются малой проникающей способностью и, как правило, не выходят за пределы оборудования или легко поглощаются обычными средствами защиты, такими как одежда [1].

Выбор оптимальной защиты от нейтронного излучения является комплексной задачей и определяется рядом факторов, включая энергию нейтронов, условия эксплуатации защитных материалов, экономические соображения и другие параметры. В качестве эффективных средств защиты от нейтронов рассматриваются, в первую очередь, материалы, содержащие водород (например, полиэтилен, вода, парафин и другие органические соединения), поскольку водород является хорошим замедлителем нейтронов. Также широко применяются вещества с высоким сечением поглощения нейтронов, такие как бор, кадмий, литий и другие [2].

Композитные материалы представляют собой перспективное направление в разработке эффективной нейтронной защиты [3, 4]. Эти материалы позволяют комбинировать различные компоненты для достижения оптимального сочетания свойств, необходимых для защиты от нейтронного излучения разных энергий. В качестве матрицы обычно используется полиэтилен, полипропилен, эпоксидные смолы или другие полимеры. Высокое содержание водорода в этих полимерах делает их отличными замедлителями быстрых нейтронов. Для поглощения тепловых нейтронов в полимерную матрицу добавляют различные наполнители, содержащие элементы с высоким сечением поглощения, например, борную кислоту (H_3BO_3).

При проектировании защиты от нейтронного излучения, особенно на начальных этапах, в инженерной практике часто используются упрощенные методы расчета, позволяющие оценить проникновение нейтронов через защитные барьеры. К таким методам относятся метод сечения выведения и метод длин релаксации. Оба эти подхода служат для оценки пространственного распределения ослабления плотности потока нейтронов.

Ослабление плотности потока нейтронов в широком пучке описывается соотношением, в котором вместо длины пробега l используется длина релаксации L . Длина релаксации характеризует толщину вещества, которая уменьшает интенсивность нейтронного излучения в e раз.

Длина релаксации нейтронного излучения определяется энергией нейтронов, а также характеристиками экранирующего материала: его составом и плотностью. Зная длину релаксации, можно рассчитать, как уменьшится интенсивность излучения после прохождения через защитный слой заданной толщины [5].

Длина релаксации определяется по формуле:

$$L = \frac{-x}{\ln \varphi - \ln \varphi_0},$$

где x – толщина защитного материала;

φ – плотность потока нейтронов с защитным материалом;

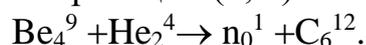
φ_0 – плотность потока нейтронов без защитного материала.

Для исследования были изготовлены образцы из эпоксидной смолы с добавлением 5 масс. % и 10 масс.% борной кислоты (таблица 1). Эпоксидная смола является водородсодержащим материалом, обладающим высокой прочностью, жесткостью и износостойкостью, а борная кислота является эффективным поглотителем тепловых нейтронов.

Таблица 1 – Химический состав образцов

Элементный состав	Сечение поглощения для тепловых нейтронов σ_a , барн [6]	Массовая доля в первом образце	Массовая доля во втором образце
H	0,328	0,701353	0,647085
B	758	0,009012	0,017484
O	0,0002	0,094476	0,127673
Al	0,241	0,012304	0,011308
Si	0,16	0,029121	0,02676
Cl	33,8	0,125412	0,143667
K	2,07	0,006307	0,005798
Ca	0,44	0,007729	0,007101
Mn	13,2	0,000208	0,000188
Fe	2,62	0,013224	0,012149
Ni	4,60	0,000146	0,000134
Cu	3,81	0,000078	0,000072
Zn	1,10	0,00059	0,000542
Zr	0,185	0,000015	0,000013
Mo	2,7	0,000026	0,000024

Для определения мощности дозы использовался плутоний-бериллиевый источник нейтронов. Источники подобного типа представляют собой однородную спрессованную смесь α -активного вещества (в данном случае это Pu-239) с порошком металлического бериллия (Be-9). Нейтроны в таком источнике образуются в результате реакции (α, n):



Преимуществом плутониевых источников является то, что они имеют менее интенсивное γ -излучение (около 1 γ -кванта/нейтрон), чем радиевые

источники (около 104 квант/нейтр.) (рисунок) [7].

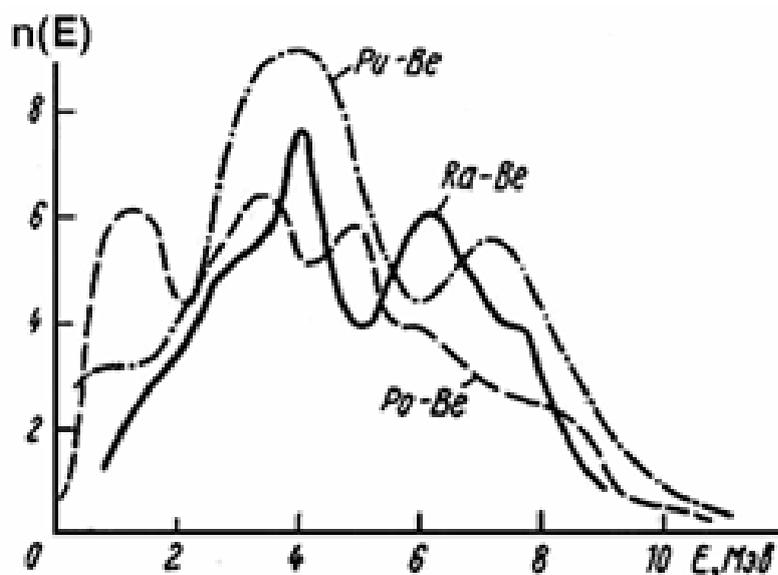


Рисунок – Энергетические спектры (α , n) – источников нейтронов

Для регистрации пучка нейтронов, проходящего через материал защиты использовался детектор ДКС-96. Дозиметры-радиометры в зависимости от типа подключенного блока детектирования обеспечивают измерение мощности дозы нейтронного излучения, плотности потока нейтронов и т. д. [8]. Мощность дозы нейтронного излучения без защиты составила 43,3 мкЗв/ч.

Таблица 2 – Результаты измерений мощности дозы нейтронного излучения

Содержание борной кислоты	Толщина образцов, мм	Мощность дозы, мкЗв/ч
5 масс.%	9,5	40,7
	19,2	37,8
10 масс.%	10	38,2
	22,5	36,5

Для измерения плотности потока нейтронов использовался радиометр-дозиметр МКС-01Р. Прибор состоит из пульта регистрации и сменных блоков детектирования, которые предназначены для измерения различных видов ИИ. БД преобразует энергию излучения в последовательность импульсов, число которых пропорционально энергии излучения. Работа блоков детектирования основана на сцинтилляционном методе регистрации, и БД состоит из ФЭУ-85 и различных сцинтилляторов. Индикация показаний осуществляется с помощью пятиразрядного цифрового табло, а также по стрелочному прибору, который позволяет обнаружить очень малые уровни излучения с помощью устройства световой и акустической сигнализации [9].

Для получения более точных результатов, образцы подвергались серии измерений. Затем вычислялось среднее значение величины плотности потока

нейтронов и производился расчет длины релаксации для тепловых, быстрых и промежуточных нейтронов. Плотность потока тепловых нейтронов без защиты составила $17,22 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, плотность потока быстрых и промежуточных нейтронов без защиты составила $33,96 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты измерений плотности потока нейтронов и вычисления длины релаксации

Содержание борной кислоты	Толщина образцов, мм	Тепловые нейтроны		Быстрые и промежуточные нейтроны	
		Плотность потока, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Длина релаксации, мм	Плотность потока, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Длина релаксации, мм
5 масс. %	9,5	16	129,3	30,3	82,4
	19,2	13,9	89,6	26,5	77,8
10 масс. %	10	14,2	51,9	29,2	66,7
	22,5	13,5	91,5	25,9	83

В результате исследования был проведен первичный анализ эффективности защиты на основе химического анализа состава образцов. Он показал, что образцы преимущественно состоят из легких элементов с высоким сечением поглощения тепловых нейтронов. Результаты измерений показали, что при увеличении концентрации борной кислоты с 5 масс. % до 10 масс. % длина релаксации тепловых нейтронов уменьшается в 2,5 раза; для быстрых и промежуточных нейтронов длина релаксации уменьшается в 1,2. Мощность дозы нейтронного излучения при увеличении концентрации борной кислоты с 5 масс. % до 10 масс. % снижается на 6 % и 12 % соответственно.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что образцы из эпоксидной смолы с борной кислотой являются эффективной защитой лишь от тепловых, то есть медленных нейтронов, т.к. бор является хорошим поглотителем нейтронов. Для экранирования от нейтронов более высоких энергий требуется применение сложной комбинированной защиты, состоящей из замедлителя и поглотителя.

Список литературы:

1. Михайлова, А. Ф. Исследование защитных свойств гомогенных радиационно-защитных материалов по отношению к нейтронному излучению / А. Ф. Михайлова, В. Ю. Лукьяненко, О. Л. Ташлыков. – Текст: непосредственный // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург, 2016. – С. 266-269. – Текст: непосредственный.
2. Машкович, В. П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с. – Текст: непосредственный.
3. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом / И. М. Русских, Е. Н. Селезнев,

- О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Текст: непосредственный // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Том 5, № 5. – С. 449-455.
4. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, А. П. Хомяков, И. М. Русских, Е. Н. Селезнев. – Текст: непосредственный // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2 (15). – С. 49-55.
5. Голиков, И. Г. Лекции по дозиметрии и защите / И. Г. Голиков. – СПб: Политехн. ун-т, 2016. – 150 с. – Текст: непосредственный.
6. Материалы защиты и приближенный расчет толщины защиты от нейтронного излучения // БНТУ : [сайт]. – URL: <https://smkachan.nanoscience.by/bntu/nuclear/shielding/theory.htm> (дата обращения: 06.04.2025). – Текст: электронный.
7. Долгополов, С. Ю. Определение нейтронно-физических свойств замедляющих сред: методические рекомендации к лабораторным работам / С. Ю. Долгополов, В. Н. Нестеров, Ю. Б. Чертков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 88 с. – Текст: непосредственный.
8. Руководство по эксплуатации дозиметры-радиометры ДКС-96 ТЕ1.415313.003РЭ. – Текст: непосредственный.
9. Радиометр-дозиметр МКС-01Р // Stuziba : [сайт]. – URL: <https://studizba.com/show/>(дата обращения: 04.04.2025). – Текст: электронный.

© Широнова А. М., Воронин И. П., Пышкина М. Д., Ташлыков О. Л., 2025

ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ГК «РОСАТОМ» В КОНТЕКСТЕ РОСТА ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

студент **Широнина Александра Михайловна**,
студент **Воронин Илья Павлович**,
д-р техн. наук, профессор **Ташлыков Олег Леонидович**,
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена актуальным вопросам развития мировой энергетики, характеризующейся стремительным ростом энергопотребления и переходом к более экологически чистым источникам энергии. Особое внимание уделяется атомной энергетике как высокотехнологичной отрасли с низким уровнем выбросов. Представлен обзор перспективных направлений развития атомной энергетики в России, включая концепцию замкнутого ядерного топливного цикла и разработку атомных станций малой мощности.

Ключевые слова: глобальное энергопотребление, инновационная энергетика, атомная энергетика, замкнутый ядерный топливный цикл, АСММ.

INNOVATIVE ACTIVITY OF ROSATOM STATE CORPORATION IN THE CONTEXT OF GLOBAL ENERGY CONSUMPTION GROWTH

Student **Shironina Alexandra Mikhailovna**,
Student **Voronin Ilya Pavlovich**,
Doctor in Engineering, Professor **Tashlykov Oleg Leonidovich**,
Ural Federal University named after the First President
of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to topical issues of global energy development, characterized by a rapid increase in energy consumption and the transition to more environmentally friendly energy sources. Special attention is paid to nuclear energy as a high-tech industry with low emissions. An overview of promising areas for the development of nuclear energy in Russia is presented, including the concept of a closed nuclear fuel cycle and the development of low-power nuclear power plants.

Keywords: global energy consumption, innovative energy, nuclear energy, closed nuclear fuel cycle, ASMM.

На современном этапе развития множество проблем в области электроэнергетики обуславливается отсутствием целостного подхода к системе технического и правового регулирования. В результате значительно

увеличиваются технологические, инвестиционные, проектные риски и, соответственно, затрудняется процесс внедрения и использования инноваций в российских энергокомпаниях. В условиях саморегулирования единые стандарты повышают согласованность действий компаний-участников отрасли, позволяют оптимизировать процессы управления энергосистемой, обеспечивая при этом соответствующее качество и надежность ее работы. В сложившихся обстоятельствах приоритетное значение имеют перспективные формы взаимодействия государства и бизнеса в области разработки инновационных проектов для обеспечения качества внедрения систем инновационного менеджмента на предприятиях энергетики [1].

За последние десятилетия глобальное энергопотребление значительно возросло, что связано с несколькими ключевыми факторами: ростом численности населения, расширением промышленного производства и развитием новых технологий, требующих все больше энергии. Кроме того, существенное влияние оказывает изменение энергетического баланса многих стран, активно переходящих на альтернативные и возобновляемые источники энергии в рамках усилий по снижению выбросов и повышению устойчивости энергетических систем.

В 2022 году затраты на инновационную деятельность по сравнению с предыдущим годом в России выросли на 13 % и достигли 2,7 трлн рублей. Основными направлениями инвестирования являются разработка и приобретение программного обеспечения, информационные системы и бизнес-процессы, энергетика, судостроение и военно-промышленный комплекс (ВПК). Атомная энергетика является одной из самых высокотехнологичных отраслей с почти нулевым выбросом углекислого газа. Довольно долгое время Россия лидирует в данной отрасли, предоставляя миру различные инновационные разработки и решения. В контексте развития «зеленой» энергетики атомные электростанции обладают большим потенциалом [2].

Так, крупнейшей компанией в РФ в сфере атомной энергетики является государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Несмотря на сложную геополитическую обстановку, атомная энергетика в значительной степени избежала воздействия зарубежных санкций. Госкорпорации удалось не только сохранить свои позиции на мировом рынке атомной энергетики, но и расширить свое присутствие более чем в 50 странах мира. Кроме того, начиная с 2017 года, компания активно развивает ветроэнергетику и другие экологические проекты, включая создание экопарков и «умных городов». На сегодняшний день в эксплуатации находятся 7 ветроэлектростанций с общей установленной мощностью 780 МВт [1].

Одна из актуальных инновационных идей Росатома – это разработки в области замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). ЗЯТЦ подразумевает переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) с целью извлечения ценных делящихся материалов, таких как уран и плутоний, для повторного использования в качестве ядерного топлива. В отличие от открытого топливного цикла, где ОЯТ захоранивается как радиоактивные отходы, ЗЯТЦ позволяет значительно сократить объем и токсичность этих отходов, а также

уменьшить потребность в добыче природного урана. Это не только повысит экономическую эффективность атомной энергетики, но и снизит ее воздействие на окружающую среду.

Необходимость внедрения ЗЯТЦ обусловлена рядом факторов. Во-первых, растущее мировое энергопотребление требует устойчивых и экологически чистых источников энергии. Атомная энергетика, благодаря ЗЯТЦ, может внести значительный вклад в решение этой задачи, обеспечивая электроэнергией растущее население и промышленность, не увеличивая при этом выбросы парниковых газов. Во-вторых, ограниченность запасов природного урана требует более эффективного использования имеющихся ресурсов. ЗЯТЦ позволяет многократно использовать уран и плутоний, содержащиеся в ОЯТ, значительно увеличивая энергетический потенциал ядерного топлива. В-третьих, проблема радиоактивных отходов является одной из ключевых для атомной энергетики.

Чтобы полностью избавиться от долгоживущих радиоактивных отходов, нужно иметь и быстрые, и тепловые реакторы в одном энергетическом комплексе. На тепловых нейтронах работает большинство современных ядерных реакторов. На быстрых нейтронах работают сразу два промышленных реактора в России – это реакторы БН-600 и БН-800 на Белоярской АЭС [3].

В генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики в РФ до 2042 г. значительный упор делается на развитие атомной энергетики, в том числе на строительство реакторов на быстрых нейтронах (рис. 1): Белоярская АЭС, Свердловская обл. БН-1200 (2034); ОДЭК БРЕСТ ОД-300, г. Северск, Томская обл. (2028); Рефтинская АЭС, Свердловская обл. РБН-1250 МВт (2041); Южно-Уральская АЭС, РБН-1255 МВт, два блока (2038, 2040); Сибирская АЭС, Иркутская обл., РБН-1255 МВт, два блока, (2041, 2042); Северская АЭС, Томская обл., РБН-1255 МВт, два блока, (2037, 2039) [4].



Рисунок – Размещение реакторных установок на быстрых нейтронах

В России производство смешанного оксидного топлива (МОКС-топлива) для реакторов на быстрых нейтронах осуществляется на Горно-химическом комбинате, расположенном в Красноярском крае. Это топливо успешно применяется на Белоярской атомной станции, в реакторе БН-800, который с 2022 года полностью перешел на использование МОКС-топлива. В настоящее время БН-800 служит своего рода полигоном для отработки концепции замкнутого ядерного топливного цикла, в рамках которой отработанное топливо одного реактора перерабатывается и используется в качестве топлива для другого. В данный момент ведутся работы по проектированию и строительству нового, более мощного реактора на быстрых нейтронах БН-1200М.

Другим вектором инновационного развития Росатома является проектирование атомных станций малой мощности (АСММ). В деле строительства АСММ Россия – мировой лидер. Ключевой особенностью АСММ является их модульность. В отличие от крупных, уникальных проектов АЭС, АСММ представляют собой компактные энергоблоки, значительная часть которых изготавливается на заводе в виде стандартизированных модулей. Это позволяет существенно сократить сроки и стоимость строительства, а также повысить качество и надежность оборудования благодаря серийному производству и тщательному контролю на каждом этапе.

Преимущества модульности распространяются и на эксплуатацию. Модульная конструкция позволяет упростить процесс обслуживания и ремонта, а также гибко адаптировать мощность станции к потребностям конкретного региона. При необходимости можно поэтапно добавлять новые модули, наращивая генерирующую мощность в соответствии с ростом спроса на электроэнергию. Кроме того, модульность упрощает утилизацию отработавших реакторов, поскольку отдельные модули могут быть демонтированы и отправлены на переработку или захоронение.

АСММ обладают значительным потенциалом для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов, где строительство крупных АЭС экономически нецелесообразно. Они могут обеспечивать электроэнергией промышленные предприятия, горнодобывающие комплексы, научные станции, а также небольшие города и поселки. Кроме того, АСММ могут использоваться для производства тепла для нужд отопления и горячего водоснабжения, а также для опреснения морской воды.

Особое внимание уделяется безопасности АСММ. Благодаря компактным размерам и инновационным конструктивным решениям, проекты обладают повышенной устойчивостью к авариям, связанным с потерей охлаждения активной зоны. В некоторых конструкциях предусмотрены пассивные системы безопасности, не требующие вмешательства оператора и внешних источников энергии для предотвращения аварии [5].

Инновационная энергетика в России представляет собой ключевую сферу, способствующую экономическому росту и экологической устойчивости. Развитие новых технологий в области возобновляемых источников энергии, атомной энергетике и энергоэффективности позволит стране сократить

зависимость от традиционных углеводородов и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Основные достижения в этой области включают рост инвестиций в инновационные технологии и развитие инфраструктуры для поддержки инновационных проектов. Однако, чтобы полностью реализовать потенциал инновационной энергетики, России необходимы дальнейшие реформы в законодательстве, увеличение финансирования и крепкая кооперация между государственными структурами и частным сектором. В перспективе успешное развитие инновационной энергетики может перевести Россию в ряд мировых лидеров в области чистой энергетики, поднимая ее конкурентоспособность и обеспечивая устойчивый экономический рост.

Список литературы:

1. Назаренко, Д. А. Инновационная деятельность в энергетике: основные барьеры и способы их преодоления / Д. А. Назаренко. – Текст: непосредственный // Журнал правовых и экономических исследований. – 2014. – № 1. – С. 26-28.
2. Инновационное развитие отечественного и мирового энергетического сектора: переход к зеленой энергетике / И. А. Максимцев, К. Б. Костин, О. А. Онуфриева [и др.]. – Текст: непосредственный // Экономика, предпринимательство и право. – 2024. – Т. 14, № 6. – С. 2963-2984. – DOI 10.18334/err.14.6.121094.
3. Ташлыков, О. Л. Инновационное направление развития ядерной энергетики в России и мире (Экологическая приемлемость ядерной энергетики XXI века) / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, Е. В. Шарифьянов. – Текст: непосредственный // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 28-30 (350-352). – С. 47-56.
4. Правительство утвердило Генеральную схему размещения объектов электроэнергетики до 2042 года // Правительство России : [сайт]. – URL: <http://government.ru/docs/53923/> (дата обращения: 10.04.2025). – Текст: электронный.
5. АСММ на языке цифр // Новый атомный эксперт. – 2024. – № 2. – С. 22-31. – Текст: непосредственный.

© Широнова А. М., Воронин И. П., Ташлыков О. Л., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

студент **Буянов Павел Вячеславович**,
студент **Малинин Никита Алексеевич**,
канд. физ.-мат. наук, доцент **Демина Маргарита Юрьевна**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье авторами выполнен расчет диэлектрической проницаемости четырехслойного композитного диэлектрика различными методами и представлен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: диэлектрик, диэлектрическая проницаемость, композит, электрическое поле.

STUDY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF COMPOSITE DIELECTRICS

Student **Buyanov Pavel Vyacheslavovich**,
Student **Malinin Nikita Alekseevich**,
PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor **Demina Margarita Yurievna**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. In the article, the authors calculated the dielectric constant of a four-layer composite dielectric by various methods and analyzed the results obtained.

Keywords: dielectric, dielectric permittivity, composite, electric field.

В эпоху повсеместного распространения электроники, от бытовых приборов до сложных промышленных комплексов, материалы с диэлектрическими свойствами приобретают первостепенное значение. Эти вещества, способные поляризоваться под воздействием электрического поля и аккумулировать энергию, являются ключевыми компонентами в конденсаторах, изоляторах и радиоэлектронных элементах. Их характеристики напрямую влияют на функциональность и надежность устройств, обеспечивающих передачу и распределение электроэнергии, что, в свою очередь, повышает безопасность эксплуатации [1, 2].

Композитные диэлектрики также находят широкое применение в строительстве, выступая в роли эффективных изоляционных материалов, способствующих энергосбережению и улучшению теплоизоляции зданий.

Перспективным направлением в материаловедении и электротехнике является изучение диэлектрической проницаемости композитных материалов, что обусловлено рядом факторов [3, 4]:

- Возможностью целенаправленного управления характеристиками: Композиты позволяют оптимизировать диэлектрическую проницаемость, электрическую прочность, частотные характеристики и другие ключевые параметры для конкретных применений.

- Потребностью в повышении энергоэффективности: разработка диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью способствует созданию более компактных и экономичных конденсаторов, что особенно важно для мобильных устройств и систем аккумулирования энергии.

- Необходимостью расширения сфер применения: композиты открывают новые горизонты в гибкой электронике, микроэлектромеханических системах (MEMS) и устройствах, функционирующих в высокочастотном диапазоне.

- Стремлением к технологической независимости: развитие отечественного производства композитных диэлектриков является стратегически важным шагом для снижения зависимости от зарубежных поставок.

В данной работе рассматривается композитный диэлектрик, состоящий из разнородных материалов, расположенных перпендикулярно силовым линиям электрического поля (рис.). Произведены расчеты эффективной диэлектрической проницаемости с использованием различных методов.

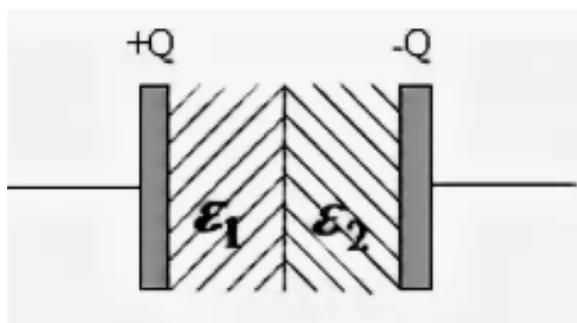


Рисунок – Схема расположения диэлектрических слоев перпендикулярно силовым линиям электрического поля

Емкость плоского конденсатора определяется геометрией обкладок, величиной зазора между ними и диэлектрическими свойствами заполняющей среды [5].

Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (1)$$

Если граница раздела диэлектрических слоев расположена перпендикулярно вектору напряженности поля, то емкость определяется согласно соотношению:

$$\frac{1}{C_{\text{пол}}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2)$$

или

$$\frac{d}{\varepsilon_{\text{эфф}} S} = \frac{d_1}{\varepsilon_1 S} + \frac{d_2}{\varepsilon_2 S} + \dots + \frac{d_n}{\varepsilon_n S} \quad (3)$$

Введем суммарный объем и объемы слоев:

$$V = Sd; \quad V_1 = Sd_1; \quad V_2 = Sd_2; \quad \dots \quad V_n = Sd_n, \quad (4)$$

Тогда формула (3) запишется в виде:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{V_1}{V} + \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{V_2}{V} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_n} \frac{V_n}{V} \quad (5)$$

Введем параметр, равный отношению объема i -го компонента к общему объему диэлектрика:

$$\theta_i = \frac{V_i}{V}, \quad (6)$$

эффективная диэлектрическая проницаемость будет рассчитываться по формуле:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\varepsilon_i} \theta_i \quad (7)$$

При расположении границы раздела диэлектрических слоев параллельно вектору напряженности поля, результирующая емкость равна:

$$C_{\text{парал}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n, \quad (8)$$

или

$$\varepsilon_{\text{эфф}} \frac{S}{d} = \varepsilon_1 \frac{S_1}{d} + \varepsilon_2 \frac{S_2}{d} + \dots + \varepsilon_n \frac{S_n}{d}, \quad (9)$$

следовательно,

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{\varepsilon_1 S_1}{S} + \frac{\varepsilon_2 S_2}{S} + \dots + \frac{\varepsilon_n S_n}{S} = \varepsilon_1 \theta_1 + \varepsilon_2 \theta_2 + \dots + \varepsilon_n \theta_n, \quad (10)$$

где $\theta_i = \frac{S_i}{S}$, тогда эффективная диэлектрическая проницаемость в этом случае рассчитывается как:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \theta_i \quad (11)$$

При хаотическом, причем статистически равномерном, распределении компонентов диэлектрика применяются другие формулы для расчета эффективной диэлектрической проницаемости.

Формула Лихтенеккера используется для расчета $\varepsilon_{\text{эфф}}$ керамики, при этом диэлектрические проницаемости компонентов должны быть не очень высоки ($\varepsilon < 10$) и по величине незначительно отличаться друг от друга:

$$\ln \varepsilon_{\text{эфф}} = \sum_{i=1}^k \theta_i \ln \varepsilon_i \quad (12)$$

Если $\varepsilon > 10$, используют формулу Ландауэра:

$$\frac{\theta_{\text{эфф}}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_{\text{эфф}} + \varepsilon_1} + \frac{\theta_{\text{эфф}}(\varepsilon_2 - \varepsilon)}{2\varepsilon_{\text{эфф}} + \varepsilon_2} = 0. \quad (13)$$

При значительном отличии диэлектрической проницаемости

компонентов может быть применена формула Оделевского:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \Lambda + \sqrt{\Lambda^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}}, \quad (14)$$

где $\Lambda = \frac{(3\theta_1 - 1)\varepsilon_1 + (3\theta_2 - 1)\varepsilon_2}{4}$.

Формула Ландау и Лившица:

$$\sqrt[3]{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \sum_{i=1}^k \theta_i \sqrt[3]{\varepsilon_i}. \quad (15)$$

Для эффективной диэлектрической проницаемости вспененных материалов (пенопласт, пенобетон, молекулярные сита и т. п.) можно использовать формулу:

$$\lg \varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{\Omega_{\text{эфф}}}{\Omega_{\text{сплш}}} \ln \varepsilon_{\text{сплш}}, \quad (16)$$

где $\Omega_{\text{эфф}}$ – плотность вспененного материала;

$\Omega_{\text{сплш}}$, $\varepsilon_{\text{сплш}}$ – плотность и диэлектрическая проницаемость сплошного материала.

Для расчета эффективной диэлектрической проницаемости в данной работе предполагали, что композитный диэлектрик четырехслойный, и использовали следующие параметры слоев (таблица 1):

Таблица 1 – Исходные параметры композитного диэлектрика

Параметры диэлектрического слоя	I часть			II часть			Композит
	I слой	II слой	Итого I часть	III слой	IV слой	Итого II часть	
Толщина, см	1,0	2,0	3,0	1,5	2,0	3,5	6,5
Площадь сечения, см ²	20	20	20	20	20	20	20
Объем, см ³	20	40	60	30	40	70	130
Отношение объема слоя диэлектрика к общему объему	0,15	0,31	0,46	0,23	0,31	0,54	1,00
Отношение объема слоя диэлектрика к объему части	0,33	0,67	1,00	0,43	0,57	1,00	-
Диэлектрическая проницаемость	6	2	-	5	2,8	-	-

В расчетах принимали, что граница раздела диэлектрических слоев расположена перпендикулярно вектору напряженности поля, следовательно,

эффективная диэлектрическая проницаемость может быть определена согласно соотношению (7):

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = 2,980$$

Согласно вычислениям, произведенным по формуле Лихтенеккера (12), данный четырехслойный диэлектрик имеет проницаемость:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = 3,245$$

Расчеты, выполненные по формуле Ландау и Лифшица (15), показывают, что диэлектрическая проницаемость равна

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = 3,345$$

Поскольку формула Одолевского может быть применена для расчета только двухслойных материалов, композит разделили на две части, для каждой вычислили эффективную проницаемость, а затем общую проницаемость четырех слоев:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = 3,334$$

Для сравнения результаты вычислений всеми методами приведены в виде таблицы (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты вычислений эффективной диэлектрической проницаемости четырехслойного диэлектрика

Метод последовательно соединенных конденсаторов	Формула Лихтенеккера	Формула Ландау и Лифшица	Формула Оделевского
2,980	3,245	3,345	3,334

Результаты показывают, что значения эффективной диэлектрической проницаемости композиционного диэлектрика незначительно отличаются в расчетах по формулам Лихтенеккера, Ландау-Лившица и Оделевского. Наибольшее расхождение 11 % наблюдается в расчетах по формуле Оделевского с методом последовательно соединенных конденсаторов.

Список литературы:

1. Томилин, В. И. Физическое материаловедение: в 2 ч. Ч. 1. Пассивные диэлектрики: учеб. пособие / В. И. Томилин, Н. П. Томилина, В. А. Бахтина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 280 с. – Текст: непосредственный.
2. Серебряков, А. С. Материаловедение. Электроизоляционные материалы / А. С. Серебряков. – М. : МИИТ. – 2009. – 159 с. – Текст: непосредственный.
3. Гусев, Ю. А. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам: учебное пособие / Ю. А. Гусев. – Казань, КГУ. – 2008. – 129 с. – Текст: непосредственный.
4. Поплавко, Ю. М. Физика активных диэлектриков / Ю. М. Поплавко, Л. П. Переверзева, И. П. Раевский. – Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ. – 2009. – 480 с. – Текст: непосредственный.
5. Трофимова, Т. И. Физика / Т. И. Трофимова. – М.: КноРус, 2023. – 27 с. – Текст: непосредственный.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН КРУГЛОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЙ

студент **Осипов Василий Игоревич**,
науч. руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент
Демина Маргарита Юрьевна,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе рассматривается максимальное напряжение, возникающее в цилиндрических пружинах с круглым и прямоугольным сечением. Анализ проводится на основе теоретических основ механики материалов и методов расчета напряжений. Работа включает сравнительный анализ предельных состояний обеих типов пружин. Результаты исследования могут быть полезны для инженеров и проектировщиков при выборе оптимальных решений для конкретных механических систем.

Ключевые слова: пружина, форма сечений, максимальное напряжение, деформация, нагрузка.

CALCULATION OF THE MAXIMUM STRESS OF CYLINDRICAL SPRINGS OF ROUND AND RECTANGULAR CROSS-SECTIONS

Student **Osipov Vasily Igorevich**,
Academic Advisor: PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor
Demina Margarita Yurievna,
Saint Petersburg University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This paper examines the maximum stress occurring in cylindrical springs with a circular and rectangular cross-section. The analysis is based on the theoretical foundations of material mechanics and stress calculation methods. The work includes a comparative analysis of the limit states of both types of springs. The results of the study can be useful for engineers and designers when choosing optimal solutions for specific mechanical systems.

Keywords: spring, cross-section shape, maximum stress, deformation, load.

Цилиндрические пружины играют ключевую роль в механических системах, обеспечивая упругость и способность к деформации под нагрузкой. Однако, несмотря на их широкое применение, проблема определения максимального напряжения, возникающего в пружинах с различными

сечениями, остается актуальной. Разные геометрические формы сечений, такие как круглое и прямоугольное, могут существенно влиять на прочностные характеристики пружин, что требует глубокого анализа и понимания [1–3].

Цель данной работы заключается в исследовании влияния геометрических параметров пружин на их максимальное напряжение, а также в сравнении поведения пружин с круглым и прямоугольным сечением под нагрузкой. В рамках этой работы будет рассмотрено, как различные факторы, такие как диаметр и форма сечения, влияют на прочность и устойчивость пружин.

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения надежности и долговечности пружин в различных отраслях, таких как автомобилестроение, авиация и машиностроение. В условиях современного производства, где требования к качеству и безопасности постоянно растут, понимание поведения пружин с различными сечениями становится особенно важным.

В основной части работы проводится детальный анализ поведения цилиндрических пружин с круглым и прямоугольным сечением, а также расчет максимального напряжения, что позволит глубже понять механизмы, лежащие в основе их работы.

Проведено сравнение максимальных касательных напряжений, возникающих при деформации пружин круглого и прямоугольного сечений [3–4].

Цилиндрические пружины, выполненные из проволоки круглого сечения представлены на рис. 1.

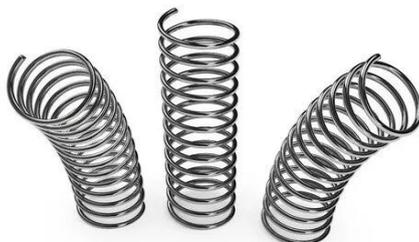


Рисунок 1 – Цилиндрические пружины круглого сечения

Эпюра касательных напряжений имеет вид – см. рис. 2.

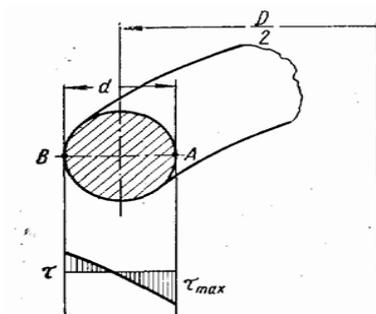


Рисунок 2 – Эпюра касательных напряжений τ в поперечном сечении витка пружины из проволоки круглого сечения

Максимальное касательное напряжение, возникающее на внутренней поверхности витка пружины, равно:

$$\tau_{max} = K \frac{8PD}{\pi d^3}, \quad (1)$$

где K – поправочный коэффициент, учитывающий криволинейность оси витков пружины и влияние поперечной силы;

P – сила, действующая вдоль оси пружины;

D – средний диаметр витка;

d – диаметр проволоки, из которой изготовлена пружина.

Коэффициент K зависит от индекса пружины c (рис. 3).

$$K = \frac{4c + 2}{4c - 3}, \quad (2)$$

где индекс пружины c – отношение диаметра витка к диаметру проволоки.

$$c = \frac{D}{d}. \quad (3)$$

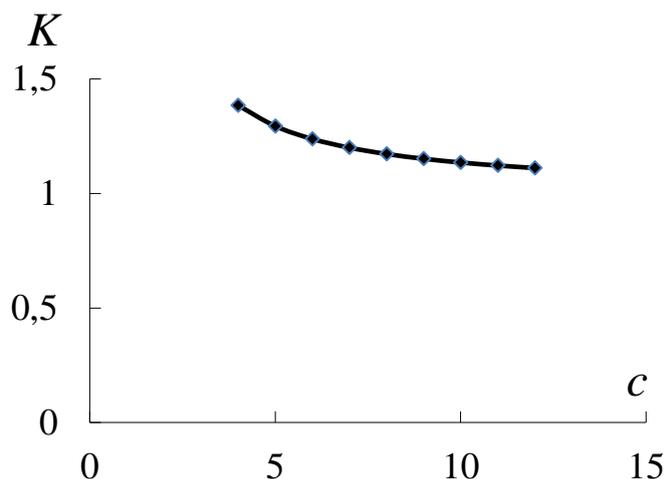


Рисунок 3 – Зависимость поправочного коэффициента от индекса пружины круглого сечения

На рис. 4 показаны расчетные зависимости максимального касательного напряжения τ_{max} для витых цилиндрических пружин со значениями индекса c , выполненных из проволоки круглого сечения, от приложенной нагрузки P .

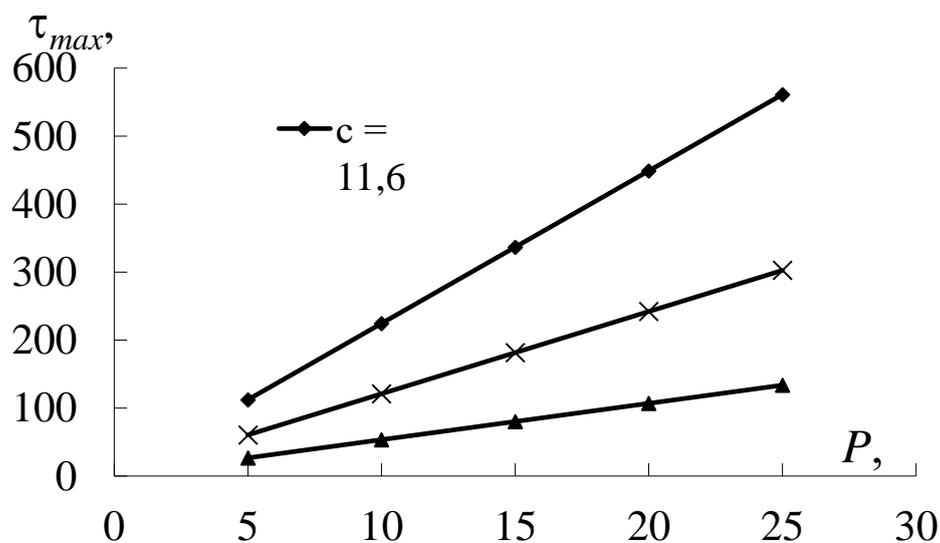


Рисунок 4 – Зависимость максимального касательного напряжения для витых цилиндрических пружин со значениями индекса c , выполненных из проволоки круглого сечения, от приложенной нагрузки

Для сравнения максимальные касательные напряжения при таких же нагрузках рассчитывали в пружинах, выполненных их проволоки прямоугольного сечения (рис. 5).



Рисунок 5 – Пружины, изготовленные из проволоки прямоугольного сечения

В пружинах прямоугольного сечения опасной точкой является средняя точка поперечного сечения на внутренней стороне витка (рис. 6).

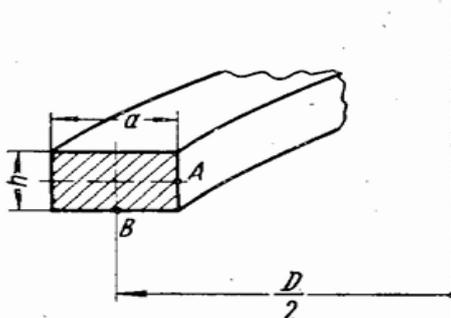


Рисунок 6 – Точки с наибольшим касательным напряжением в пружине из проволоки прямоугольного сечения

Максимальное касательное напряжение в точке A определяется по формуле:

$$\tau_A = K' \frac{PD}{a^2 h}, \quad (4)$$

где коэффициент зависит от отношения сторон сечения $\frac{h}{a}$ и индекса пружины

$$c = \frac{D}{a}. \quad (5)$$

У пружин с индексом $c = \frac{D}{a} > 6$ при отношении сторон прямоугольного сечения $\frac{h}{a} < 0,8$ опасной может оказаться точка B , напряжения в которой определяются по формуле:

$$\tau_B = K'' \frac{PD}{a^2 h}. \quad (6)$$

На рис. 7 показаны результаты расчетов максимального касательного напряжения в пружинах прямоугольного сечения одинакового индекса c , но различного отношения сторон поперечного сечения h/a [5].

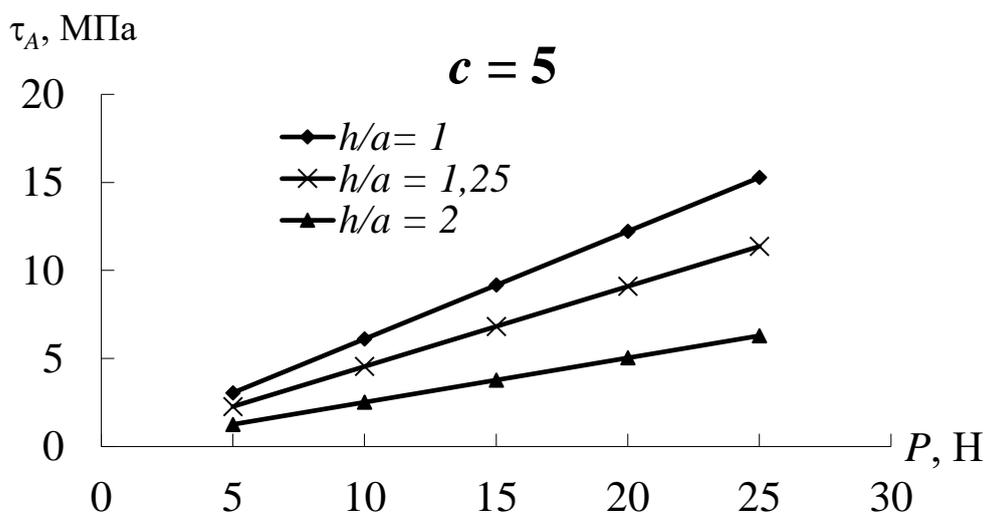


Рисунок 7 – Зависимость максимального касательного напряжения от нагрузки для пружин прямоугольного сечения с индексом $c = 5$

В результате проведенного анализа максимального напряжения в цилиндрических пружинах с круглым и прямоугольным сечением можно сделать ключевой вывод: максимальное напряжение в пружинах зависит от их геометрических характеристик и материала. Пружины с круглым сечением, как правило, обеспечивают более равномерное распределение напряжений, что способствует их долговечности и надежности. В то же время пружины с прямоугольным сечением могут демонстрировать более высокие значения максимального напряжения из-за концентрации нагрузок в угловых зонах, что

требует более тщательного подхода к проектированию. Результаты данного исследования подчеркивают необходимость проведения расчетов и анализа при проектировании пружин, чтобы избежать потенциальных отказов и обеспечить их эффективную работу в различных механических системах.

Список литературы:

1. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / Феодосьев В. И. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана 1999. – 592 с. – Текст: непосредственный.
2. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет. К. В. Фролов и др. – М.: Машиностроение. – 1994. – Т. 1–3. – В 2-х кн. – Кн. 1. Динамика и прочность машин. Теория машин и механизмов. – 533 с. – Текст: непосредственный.
3. Дробот, В. А. Прикладная механика / В. А. Дробот, А. С. Брусенцов. – Санкт-Петербург : Лань. – 2025. – 180 с. – Текст: непосредственный.
4. Расчеты на прочность в машиностроении / Под ред. С. Д. Пономарева. – Т. 1. Теоретические основы и экспериментальные методы. Расчеты стержневых элементов конструкций при статической нагрузке. – М.: Машгиз, 1956. – 884 с. – Текст: непосредственный.
5. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М.: Изд-во Машиностроение. – 1980. – 326 с. – Текст: непосредственный.

© Осипов В. И., 2025

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГТУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ

магистрант **Бикмухаметова Елизавета Эдуардовна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой АТиТ
Сенюшкин Николай Сергеевич,
Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В статье приведено построение и базовый расчет газотурбинных установок для дальнейшего расчета этих же установок на различных топливных смесях. Произведен расчет и анализ параметров работы ГТУ в зависимости от содержания водорода и метана. Представлена зависимость КПД от содержания водорода в топливной смеси с метаном. Рассмотрена возможность и перспектива использования различных топливных смесей при работе ГТУ.

Ключевые слова: газотурбинная установка, микротурбина, параметры ГТУ, топливная смесь, теплотворная способность, метан, водород, низшая теплота сгорания.

COMPUTATIONAL STUDY OF GTU OPERATION PARAMETERS USING METHANE-HYDROGEN MIXTURES

Master Student **Bikmukhametova Elizaveta Edyardovna**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor, Head of AT&T Department
Senyushkin Nikolay Sergeevich,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation

Abstract. The article presents the construction and basic calculation of gas turbine installations, for further calculation of the same installations on various fuel mixtures. Calculation and analysis of GTU operation parameters depending on the content of hydrogen and methane. The dependence of efficiency on the hydrogen content in the fuel mixture with methane is shown. The possibility and prospect of using various fuel mixtures in the operation of GTU.

Keywords: gas turbine unit, microturbine, GTU parameters, fuel mixture, calorific value, methane, hydrogen, low heat of combustion.

Сейчас остро стоит вопрос глобального потепления. Для возможности решения этой проблемы, мир стремится перейти к производству и эксплуатации техники с минимальным выбросом вредных веществ [1].

Возникает интерес к использованию нетрадиционных источников энергии. Одним из возобновляемых источников является водород.

При окислении водород не выделяет вредных веществ, таких как CO, CO₂, SO_x и сажа. Однако при использовании водорода в качестве компонента топливной смеси в газотурбинных горелках возникают определенные технические сложности. Например, повышается уровень образования оксидов азота (NO_x) из-за увеличения температуры сгорания. При значительном увеличении содержания водорода в топливной смеси необходима модификация газотурбинных горелок [2].

Проведено исследование по использованию различного вида топлива. Построены графики зависимости изменения основных характеристик турбины при добавлении в топливную смесь метана водород от 0 до 100 %.

Была смоделирована (рис. 1) и рассчитана газотурбинная установка Capstone C30.

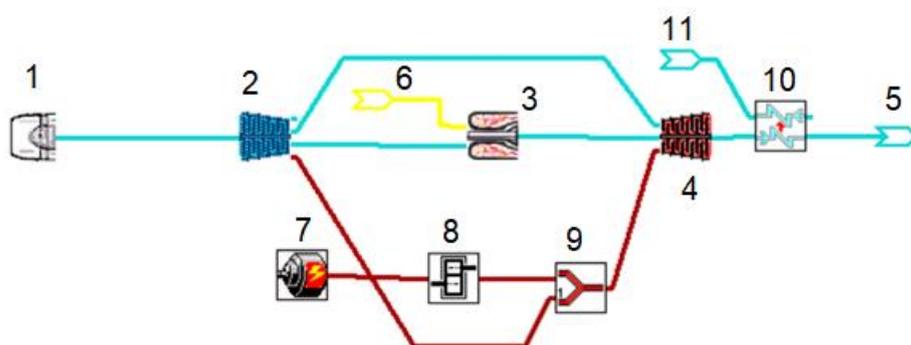


Рисунок 1 – Расчетная схема для термодинамического расчета Capstone C30:
1 – входное устройство; 2 – компрессор; 3 – камера сгорания; 4 – газовая турбина; 5 – выходное устройство; 6 – вход топлива; 7 – источник-потребитель мощности; 8 – редуктор; 9 – суммирование мощности; 10 – рекуператор (теплообменник); 11 – вход газа

Для сравнения также смоделирована турбины ГТЭ-10/95 (рис. 2).

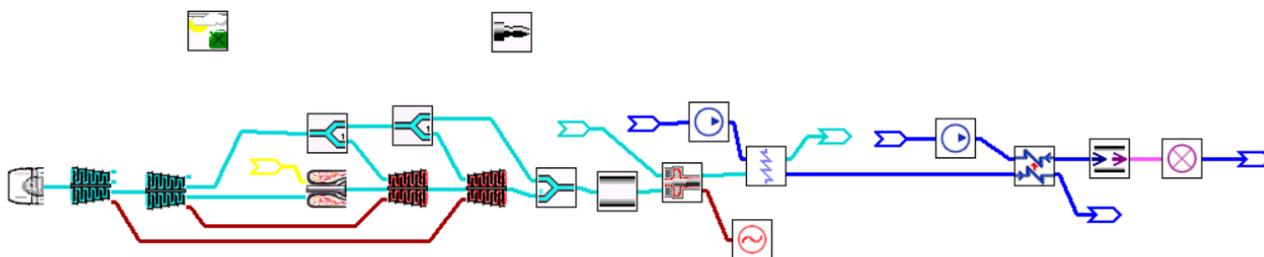


Рисунок 2 – Расчетная схема для термодинамического расчета ГТЭ-10/95

Рассчитана низшая теплота сгорания при различном содержании в топливной смеси водорода, значения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Низшая теплота сгорания различных топливных смесей

Содержания метана, %	Содержания водорода, %	Низшая теплота сгорания, кДж/нм ³
100	0	35850,0
90	10	33350,6
80	20	30851,2
70	30	28351,8
60	40	25852,4
50	50	23353,0
40	60	20853,6
30	70	18354,2
20	80	15854,8
10	90	13355,4
0	100	10856,0

Ниже представлена таблица 2 с КПД газотурбинной установки Capstone C30, работающей на различных топливных смесях.

Таблица 2 – Изменение КПД турбины Capstone в зависимости от изменения содержания водорода в топливной смеси

Содержание метана, %	Содержание водорода, %	КПД, %
100	0	26,033
90	10	26,232
80	20	26,378
70	30	26,485
60	40	26,560
50	50	26,604
40	60	26,616
30	70	26,586
20	80	26,491
10	90	26,263
0	100	25,640

Ниже представлена таблица 3 с КПД газотурбинной установки ГТП-10/95, работающей на различных топливных смесях.

Таблица 3 – Изменение КПД турбины ГТП-10/95 в зависимости от изменения содержания водорода в топливной смеси

Содержание метана, %	Содержание водорода, %	КПД, %
100	0	22,5973
90	10	22,7492
80	20	22,8610
70	30	22,9427
60	40	22,9993
50	50	23,0329
40	60	23,0418
30	70	23,0189
20	80	22,9457
10	90	22,7702
0	100	22,2911

Выведем формулу электрического КПД для ГТУ.

1. Эффективный КПД:

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{\text{ксс}}} = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_r \cdot C_e} \quad (1)$$

2. Удельный расход топлива:

$$C_e = \frac{G_{\text{тч}}}{N_e} \quad (2)$$

Подставив формулу (2) в (1) получим:

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot N_e}{H_u \cdot \eta_r \cdot G_{\text{тч}}} \quad (3)$$

3. Мощность на выходном валу:

$$N_e = N_T \cdot \eta_T - N_K \quad (4)$$

4. Часовой расход топлива:

$$G_{\text{т.час}} = G_T \cdot 3600 \quad (5)$$

5. Расход топлива в камере сгорания:

$$G_T = G_{\text{кс}} \cdot q_T \quad (6)$$

Подставляя все в формулу (3), получим:

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot (N_T \cdot \eta_T - N_K)}{H_u \cdot \eta_r \cdot 3600 \cdot G_T} = \frac{N_T \cdot \eta_T - N_K}{H_u \cdot \eta_r \cdot G_T} \quad (7)$$

Таблица 4 – Параметры газотурбинной установки Capstone C30

Содержание метана, %	Содержание водорода, %	Мощность турбины, кВт	Мощность компрессора, кВт	Расход топлива, т/ч	Низшая теплотворная способность, кДж/нм ³
100	0	73,87	42,993	0,00829	35850,0
90	10	73,87	42,993	0,00720	33350,6
80	20	73,87	42,993	0,00637	30851,2
70	30	73,87	42,993	0,00572	28351,8
60	40	73,87	42,993	0,00518	25852,4
50	50	73,87	42,993	0,00475	23353,0
40	60	73,87	42,993	0,00439	20853,6
30	70	73,87	42,993	0,00407	18354,2
20	80	73,87	42,993	0,00382	15854,8
10	90	73,87	42,993	0,00360	13355,4
0	100	73,87	42,993	0,00349	10856,0

Таблица 5 – Параметры газотурбинной установки ГТП-10/95

Содержание водорода, %	Мощность ТНД, кВт	Мощность ТВД, кВт	Мощность КНД, кВт	Мощность КВД, кВт	Расход топлива, т/ч	Низшая теплотворная способность, кДж/нм ³
0	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	2,547	35850,0
10	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	2,216	33350,6
20	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,962	30851,2
30	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,760	28351,8
40	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,597	25852,4
50	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,463	23353,0
60	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,350	20853,6
70	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,255	18354,2
80	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,176	15854,8
90	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,111	13355,4
100	6464,793	8423,819	6400,145	8297,462	1,068	10856,0

Как видно из таблицы, мощность компрессора и турбины не зависит от используемого топлива, следовательно, эффективный КПД установки зависит только от расхода топлива и низшей теплотворной способности.

1. Расход топлива в камере сгорания:

$$G_T = G_{KC} \cdot q_T \quad (8)$$

2. Относительный расход топлива:

$$q_T = \frac{G_{TC}}{G_{KC}} = \frac{i_{вг}^* - i_{вк}^*}{Hu \cdot \eta_{г} - i_{тг}^* + i_{г0}} = \frac{c_p T_{г}^* - c_p T_{к}^*}{Hu \cdot \eta_{г} - n T_{г}^* + n T_0} \quad (9)$$

3. Расход воздуха в камере сгорания:

$$G_{KC} = G_B \cdot (1 - \overline{G_{охл}} - \overline{G_{отб}} - \overline{G_{ут}}) \quad (10)$$

Подставим выражение (9) и (10) в уравнение (8):

$$G_T = G_{KC} \cdot q_T = G_B \cdot (1 - \overline{G_{охл}} - \overline{G_{отб}} - \overline{G_{ут}}) \cdot \frac{c_p T_{г}^* - c_p T_{к}^*}{Hu \cdot \eta_{г} - n T_{г}^* + n T_0} \quad (11)$$

Т. к. моделируя термодинамический расчет, мы берем температуры неизменными, а также отборы и расход охлаждающего воздуха остается неизменным, следовательно, расход топлива зависит только от низшей теплотворной способности топливной смеси [3 - 5].

Построили графики изменения КПД при увеличении содержания водорода в топливной смеси (рис. 3, 4).

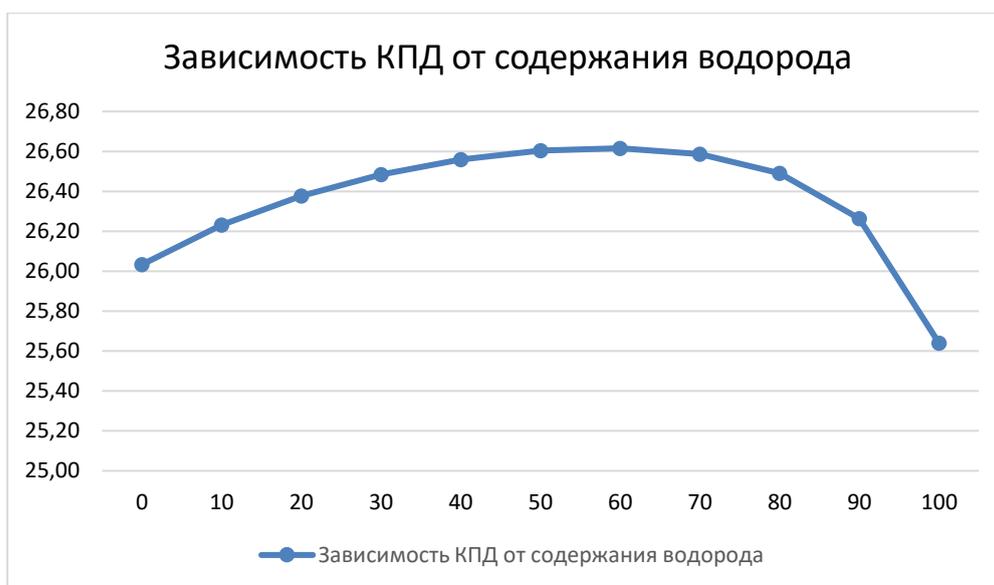


Рисунок 3 – Зависимость КПД от содержания водорода расчет микротурбины Capstone C30

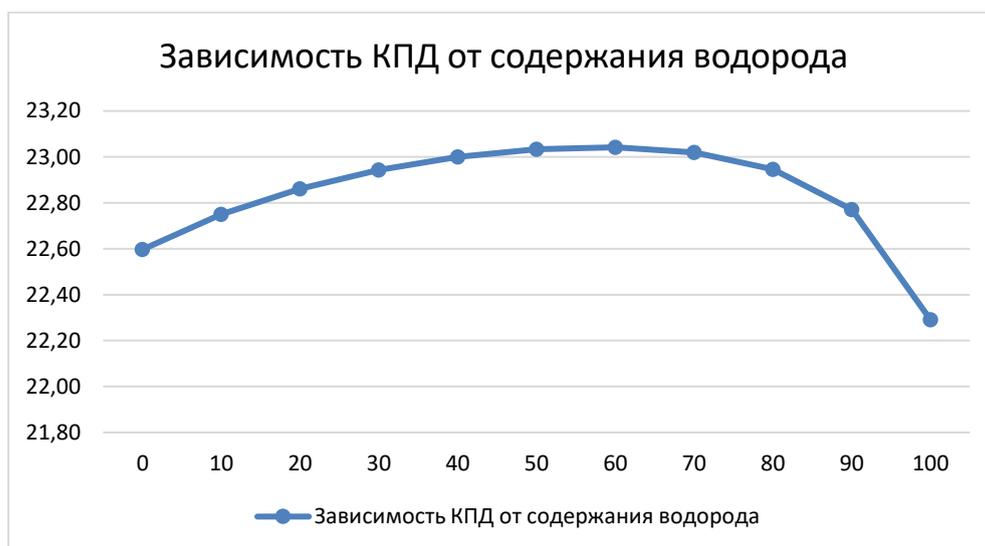


Рисунок 4 – Зависимость КПД от содержания водорода расчет турбины ГТЭ-10/95

Исходя из полученных результатов, проанализировав графики, можем сделать вывод, что с увеличением в топливной смеси доли водорода до 60 % КПД установки повышается примерно. Уменьшается расход топлива. Водород является более экологичным, а следовательно уменьшается количество вредных выбросов. Реализовать все эти плюсы возможно без изменения конструкции ГТУ. После увеличения содержания водорода выше, чем на 60 % КПД начинает расти, что вызвано проскоком пламени [6, 7]. Сжигание богатого водородом топлива увеличивает риск проскока пламени из-за более высокой скорости пламени или более короткого времени задержки воспламенения по сравнению с метаном. Возникает опасность и охрупчивания металла, повышается риск взрывоопасности. Использование топливной смеси с высоким содержанием водорода требует изменения конструкции газотурбинных горелок.

Список литературы:

1. Марьин, Г. Е. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки / Г. Е. Марьин, Б. М. Осипов, Д. И. Менделеев. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 5. – С. 41-51.
2. Возобновляемая энергетика: типы, преимущества и недостатки, развитие и перспективы // Renwex 2025 : [сайт]. – URL: <https://www.renwex.ru/ru/ii/> (дата обращения: 6.04.2025). – Текст: электронный.
3. Максимов, В. Водород – основа энергетики будущего / В. Максимов // elec.ru: [сайт]. – URL: <https://www.elec.ru/publications/> (дата обращения: 6.04.2025). – Текст: электронный.
4. Федоров, Б. Г. Экономико-экологические аспекты выбросов углекислого газа в атмосферу / Б. Г. Федоров. – Текст: непосредственный // Проблемы прогнозирования. – 2004. – С. 86-101.
5. Алфаяд, Г. Х. Возможность применения водорода как топлива для будущей работы газовой турбины / Г. Х. Алфаяд. – Текст: непосредственный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2022. – № 4. – С. 18-24.
6. Родионов, А. В. Анализ термодинамических параметров зарубежных малоразмерных газотурбинных установок / А. В. Родионов, И. А. Кривошеев. – Текст : электронный // Молодой ученый. – 2009. – № 9 (9). – С. 21-24. –URL: <https://moluch.ru/archive/9/683/> (дата обращения: 18.10.2023).
7. Шаймарданов, Т. В. Влияние режимных параметров ГТУ на уровень эмиссии вредных веществ / Т. В. Шаймарданов, Н. С. Сенюшкин. – Текст: непосредственный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2019. – Том 1. – С. 160-163.

© Бикмухаметова Е. Э., 2025

ПРОЕКТ ВЕТРОПАРКА НА БЕРЕГУ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

д-р техн. наук, профессор **Немировский Александр Емельянович**,
канд. техн. наук, доцент **Сергиевская Ирина Юрьевна**,
канд. техн. наук, доцент **Кичигина Галина Анатольевна**,
студент **Чебыкин Никита Александрович**,
Вологодский государственный университет,
г. Вологда, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые параметры выбора ветроустановки, включая аэродинамические характеристики, расчет площади размещения и диаметр ротора. Представлены расчеты мощности и эффективности работы установки. Обоснован выбор конкретной модели ВЭУ на основе ее технических преимуществ по сравнению с аналогами, что подтверждает ее практическую целесообразность.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветропарк, электроэнергия, генератор, ветер, турбина.

THE PROJECT OF A WIND FARM ON THE SHORE OF THE RYBINSK RESERVOIR

Doctor in Engineering, Professor **Nemirovsky Alexander Yemelyanovich**,
PhD in Engineering, Associate Professor **Sergievskaia Irina Yurievna**,
PhD in Engineering, Associate Professor **Kichigina Galina Anatolyevna**,
Student **Chebykin Nikita Aleksandrovich**,
Vologda State University,
Vologda, Russian Federation

Abstract. The article discusses the key parameters of choosing a wind turbine, including aerodynamic characteristics, calculation of the placement area and the diameter of the rotor. Calculations of the power and efficiency of the installation are presented. The choice of a specific wind turbine model based on its technical advantages over analogues is justified, which confirms its practical feasibility.

Keywords: wind power, wind farm, electric power, generator, wind, turbine.

Ветроэнергетика является областью энергетики, в которой электроэнергия производится за счет энергии ветра. Ветряные турбины являются основным элементом установки, они преобразовывают кинетическую энергию ветра в механическую энергию, а генератор преобразует механическую энергию в электрическую.

Актуальность работы обусловлена тем, что вопрос энергосбережения на сегодняшний день очень важен. Рост, развитие, модернизация промышленности ведет к увеличению энергопотребления. В этот период предприятия и потребители вынуждены искать пути сокращения затрат на электроэнергию и повышения своей энергоэффективности.

В наше время интерес к возобновляемым источникам энергии значительно вырос. Это можно объяснить растущими потребностями мировой экономики в энергоресурсах, ограниченными запасами традиционного топлива, углеродных ресурсов. Все большее внимание уделяется переходу к новым способам получения энергии, развитие альтернативной энергетики является основным путем повышения энергетической безопасности, снижения энергетической нагрузки и усилением конкуренции на мировом рынке. В этих условиях проект ветропарка наиболее актуален [1].

Ветроэнергетический потенциал территории определяется как суммарная энергия воздушного потока на определенной высоте. Поскольку скорость ветра постоянно меняется во времени и зависит от конкретного места, для ее анализа применяют вероятностный подход. Это позволяет учитывать нестабильность ветровых условий. На практике чаще всего применяется метод временной дискретизации, который предполагает, что в рамках заданного времени, параметры ветра считаются неизменными и независимыми друг от друга.

Для оценки потенциала использования ветра основным фактором является ветровой ресурс региона. Для его оценки используются специальный официальный источник – ветроэнергетический кадастр. Он составляется на основе метеорологических наблюдений и включает в себя ключевые характеристики ветра: направление, скорость, силу и повторяемость.

В кадастре указываются показатели ветра:

- усредненная скорость ветра за разные периоды;
- повторяемость и цикличность скоростей, тип распределения;
- удельные показатели мощности и энергии ветра;
- оценка общего ветроэнергетического ресурса местности.

Для изучения преобладающего направления ветра в регионе строится роза ветров (рис. 1), она представляет собой круговую диаграмму, отображающую направление и силу ветра на данной территории. Чем длиннее луч, тем сильнее ветер в этом направлении.

При строительстве ВЭС следует учитывать основное и более сильное направление ветра на выбранной площади, а также необходимо соотносить с ландшафтом местности [2].

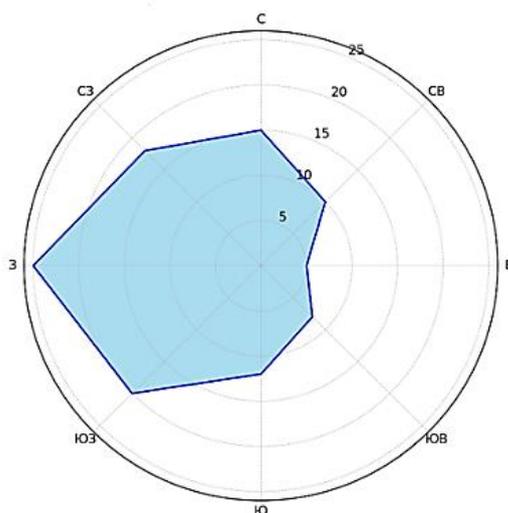


Рисунок 1 – Роза ветров Череповецкого района

В результате анализа ветропотенциала в предполагаемом месте размещения ветропарка формируются следующие необходимые характеристики:

- пересчет значений усредненной скорости для каждого месяца, с учетом высоты, на которой устанавливается башня ветроустановки;
- графическое построение розы ветров для данной территории;
- распределение скорости воздушного потока на высоте оси генератора, по категориям в течение года;
- анализ среднесуточной, среднемесячной и среднегодовой скорости ветра, на основе архивных наблюдений за период от 5 до 10 лет;

В совокупности эти параметры дают возможность обоснованно выбрать тип и мощность ветроустановки, обеспечить грамотную установку на местности и внедрение в существующую систему энергоснабжения.

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) используются как основной или резервный источник питания для потребителей, которые находятся в удаленных от электросетей районах, также с учетом увеличивающихся тарифов на электроэнергию такие установки становятся привлекательным решением для экономии средств. Подбор ветрогенератора осуществляется по ряду технических параметров, определяющих эффективность и долговечность в конкретных условиях использования. Для оценки реальной производительности установки рассматривают один из ключевых показателей – зависимость вырабатываемой мощности от скорости воздушного потока. Эта информация содержится в техническом паспорте установки и дополняется соответствующими графиками [3].

Предварительный анализ условий ветра и сравнительные данные, представленные на официальном сайте производителя, позволяют нам выбрать для нашей местности ветрогенератор DEC-4500-155, номинальная мощность которого 4,5 МВт.

Минимальная скорость воздушного потока, при которой происходит

выработка электроэнергии составляет 2,5 м/с (рис. 2). При достижении средней скорости ветра в 10 м/с генератор способен обеспечивать выходную мощность в районе 5 МВт.

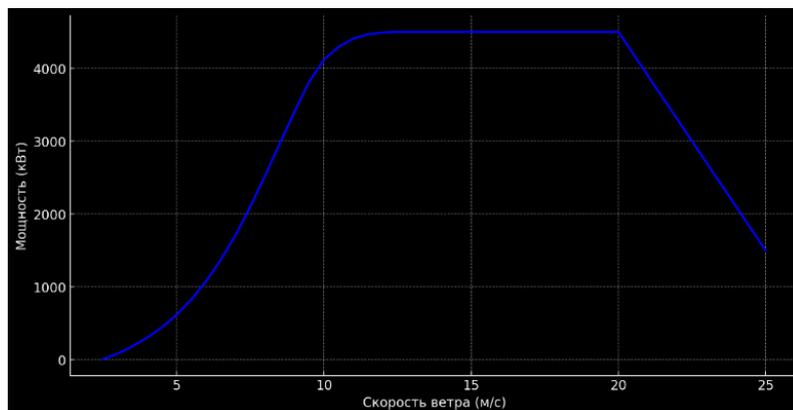


Рисунок 2 – Кривая динамической мощности ветрогенератора DEW-D4500-155

Ведущая технология управления с переменной скоростью, регулировкой шага и постоянной частотой позволяет турбине максимально использовать энергию ветра в зависимости от изменения скорости ветра. Ветряная турбина DEC имеет лучшую производительность, особенно при низкой скорости ветра. Гибкое подключение к сети с меньшим воздействием на турбину и сеть. Улучшается эксплуатационная ситуация и эффективно снижается нагрузка на турбину. Возбуждение постоянным магнитом вместо системы возбуждения снижает потери возбуждения, генератор не требует технического обслуживания. Система переменной скорости и постоянной частоты подает низкочастотный переменный ток от генератора в сеть через преобразователь полной мощности AC-DC-AC и подавляет гармоники, обеспечивая превосходное качество электроэнергии [4].

Интеллектуальная система управления ветрогенератором DEC-D4500-155 выполнена на базе Siemens PLC. Система мониторинга может автоматически отслеживать скорость и направление ветра, температуру, а также работу и сбои в работе гидравлической системы, системы тангажа, системы рысканья, генератора, преобразователя, системы охлаждения и других подсистем, датчиков, она также может собирать и анализировать данные о работе, полученные от датчиков.

Для расчета площади участка, нужного для установки ветряка, необходимо учитывать суммарную площадь основания мачты S_M и зону, которую занимают растяжки S_P .

Площадь поперечного сечения основания рассчитывается по формуле:

$$S_M = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{3,14 \times 5,1^2}{4} = 20,4 \text{ м}^2, \quad (1)$$

где d – диаметр трубы мачты.

Определяем площадь занимаемой растяжками S_P :

$$D_P = 2 \times h \times \sin \Omega = 2 \times 120 \times 0,5 = 120 \text{ м}, \quad (2)$$

где h – высота конструкции;

Ω – угол наклона растяжки.

Площадь, необходимую под размещение растяжек, представим как площадь квадрата, вписанного в окружность D_P :

$$S_P = S_{KB} = L_{KB}^2 = \frac{S_{окр}}{\pi \times 0,5} = \frac{\pi \times D_P^2}{\pi \times 4 \times 0,5} = \frac{D_P^2}{2} = \frac{120^2}{2} = 7200 \text{ м}. \quad (3)$$

Основные технические параметры ветроустановки связаны с его аэродинамическими характеристиками.

Электрическая мощность, вырабатываемая установкой, рассчитывается по формуле:

$$P_э = \xi \times P_A, \text{ Вт}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент использования энергии ветра, который для горизонтально-осевых ВЭУ составляет 0,2-0,4.

Теоретическое предельное значение, установленное Жуковским–Бетцем составляет 0,593 [5].

Аэродинамическая мощность потока воздуха определяется выражением:

$$P_A = \frac{m \times v^2}{2} = \frac{\rho \times S \times v^3}{2}, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где P_A – аэродинамическая мощность;

ρ – плотность воздуха, н. з 1,2041 кг/м³;

v – скорость ветра м/с;

V – объем воздуха, проходящий через ротор за 1 секунду, м³;

S – площадь ветроколеса через которую проходит поток.

Площадь ветроколеса, через которую проходит поток воздуха:

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4}, \text{ м}^2. \quad (6)$$

Для модели ветрогенератора DEC-D4500-155, номинальная мощность составляет – 4,5 МВт, а расчетная скорость ветра – 10 м/с.

При использовании значения коэффициента использования ветра, аэродинамическая мощность будет равна:

$$P_A = \frac{P_э}{\xi_{Ж}} = \frac{4,5}{0,593} = 7,58 \text{ МВт}. \quad (7)$$

Из формулы (5) определим площадь, которую охватывает ротор:

$$S = \frac{2 \times P_A}{\rho \times v^3} = \frac{2 \times 7,58 \times 10^6}{1,2041 \times 10^3} = 12590 \text{ м}^2. \quad (8)$$

С учетом реального уровня потерь, расчетную площадь необходимо увеличить примерно на 30-35 %:

$$S_{реал} = S \times 1,33 = 16744,7 \text{ м}^2. \quad (9)$$

Исходя из формулы (6) можно найти диаметр ротора D :

$$D = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 12590}{3,14}} = 126,6 \text{ м.} \quad (10)$$

Для расчета внешнего диаметра ветроколеса применима формула:

$$D_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{8N}{C_{\text{РР}}V^3\pi\eta_{\text{эл}}\eta_{\text{мех}}}} = 153,86 \text{ м,} \quad (11)$$

где $C_{\text{Р}}$ – коэффициент в рабочей точке, принимаем $C_{\text{Р}} = 0,46$;

$D_{\text{Р}} = 154 \text{ м}$;

$R = 77 \text{ м}$.

Таким образом, наша ВЭУ имеет следующие аэродинамические характеристики:

- аэродинамическая мощность $P_{\text{А}} = 7,58 \text{ МВт}$;
- ометаемая площадь ветроколеса $S = 125 \text{ м}^2$;
- диаметр ротора $D = 126,6$;
- внешний диаметр ветроколеса 154 м .

Чтобы обосновать выбор данной ВЭУ, можно выделить несколько важных критериев, благодаря которым она является более эффективной и подходящей по сравнению с другими типами ВЭУ:

1. Синхронный генератор с постоянными магнитами демонстрирует наилучший коэффициент полезного действия среди аналогов и обладает важными эксплуатационными достоинствами, среди которых минимальное количество движущихся частей, что снижает вероятность поломок и упрощает обслуживание, отсутствие редуктора, щеточно-коллекторного узла и системы возбуждения, что повышает надежность и уменьшает уровень шума, а также более высокая энергоэффективность в сравнении с другими генераторами [6].

2. Турбина с горизонтальной осью вращения, обеспечивает более высокий коэффициент полезного действия по сравнению с вертикальными, что объясняется рядом преимуществ, таких как более высокая скорость воздушного потока в рабочей зоне, возможность использования сервопривода для изменения угла атаки лопаток, позволяющего оптимизировать работу установки, а также повышенная мощность за счет более эффективного аэродинамического профиля лопастей.

3. Применение преобразователя напряжения.

Применение преобразователя напряжения позволяет системе стабильно выдавать электроэнергию с нужными характеристиками независимо от изменений скорости ветра, обеспечивая стабильность напряжения и частоты тока, а также возможность бесперебойного подключения к существующей энергосистеме [7].

Таким образом, выбранная ВЭУ отличается высокой эффективностью, надежностью и удобством эксплуатации, что делает ее оптимальным выбором среди доступных альтернатив.

Список литературы:

1. Безруких, П. П. Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов / П. П. Безруких. – Москва: Институт устойчивого развития, 2014. – 74 с. – Текст: непосредственный.
2. Токарева, Е. А. Выбор ветроэнергетической установки / Е. А. Токарева. – Текст: непосредственный // «Студенческие дни науки в ТГУ»: сборник студенческих работ. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. – С. 151–152.
3. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособие / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. – Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015. – 120 с. – Текст: непосредственный.
4. ГОСТ Р 57813-2017 «Энергетика ветровая. Ветроэнергетические установки. Общие требования». – Текст: непосредственный.
5. Безруких, П. П. Ветроэнергетика: справочное и методическое пособие / П. П. Безруких. – Москва: ИД «Энергия», 2015. – 320 с. – Текст: непосредственный.
6. Безруких, П. П. Ветроэнергетика / П. П. Безруких. – Москва: Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2014. – 304 с. – Текст: непосредственный.
7. Безруких, П. П. Ветроэнергетика / П. П. Безруких. – Москва: Энергия, 2014. – 665 с. – Текст: непосредственный.

© Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Кичигина Г. А., Чебыкин Н. А., 2025

КОНСТРУИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО УПАКОВКЕ ТВЕРДЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ С РАСЧЕТОМ МЕХАТРОННОГО ВИБРОБУНКЕРА

студент **Антропова Ирина Антоновна**,
студент **Воробьева Анастасия Павловна**,
науч. руководитель: ст. преподаватель **Сашенко Денис Владимирович**,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена исследованию и проектированию мехатронного вибробункера для автоматической подачи твердых лекарственных препаратов и разработке автоматической линии, где устройство является основным узлом. Разработаны структурно-функциональные схемы, приведены результаты расчетов для определения оптимальных параметров работы бункера. В САПР созданы 3D-модели деталей вибробункера, описаны основные элементы устройства, методы их изготовления и способы крепления.

Ключевые слова: вибробункер, вибрационное загрузочное устройство (ВБЗУ), проектирование, детали, расчет, таблетки, электромагнит, автоматическая линия, параметры.

CONSTRUCTION OF AN AUTOMATIC PACKAGING LINE FOR SOLID MEDICINES WITH THE CALCULATION OF A VIBRATORY BOWL FEEDER

Student **Antropova Irina Antonovna**,
Student **Vorobeva Anastasia Pavlovna**,
Academic Advisor: Senior Lecturer **Sashchenko Denis Vladimirovich**,
Moscow State Technical University named after N. E. Bauman,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The work focuses on the research and development of a mechatronic vibrating hopper for the automatic delivery of solid medications and the design of an automatic line, with the device as a key component. Structural and functional diagrams have been developed, and calculations have been performed to determine the optimal operating parameters for the hopper. Using CAD, 3D models of vibrating hopper parts have been created, describing the main components of the device, manufacturing methods, and fastening techniques.

Keywords: vibrating hopper, vibrating loading device, design, parts, calculation, tablets, electromagnet, automatic line, parameters.

Введение. Фармацевтическая промышленность имеет ряд строгих стандартов качества. Это касается и технологии упаковки. Автоматические линии по подаче и упаковке фармацевтических препаратов обеспечивают высокие требования по безопасности и надежности выпускаемой продукции, повышают скорость и эффективность производства, улучшают контроль качества и уменьшают человеческий фактор. В зависимости от выбранных характеристик линии оснащаются различными видами питателей.

При выборе питателя для данной работы основными характеристиками являлись возможность поштучной подачи заготовок, а также простота исполнения и компактность устройства [1]. В качестве оптимального решения был выбран вибрационный питатель.

Общее описание устройства линии. Автоматическая линия по упаковке медицинских изделий включает в себя несколько узлов: загрузочное устройство (ВБЗУ), транспортный узел, узел укупорки, а также систему управления. Функциональная схема представлена на рисунке 1.

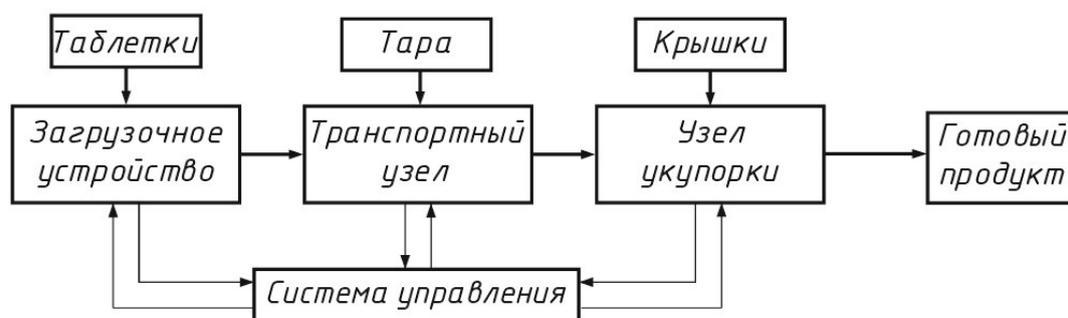


Рисунок 1 – Функциональная схема автоматической линии:

→ – логические сигналы;

→ – перемещение таблеток, тары, крышек и готового продукта

Общее устройство вибропитателя и принцип работы. Вибропитатель (рисунок 2) содержит в себе съемную коническую чашу 1, в которой выполнена спиральная канавка. Чаша с коническим дном крепится к верхней пластине 2 винтом. Коническая форма чаши обеспечивает быстрое попадание деталей на канавку. Пластина крепится к трем наклонным упругим стержням 6, которые прикреплены к нижнему основанию 7, которое в свою очередь для виброизоляции установлено на амортизаторы 8. Электровибратор 4 состоит из сердечника 5 и якоря 3, прикрепленного к пластине.

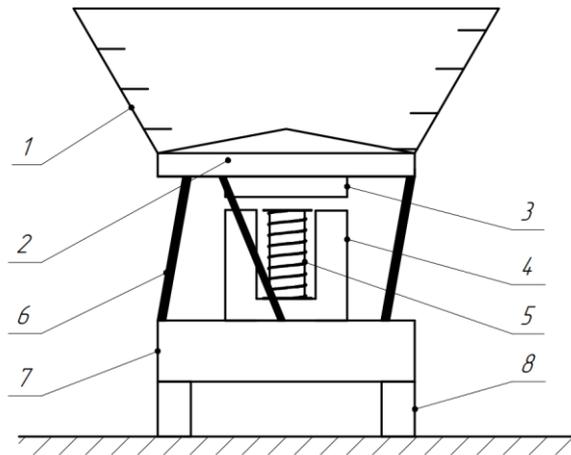


Рисунок 2 – Строение ВБЗУ

При подаче на катушку электромагнита переменного тока, посредством изгиба упругих элементов, расположенных по окружности, возвратно-поступательные движение вибратора преобразуются в винтовые колебания чаши: она сначала опускается, поворачиваясь в одну сторону, а затем поднимается, поворачиваясь в противоположную сторону. Под действием созданных вибраций изделия начинают перемещаться вверх по спиральной канавке чаши, происходит их первичная ориентация.

Список исходных данных: производительность линии $Q = 50$ шт/мин, коэффициент переполнения $k_{\text{п}} = 1,1$, масса таблетки $m = 0,5$ г, диаметр таблетки $d = 12$ мм, толщина таблетки $h = 4$ мм, коэффициент трения $f_{\text{тр}} = 0,5$, угол подъема $\alpha = 1,5 \div 3^\circ$, номинальное напряжение электровибратора $U = 220$ В, частота сети $f = 50$ Гц, время непрерывной работы $t_{\text{н}} = 600$ с.

Чаша питателя

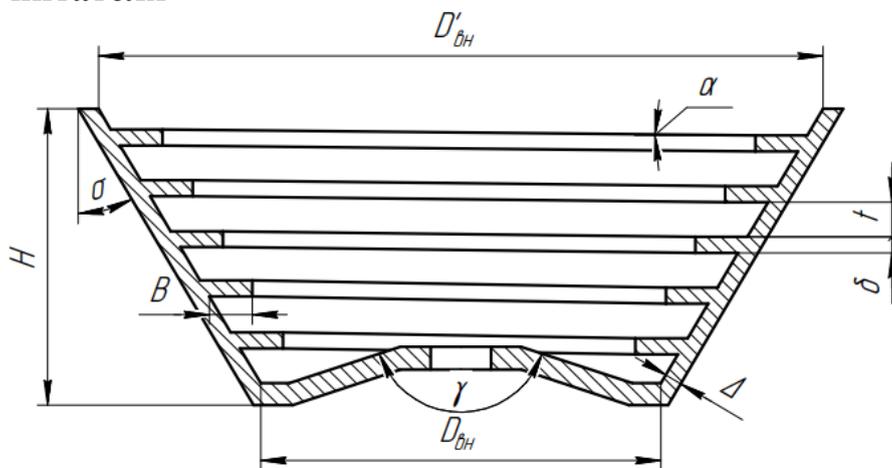


Рисунок 3 – Расчетная схема чаши ВБЗУ

По методике, изложенной в [2, с. 105], были получены основные геометрические параметры чаши.

Таблица 1 – Геометрические параметры чаши

Обозначение	Наименование	Величина
$D_{\text{вн}}$	Внутренний диаметр чаши	96, мм
B	Ширина спиральной канавки	13, мм
Δ	Толщина лотка	3, мм
δ	Толщина обечайки	3, мм
t	Шаг спиральной канавки	11, мм
σ	Угол наклона конуса	50, °
α	Угол подъема спиральной канавки	2, °
γ	Угол конуса чаши	170, °
$D'_{\text{вн}}$	Диаметр верхнего основания	155, мм
H	Высота чаши	25, мм

Чаша изготовлена из полиактида посредством технологии FDM (англ. Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления). Все дальнейшие трехмерные модели были спроектированы в Autodesk Inventor (рисунок 4). Спиральная линия, являющаяся направляющей для поперечного профиля канавки, задавалась параметрически с помощью канонического уравнения.

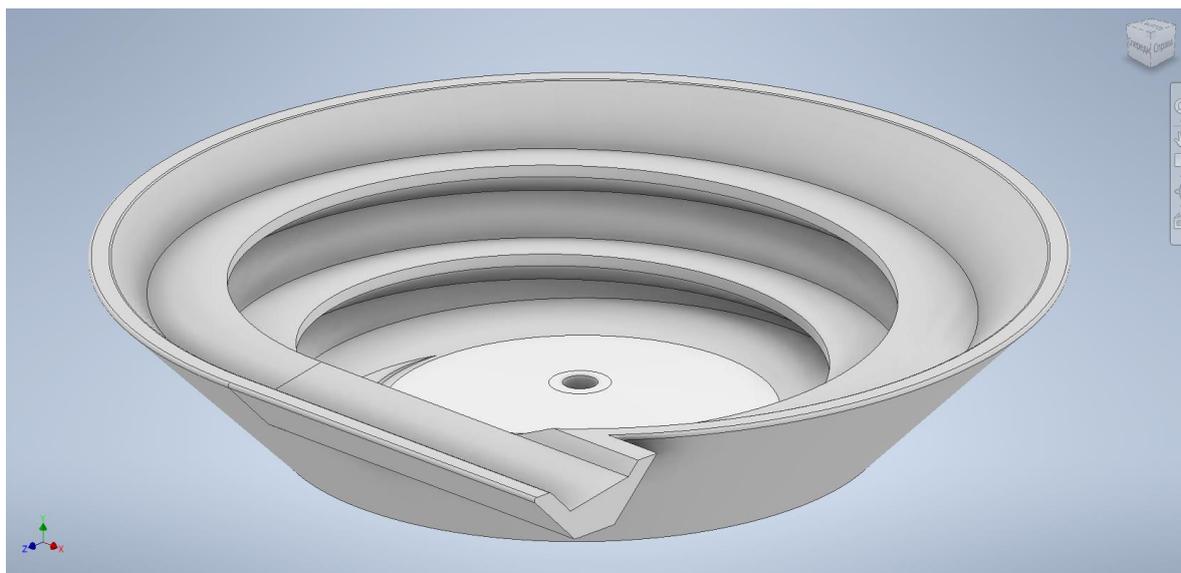


Рисунок 4 – Трехмерная модель чаши

Рассматривалось несколько вариантов конструкции чаши: с различными геометрией, материалами печати и способами заполнения слоев. Итоговый прототип имеет небольшой (5°) угол наклона канавки к внутренней стенке бункера, т. к. его отсутствие приводило к скатыванию таблетки в центр ВБЗУ. Также это решение повысило качество поверхности канавки и привело к уменьшению избыточного трения.

Определение параметров работы питателя. Наиболее эффективным режимом движения заготовки является отрывной режим (заготовка некоторую часть цикла движется, не соприкасаясь с лотком) [2]. Для его реализации требуется создание симметричного гармонического колебания.

На рисунке 5 представлены все силы, действующие на заготовку при движении по наклонному лотку. Угол α – угол подъема спиральной канавки лотка, угол β – угол бросания, с которым совпадает направление колебания лотка.

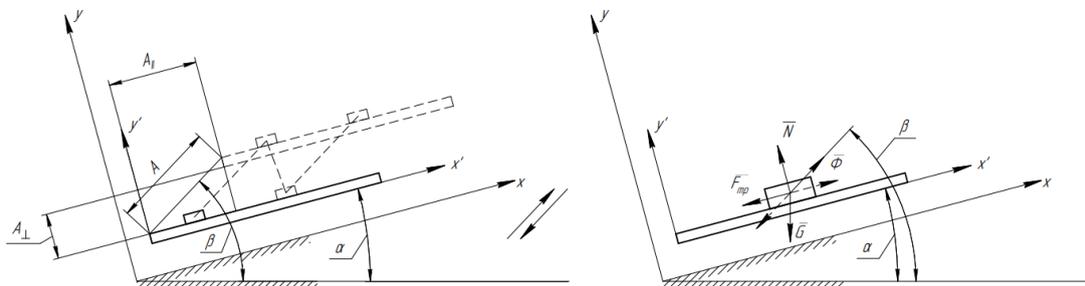


Рисунок 5 – Отрывное движение тела по вибрационному лотку

Запишем уравнения движения лотка относительно неподвижной системы координат $xу$:

$$\dot{x}_л = \frac{A_{\parallel}}{2} \omega \sin(\varphi) \quad (1)$$

$$\dot{y}_л = \frac{A_{\perp}}{2} \omega \sin(\varphi) \quad (2)$$

$$\ddot{x}_л = \frac{A_{\parallel}}{2} \omega^2 \cos(\varphi) \quad (3)$$

$$\ddot{y}_л = \frac{A_{\perp}}{2} \omega^2 \cos(\varphi), \quad (4)$$

где A – размах колебаний лотка в направлении угла бросания;

$A_{\parallel} = A \cos(\beta - \alpha)$ – размах колебаний лотка в параллельном ему направлении;

$A_{\perp} = A \sin(\beta - \alpha)$ – размах колебаний лотка в перпендикулярном ему направлении;

$\varphi = \omega t$ – фазовый угол.

На заготовку действует сила тяжести G , сила нормальной реакции N , сила трения $F_{тр} = fN$ и инерционная сила $\Phi = -ma$. Общие дифференциальные уравнения движения заготовки в относительной системе координат $x'y'$ (динамическая теорема Кориолиса):

$$m\ddot{x}' = -mg \sin(\alpha) - m \frac{A_{\parallel}}{2} \omega^2 \cos(\varphi) + F_{тр} \quad (5)$$

$$m\ddot{y}' = -mg \cos(\alpha) - m \frac{A_{\perp}}{2} \omega^2 \cos(\varphi) + N. \quad (6)$$

Наиболее распространенный вариант крепления чаши – направленная подвеска из трех тангенциально расположенных упругих элементов (рисунок 6). При таком креплении, если проекции подвесок перпендикулярны радиусу чаши в точке крепления, угол бросания равен углу их наклона.

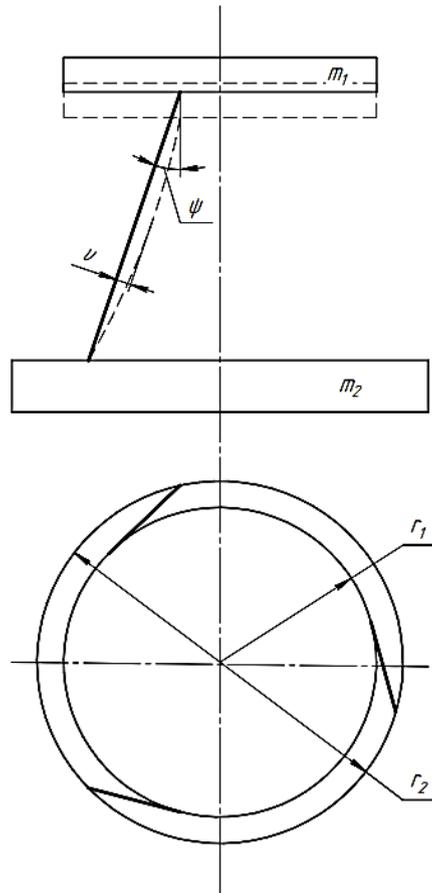


Рисунок 6 – Направленная подвеска

Процесс движения заготовки в режимах с отрывом ее от лотка может иметь от двух до пяти этапов на протяжении каждого периода колебания лотка. Исследовав подробнее несколько режимов, в качестве оптимального был выбран трехэтапный как наиболее простой в реализации.

Таблица 2 – Параметры работы ВБЗУ

Угол подъема α , °	Максимальная скорость таблеток v , м/мин	Угол наклона пружин ψ , °	Размах амплитуды чаши A , мм	Воздушный зазор электровибратора, мм
2	≤ 3	25	0,2	1,2

Этап разгона. Выражения для абсолютных скорости и ускорения таблетки:

$$\ddot{x}_p = g(f \cos \alpha - \sin \alpha) + \frac{A_{\perp}}{2} \omega^2 \cos \varphi f \quad (7)$$

$$\dot{x}_p = \frac{g}{\omega} (f \cos \alpha - \sin \alpha) \varphi + \frac{A_{\perp}}{2} f \omega \sin \varphi + C \quad (8)$$

(при $\varphi = 0, C = 0$).

Этап полета. Абсолютные ускорение и скорости таблетки во время микрополета (сопротивлением воздуха пренебречь):

$$\ddot{x}_{\Pi} = -g \sin \alpha \quad (9)$$

$$\dot{x}_{\Pi} = -g \frac{\varphi}{\omega} \sin \alpha + C. \quad (10)$$

Этап торможения. Удар таблетки после падения примем абсолютно неупругим. Абсолютные скорость и ускорение заготовки на данном этапе:

$$\ddot{x}_{\Gamma} = -g(f \cos \alpha + \sin \alpha) - \frac{A_{\perp}}{2} f \omega^2 \cos \varphi \quad (11)$$

$$\dot{x}_{\Gamma} = -\frac{g}{\omega} (f \cos \alpha + \sin \alpha) \varphi - \frac{A_{\perp}}{2} f \omega \cos \varphi + C. \quad (12)$$

Установившийся режим работы. Данный режим работы наступает после нескольких первичных колебаний, когда приращение скорости на участке разгона становится равным сумме падений скоростей на участках замедления.

Таблица 3 – Значения углов

Угол	Значение угла, рад	Наименование
φ_p	0,475	Начало разгона
φ_o	2,259	Отрыв заготовки от лотка
φ_b	6,031	Встреча заготовки с лотком
φ'_p	6,753	Начало нового разгона

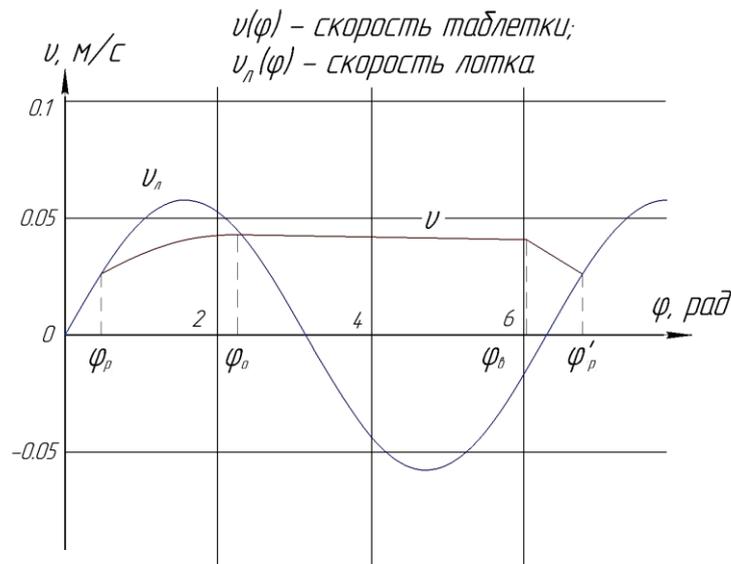


Рисунок 7 – График установившегося движения заготовки

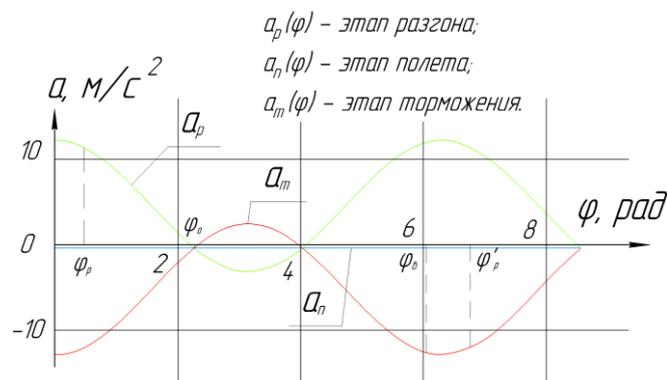


Рисунок 8 – График ускорений таблетки на трех этапах движения

Силовой расчет упругой подвески. Для расчета колебательной системы двухмассовую модель (рисунок 9) необходимо преобразовать в одномассовую. На каждую из масс действуют периодические силы, равные по модулю и противоположные по направлению [3]. В целях упрощения расчетов диссипативными силами и жесткостью амортизаторов ($c_2 \ll c_1$) пренебрегаем. Активная и реактивная массы приводятся к точкам крепления.

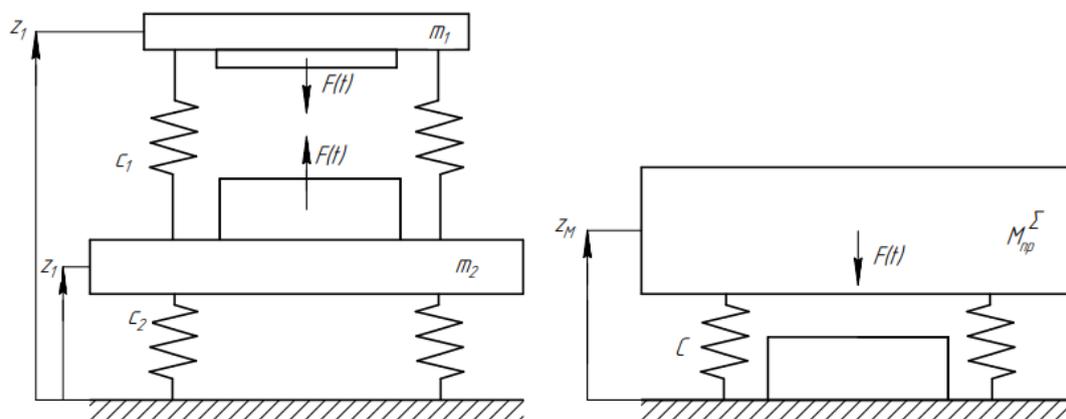


Рисунок 9 – Приведение масс устройства:

m_1 – активная масса; m_2 – реактивная масса; $M_{\Sigma}^{\text{пр}}$ – приведенная масса системы

В результате расчетов, описанных в [2, с. 117], были получены основные масс-инерционные характеристики системы.

Таблица 4 – Масс-инерционные нагрузки ВБЗУ

Деталь	Масса, кг	Момент инерции относительно оси вращения, кг · м ²
Чаша	0,13	0,44
Верхняя пластина	0,07	$9,31 \cdot 10^{-2}$
Основание	0,20	0,28
Держатель сердечника	0,03	$4,12 \cdot 10^{-3}$
Виброопоры	$0,06 \cdot 4 = 0,24$	$(3,08 + 0,06) \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,31$

Основными геометрическими характеристиками упругих элементов являются длина стержня, а также ширина и высота его поперечного сечения. Поперечное сечение представляет собой прямоугольник размерами $h \times b$. Были определены следующие параметры: длина стержня $l = 50$ мм, $b = 2$ мм, $h = 10$ мм.

Стержни подвески (рисунок 10) были также спроектированы и напечатаны из акрилонитрилбутадиенстирола. Стержни печатались горизонтально, что добавляет в конструкцию большую продольную прочность.



Рисунок 10 –Трехмерная модель стержня

Параметры электромагнита. Расчет параметров работы электромагнита сводится к определению возмущающего усилия вибратора в направлении колебаний и определению мощности электромагнита, необходимой для раскачки чаши бункера. На основе эмпирических формул вычисляются площадь сечения сердечника, необходимое число витков катушки, величина воздушного зазора, диаметр провода обмотки, а также некоторые вспомогательные параметры.

По итогам вычислений был выбран Ш-образный сердечник в соответствии с ГОСТ 20249-80 [4], набранный из пластин типа Ш12а. На основании рассчитанных данных в качестве электромагнита взят миниконтактор ЕКФ МКЭ 6А 230В 1NO PROxima Mctr-s-6-230. Он рассчитан на работу от 220 до 380 В, номинальные мощность и ток составляют 6 А и 1.4 кВт соответственно.

Регулирование мощности электромагнита. Регулировка величины возмущающего усилия осуществляется посредством изменения напряжения. Регулирование осуществляется на основе симисторного регулятора мощности, действие которого основано на принципе фазового управления.

Большинство современных вибрационных питателей работает в околорезонансном режиме, который обеспечивает значительные усилия на рабочем органе при малой возмущающей силе [5]. ВБЗУ необходимо настраивать на работу на поднимающейся ветви резонансной кривой, т.н. дорезонансный режим. Такая настройка системы имеет ряд преимуществ: снижает чувствительность системы к изменению затухания и обеспечивает стабильную работу при различной загрузке чаши, а также максимальное значение магнитного силового потока электромагнитного вибратора совмещается с минимальным значением воздушного зазора между статором и якорем, в результате чего значительно уменьшается ток холостого хода. Настройка вибропитателя осуществлялась с помощью осциллографа при варьировании параметров регулятора (его переменных сопротивлений). Исследование различных видов настройки питателя на работу в резонанс и зарезонансный режим, подтверждают резкое снижение производительности и устойчивости системы при различной заполняемости чаши.

Сборка мехатронного вибробункера. Элементы крепежа магнитов (прокладки и траверса), реактивная масса и станина также были спроектированы и изготовлены посредством аддитивных технологий. Все элементы крепятся с помощью винтов и сплавляемых резьбовых втулок.

Использование разъемного крепежа делает всю конструкцию быстросъемной. Сборка ВБЗУ представлена на рисунке 11, итоговый прототип – на рисунке 12.

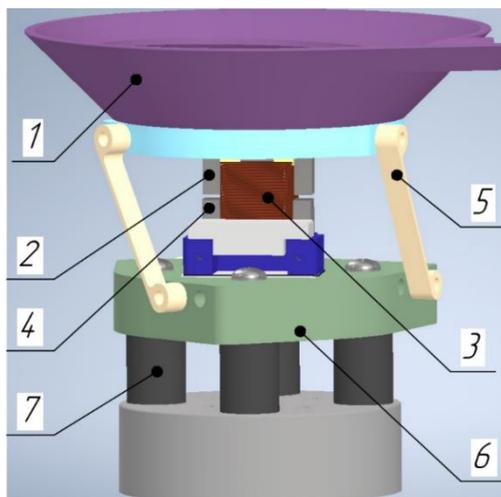


Рисунок 11 – Сборка ВБЗУ в Autodesk Inventor:

1 – коническая чаша; 2 – якорь; 3 – катушка; 4 – сердечник; 5 – упругие стержни; 6 – нижняя пластина (реактивная масса); 7 – виброопоры

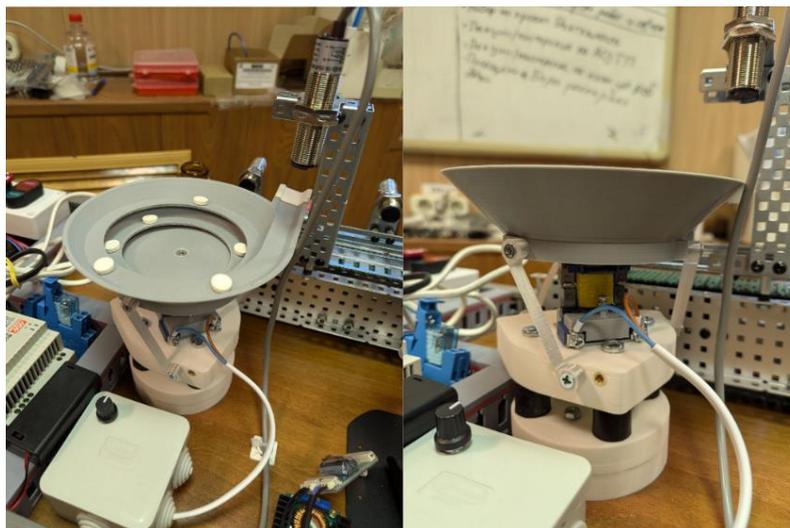


Рисунок 12 – Прототип ВБЗУ

Создание автоматической линии (АЛ). АЛ загружает таблетки, количество которых задается программно, в тару, после чего происходит ее укупор. Линия включает в себя 3 узла:

- загрузочный узел (ВБЗУ);
- транспортный узел;
- узел укупора.

Транспортный узел включает в себя транспортер, датчики контроля положения тары и стоперы для нее. Были выбраны диффузионные оптические датчики с возможностью регулировки расстояния срабатывания ввиду их дешевизны. Стоперы представляют собой линейные электромагнитные

соленоиды.

Узел укупора включает в себя манипулятор с плоскопараллельной кинематикой, рабочим органом которого является вакуумная присоска. В системе были известны ряд конечных положений рабочего органа манипулятора, на их основании вычислены углы поворота сервоприводов для достижения заданных положений (обратная задача кинематики).

Также посредством технологии FDM был изготовлен склиз для банок. Он обеспечивает их постоянную заполняемость, а датчик, аналогичный установленным на транспортном узле, сигнализирует о их отсутствии.

Для управления АЛ было выбрано программируемое реле ПР200. Принципиальная электрическая схема АЛ представлена на рисунке 13.

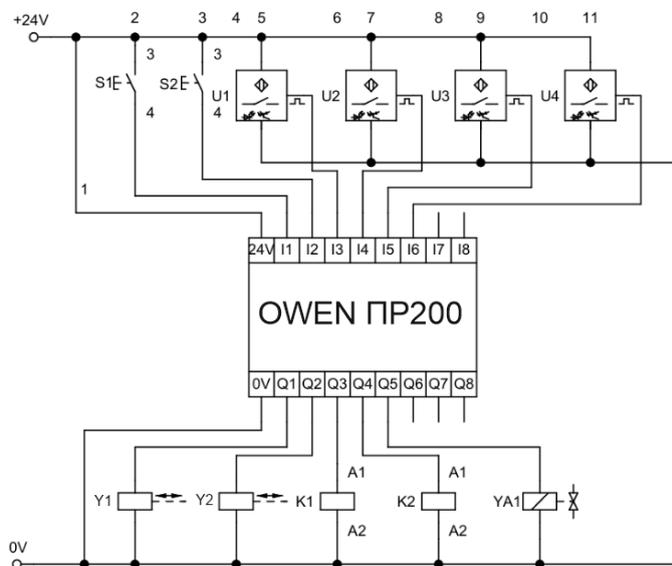


Рисунок 13 – Принципиальная электрическая схема АЛ

Таблица 5 – Таблица подключений

Вход	Назначение	Выход	Назначение
I1	Пуск	Q1	Стоппер 1
I2	Стоп	Q2	Стоппер 2
I3	Счетчик таблеток	Q3	Питание конвейера (обмотка реле)
I4	Наличие тары перед узлом загрузки (стоппер 1)	Q4	Питание ВБЗУ (обмотка реле)
I5	Наличие тары перед узлом укупора (стоппер 2)	Q5	Клапан присоски и питание компрессора
I6	Наличие крышек на склизе		

Алгоритм работы линии представлен на рисунке 14. Оценив вычислительные мощности ПР200, было принято решение о создании АРМ (автоматизированное рабочее место). Для синхронизации работы установки организована локальная сеть на основе наиболее распространенного промышленного протокола Modbus RTU, в которой master-устройством являлся ПК (персональный компьютер), slave-устройством ПР200. Для связи ПК и

манипулятора был использован специализированный протокол Dynamixel 1.0. Программирование осуществлялось в программной среде Visual Studio на языке C++.

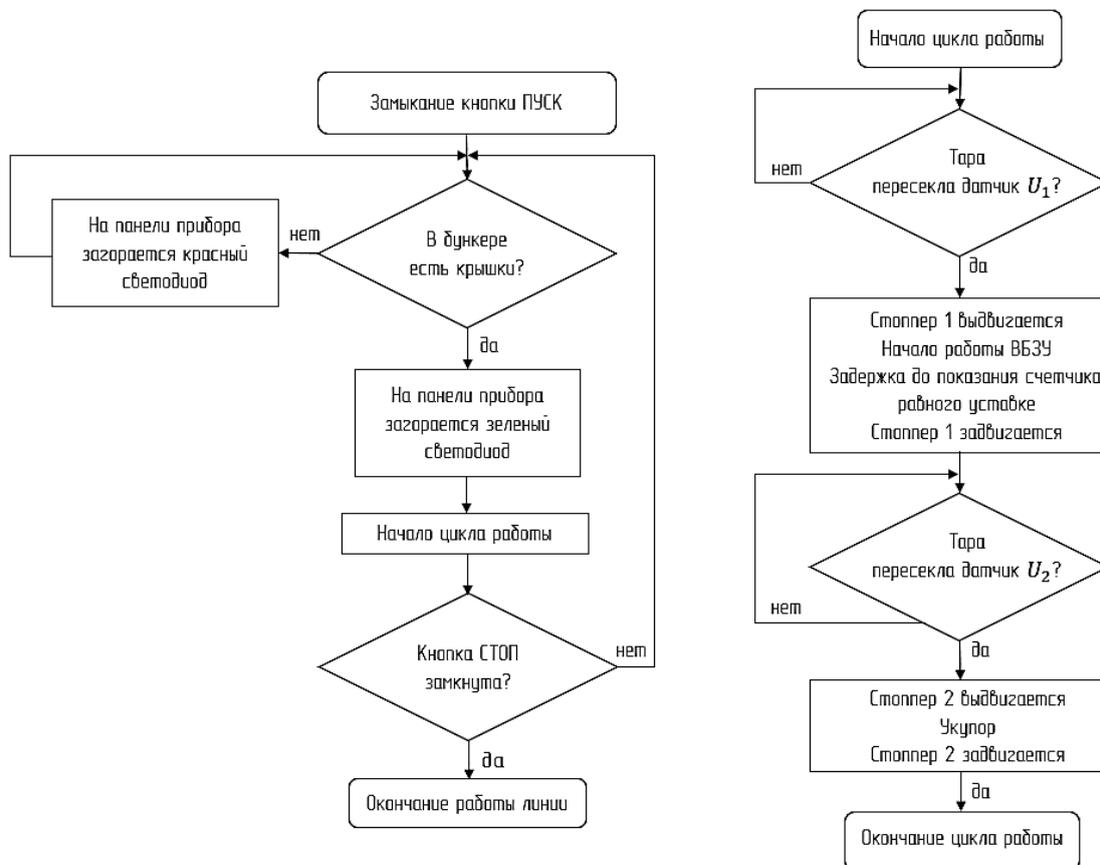


Рисунок 14 – Блок-схема алгоритма работы линии

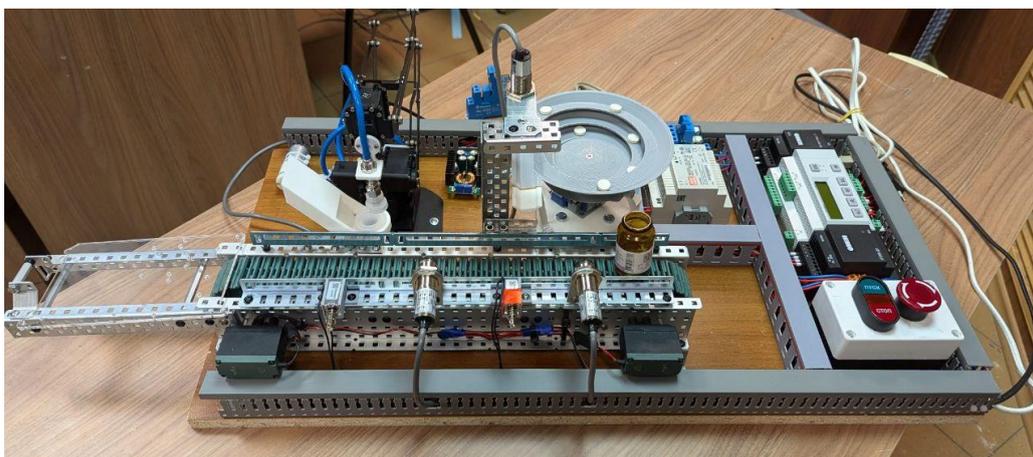


Рисунок 15 – Итоговый вариант сборки макета

Результаты. Спроектированные ВБЗУ и автоматическая линия работают корректно, были произведены тестовые замеры производительности. Учитывая расчетную производительность мехатронного бункера 50 шт./мин и общее время работы линии для заполнения и укупора одной тары, которое в среднем составило 20 секунд, производительность линии составила порядка 3 банок в

минуту, при заполняемости тары 10 табл./банка.

Представленная автоматическая линия сводит к минимуму негативное влияние человеческого фактора, что значительно повышает надежность и безопасность процесса упаковки фармацевтических препаратов. По сравнению с ручными методами или менее автоматизированными решениями производительность линии увеличена на 40-50 %, что обеспечивает более быстрое выполнение задач при сохранении высокого качества продукции. Внедрение вибрационного питателя позволило достичь точной поштучной подачи заготовок, минимизировав риск повреждения таблеток или их неверную фасовку. Компактность и простота исполнения устройства также способствуют снижению эксплуатационных затрат и упрощению обслуживания системы. Таким образом, разработанная линия соответствует строгим стандартам фармацевтической отрасли, обеспечивая высокую эффективность, точность и стабильность работы.

Заключение. В работе рассмотрены основные этапы расчета и проектирования ВБЗУ, проведены исследования для выявления оптимальных результатов работы устройства. Спроектирована автоматическая линия, реализующая полный цикл упаковки твердых лекарственных препаратов. Итоговый вариант подтвердил работоспособность разрабатываемой системы. Габариты вибробункера составили $100 \times 120 \times 40$ мм, габариты линии – $1500 \times 500 \times 300$ мм.

Список литературы:

1. Бляхеров, И. С. Автоматическая загрузка технологических машин: справочник / И. С. Бляхеров, Г. М. Варьяш, А. А. Иванов и др.; под общ. ред. И. А. Клусова. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с. – Текст: непосредственный.
2. Повидайло, В. А. Расчет и конструирование вибрационных питателей / В. А. Повидайло. – Москва: Машгиз, 1962. – 151 с. – Текст: непосредственный.
3. Gary P. Maul, M. Brian Thomas. A Systems Model and Simulation of the Vibratory Bowl Feeder // Journal of Manufacturing Systems Vol. 16/No. 5 1997
4. ГОСТ 20249-80. Пластины и магнитопроводы пластинчатые. Общие положения. – Текст: непосредственный.
5. Попов, А. Н. Оборудование автоматизированных производств. Мехатронные вибрационные загрузочные устройства технологических машин: учеб. пособие / А. Н. Попов, М. Н. Полищук. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2021. – 52 с. – Текст: непосредственный.

© Антропова И. А., Воробьева А. П., 2025

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ГОРОДСКИХ МИКРОРАЙОНОВ: ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛАНСА СПРОСА И ГЕНЕРАЦИИ

студент **Ефимов Егор Олегович**,
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В статье предложена концепция гибридной энергосистемы для городских микрорайонов, сочетающей солнечную и ветровую генерацию, системы накопления энергии и алгоритмы балансировки спроса. Акцент сделан на оптимизации доступных технологий (бытовые ВИЭ, перепрофилированные аккумуляторы) и использовании открытых данных для прогнозирования. Моделирование показывает, что система способна сократить зависимость от централизованных сетей на 40–70 %, снижая углеродный след и эксплуатационные затраты. Реализация концепции рассматривается как шаг к децентрализованной энергетике с участием локальных сообществ.

Ключевые слова: гибридная энергосистема, возобновляемые источники энергии, городской микрорайон, баланс спроса и генерации, умное управление энергопотреблением, энергосберегающие технологии, децентрализованная энергетика.

HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEM CONCEPT FOR URBAN NEIGHBORHOODS: OPTIMIZING DEMAND-GENERATION BALANCE

Student **Efimov Egor Olegovich**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article proposes a concept of a hybrid energy system for urban microdistricts, combining solar and wind generation, energy storage systems and demand balancing algorithms. The emphasis is on the optimization of available technologies (household renewable energy sources, repurposed batteries) and the use of open data for forecasting. Modeling shows that the system is capable of reducing dependence on centralized networks by 40–70 %, reducing the carbon footprint and operating costs. The implementation of the concept is seen as a step towards decentralized energy with the participation of local communities.

Keywords: hybrid energy system, renewable energy sources, urban micro district, balance of demand and generation, smart energy management, energy-saving technologies, decentralized energy.

Современные города сталкиваются с двойным вызовом: стремительный рост энергопотребления, обусловленный урбанизацией и цифровизацией, и необходимость сокращения экологического следа в условиях климатического кризиса. Традиционные централизованные энергосистемы, основанные на ископаемом топливе, все чаще демонстрируют свою уязвимость – от перегрузок в пиковые часы до зависимости от глобальных рынков углеводородов. При этом переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) остается фрагментарным: солнечные панели и ветрогенераторы часто внедряются точечно, без системной интеграции, что приводит к дисбалансам между генерацией и спросом. В этом контексте микрорайон как элементарная единица городской инфраструктуры становится идеальным полигоном для апробации гибридных решений, сочетающих разнообразие ВИЭ, адаптивное управление нагрузкой и доступные технологии накопления энергии.

Цель данной работы – предложить концепцию гибридной энергосистемы, способной обеспечить устойчивое энергоснабжение городского микрорайона за счет синергии солнечной и ветровой генерации, прогнозирования спроса и гибкого использования накопителей. В отличие от существующих подходов, акцент делается не на технических инновациях, а на оптимизации уже доступных компонентов через алгоритмы балансировки, которые могут быть реализованы с использованием открытого ПО и публичных данных. Такой подход позволяет минимизировать затраты на внедрение, а также учесть специфику локальных условий – от климатических особенностей до паттернов энергопотребления жителей. Ключевая гипотеза исследования заключается в том, что даже умеренная интеграция ВИЭ в связке с «умным» управлением способна сократить зависимость микрорайона от внешних сетей на 40–60 %, создав основу для энергетической автономии в долгосрочной перспективе [1].

Работа носит концептуальный характер и опирается на теоретическое моделирование, что делает ее доступной для реализации в рамках академического проекта без лабораторной базы или специализированного программного обеспечения. Анализ строится на трех столпах: во-первых, комбинирование разнородных источников генерации для компенсации их природной нестабильности; во-вторых, динамическое перераспределение энергии между бытовыми нуждами и накопителями; в-третьих, использование вторичных ресурсов, таких как аккумуляторы электромобилей, в качестве буферных зон хранения. Эти принципы, будучи объединены в единую логическую схему, открывают путь к созданию масштабируемых моделей для «зеленой» трансформации городов.

Городской микрорайон как замкнутая энергетическая единица обладает уникальным потенциалом для внедрения гибридных систем, объединяющих генерацию, накопление и потребление энергии в рамках локального баланса. Основу такой системы составляют солнечные панели, интегрированные в архитектуру зданий, и малые ветрогенераторы, размещенные на крышах или в промежутках между строениями. Эти источники дополняют друг друга: солнечная генерация достигает пика в дневные часы, совпадая с активным использованием энергии в жилом секторе, тогда как ветровые установки, особенно в условиях

умеренного и морского климата, демонстрируют стабильную выработку ночью или в пасмурную погоду. Подобная комплементарность снижает риски «провалов» в энергоснабжении, характерных для систем, полагающихся на единственный источник ВИЭ [2].

Ключевым элементом, связывающим генерацию и спрос, выступают системы накопления энергии (СНЭ). Однако вместо дорогостоящих промышленных аккумуляторов предлагается использовать распределенные решения – например, перепрофилированные батареи электромобилей, которые в течение дня могут заряжаться избыточной энергией, а вечером отдавать ее в сеть микрорайона. Такой подход не только снижает затраты на инфраструктуру, но и вовлекает жителей в процесс энергоуправления, создавая основу для «общества устойчивого потребления». Дополнением служат умные счетчики, которые в режиме реального времени анализируют нагрузку и перенаправляют энергию между потребителями: приоритет отдается критическим нуждам (освещение, холодильное оборудование), тогда как второстепенные задачи (зарядка гаджетов, нагрев воды) могут быть отложены до периодов избыточной генерации [3].

Управление всей системой строится на алгоритмах, учитывающих три типа данных: прогноз погоды (для оценки солнечной и ветровой активности), исторические паттерны энергопотребления микрорайона (сезонные колебания, выходные дни) и текущий уровень заряда накопителей. Интеграция этих данных позволяет системе динамически перераспределять ресурсы, минимизируя зависимость от внешних сетей. Например, в утренние часы, когда жители активно используют электроприборы, а солнце еще не вышло на пик активности, энергия может поступать из накопителей, заряженных за счет ночного ветра. В полдень, при максимальной солнечной генерации, излишки направляются на зарядку электромобилей или запасаются для вечернего пика спроса.

Эффективность такой модели во многом зависит от точности прогнозирования. Здесь предлагается использовать открытые API метеорологических служб и агрегированные данные умных счетчиков, что исключает необходимость разработки сложных прогнозных моделей «с нуля». Для тестирования гипотез достаточно инструментов вроде Python-библиотеки Prophet или даже Excel, где можно смоделировать баланс «генерация-потребление» на основе усредненных сценариев. Например, для микрорайона из 50 домохозяйств типичной российской средней полосы, где солнечная инсоляция составляет 3–4 часа в день, а среднегодовая скорость ветра – 5 м/с, комбинированная система может покрывать до 70 % потребностей в летний период и около 40 % зимой [4].

Предложенная гибридная система, несмотря на свою концептуальность, демонстрирует значительный потенциал для снижения как эксплуатационных затрат, так и экологической нагрузки. Ключевой экономический эффект достигается за счет двух факторов: сокращения закупок энергии из централизованных сетей и возможности монетизации ее излишков. Например, в летние месяцы, когда солнечная генерация превышает локальные потребности, избытки могут быть либо сохранены для зимнего периода, либо переданы соседним микрорайонам через умные сети, формируя основу для

децентрализованного энергорынка. Важно, что такая модель не требует масштабных инфраструктурных изменений – достаточно договоренностей между управляющими компаниями и жителями, готовыми участвовать в обмене ресурсами. Дополнительным стимулом выступают «зеленые сертификаты», которые все чаще становятся частью городской политики: микрорайон, снижающий выбросы CO₂, может получать налоговые льготы или гранты на развитие инфраструктуры.

С экологической точки зрения, переход на гибридную систему позволяет сократить углеродный след на 25–35 % даже при частичном сохранении зависимости от традиционной энергосети. Этот показатель рассчитывается исходя из замещения ископаемого топлива в периоды пиковой генерации ВИЭ, а также за счет оптимизации транспортировки энергии – локальное производство минимизирует потери в сетях, которые в среднем составляют 8–12 %. Кроме того, использование перепрофилированных аккумуляторов электромобилей решает проблему утилизации батарей, продлевая их жизненный цикл и уменьшая нагрузку на полигоны токсичных отходов [5].

Однако реализация концепции сталкивается с рядом ограничений. Во-первых, климатическая зависимость: в регионах с низкой солнечной инсоляцией и слабыми ветрами эффективность системы снижается, требуя резервных решений. Во-вторых, необходимость первоначальных инвестиций – даже с учетом умеренной стоимости бытовых солнечных панелей и малых ветрогенераторов, их внедрение требует субсидий или коллективного финансирования. Тем не менее, эти барьеры постепенно нивелируются: рост цен на энергоносители и развитие технологий делают ВИЭ все более доступными, а опыт европейских городов (например, датского острова Самсе) подтверждает, что подобные системы окупаются за 7–10 лет при поддержке государственных программ и высоких тарифах на возобновляемую энергию [6].

Перспективы масштабирования модели связаны с ее адаптивностью. Алгоритмы балансировки, разработанные для микрорайона, могут быть применены к более крупным городским кластерам – от жилых кварталов до промышленных зон. Для этого достаточно увеличить мощность генерации и накопителей, сохранив принцип «умного» распределения энергии на основе прогнозирования. Таким образом, описанная концепция становится шагом к созданию модульных энергосистем, способных трансформировать города в устойчивые экосистемы с минимальным углеродным следом.

Предложенная концепция гибридной энергосистемы для городских микрорайонов демонстрирует, что переход к устойчивому энергоснабжению возможен даже в рамках ограниченных ресурсов. Объединение солнечной и ветровой генерации с адаптивными системами накопления и алгоритмами балансировки спроса позволяет не только сократить зависимость от централизованных сетей, но и создать основу для энергетической автономии на локальном уровне. Важно, что такая модель не требует революционных технологий – ее сила заключается в оптимизации уже доступных решений, от бытовых солнечных панелей до аккумуляторов электромобилей, которые превращаются из пассивных потребителей в активные элементы энергосистемы.

Несмотря на климатические и экономические ограничения, потенциал системы подтверждается ее адаптивностью. Например, в регионах с низкой солнечной активностью акцент может смещаться в сторону ветрогенерации или биогаза, а в условиях финансовых барьеров – реализовываться поэтапно, начиная с пилотных домохозяйств. Успешный опыт европейских городов, где подобные проекты уже интегрированы в городское планирование, доказывает, что даже умеренные инвестиции в ВИЭ способны запустить «зеленый» мультипликатор: снижение эксплуатационных затрат стимулирует жителей и бизнес к дальнейшему внедрению энергоэффективных технологий.

Перспективы исследования связаны с переходом от теоретического моделирования к практической апробации. Для этого достаточно данных, собираемых умными счетчиками, и сотрудничества с управляющими компаниями, заинтересованными в снижении тарифной нагрузки на жителей. Дальнейшая работа может включать разработку типовых регламентов для интеграции гибридных систем в градостроительные нормы, а также изучение социального аспекта – готовности сообществ к коллективному управлению энергоресурсами. В долгосрочной перспективе такие микрорайоны способны стать узлами децентрализованной энергосети, где избытки энергии не просто запасаются, но и становятся товаром, формируя новый формат городской экономики – устойчивой, инклюзивной и независимой от ископаемого топлива.

Энергетическая трансформация начинается не с глобальных реформ, а с малых экспериментов, и городской микрорайон – идеальная площадка для такого старта. Ограниченная территория, общие цели жителей и доступность технологий создают уникальные условия для прорыва, который, будучи масштабирован, способен изменить ландшафт современных городов.

Список литературы:

1. Лаошвили, Д. П. Разработка смешанной автономной энергосистемы на базе возобновляемых источников энергии / Д. П. Лаошвили, Г. К. Кохреидзе. – Текст: электронный // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/> (дата обращения: 07.04.2025).
2. Гашимов, А. М. Гибридные системы распределенной генерации с возобновляемыми источниками: моделирование и анализ их режимов работы в энергосистеме / А. М. Гашимов, Н. Р. Рахманов, С. Т. Ахмедова. – Текст: электронный // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2013. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/> (дата обращения: 07.04.2025).
3. Марьенков, С. А. Применение технологии накопления электрической энергии для увеличения надежности системы электроснабжения на базе возобновляемых источников электрической энергии / С. А. Марьенков. – Текст: электронный // МНИЖ. – 2016. – № 6-2(48). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/> (дата обращения: 07.04.2025).

4. Lanre, O., Saad, M., Ismail, M. S., Moghavvemi, M. (2016) Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 62. Pp. 821-835.
5. Vyas, M., Yadav, V. K., Vyas, S., Joshi, R. R., Tirole, R. (2022). A Review of Algorithms for Control and Optimization for Energy Management of Hybrid Renewable Energy Systems. In *Intelligent Renewable Energy Systems*. Vol. 5. Pp. 131-155.
6. Енгоян, А. От Канзаса до Копенгагена: «маяки» чистой энергии по всему миру / А. Енгоян. – Текст: электронный // *Коммерсантъ*. – 2015. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2868409> (дата обращения: 08.04.2025).

© Ефимов Е. О., 2025

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ ОТКАЗА ПАР ДЕТАЛЕЙ

магистрант **Астахов Артур Михайлович**,
науч. руководитель: д-р техн. наук, профессор
Черненко Людмила Васильевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В исследовании приводится метод оценки технического состояния магистральных насосных агрегатов на основе вычисления собственной вероятности отказа деталей, а также вычисления корреляций отказа пар деталей. Представлен формат описания структуры статистических данных об отказах деталей насосного агрегата, необходимой для проведения анализа и прогнозирования работоспособности. Описан принцип объединения результатов вычисления вероятностей отказа с учетом выявленной корреляции отказа пар деталей.

Ключевые слова: техническое состояние, магистральный насосный агрегат, отказ, работоспособность, распределение Вейбулла.

ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF MAIN PUMP UNITS BASED ON CALCULATION OF CORRELATION OF FAILURE OF PAIRS OF PARTS

Master Student **Astakhov Artur Mikhailovich**,
Academic Advisor: Doctor in Engineering, Professor
Chernenkaya Lyudmila Vasilevna,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The study presents a method for assessing the technical condition of mainline pump units on the basis of calculating the intrinsic probability of failure of parts, as well as calculating the correlations of failure of pairs of parts. The format of the description of the structure of statistical data structure on pump unit parts failures required for analyzing and predicting serviceability is presented. The principle of combining the results of calculating failure probabilities taking into account the revealed correlation of failure of pairs of parts is described.

Keywords: technical condition, main pump unit, failure, serviceability, Weibull distribution.

Применение методов прогнозирования технического состояния оборудования в промышленности является ключевой задачей в повышении производительности и эффективности производств [1]. Благодаря реализации

методик, обеспечивающих мониторинг и оценку технического состояния оборудования, возможно решение задачи формирования графиков планового обслуживания и ремонта для создания условий безаварийной эксплуатации оборудования на предприятиях.

Данная задача актуальна и в нефтегазовой отрасли. Обеспечение необходимого контроля за техническим состоянием магистральных насосных агрегатов (МНА) позволит проводить непрерывный цикл транспорта нефти и нефтепродуктов без возникновения внеплановых остановок технологических участков магистральных трубопроводов [2].

Также использование методик оценки технического состояния позволит снизить затраты на проведение мероприятий по формированию выбора насосных агрегатов для выполнения прокачки и снижению использования резерва, что снизит издержки, обусловленные режимами пуска агрегатов.

Основными примерами реализации подобных методов являются модели цифровых двойников и алгоритмов, основанных на машинном обучении [3, 4].

Но первостепенным подходом, который может использоваться как дополнительный критерий для повышения точности моделей машинного обучения, является работа со статистическими данными с точки зрения теории вероятности [5]. На основе статистических данных возможен поиск вероятностей отказа с учетом времени наработки оборудования, а также поиск корреляций отказа пар деталей, формирующий дополнительные вводимые параметры для дальнейшей работы в процессе оценки технического состояния оборудования.

В данном исследовании предлагается метод по оценке технического состояния на основе использования собственной работоспособности МНА, а также на основе вычисляемой корреляции отказа пар деталей, оценивая дополнительную вероятность отказа из-за возникающей зависимости деталей друг от друга.

Сформируем начальные условия, которые будут использоваться в процессе описания предлагаемого метода оценки технического состояния МНА. Вычисляемая вероятность отказа МНА будет формироваться исходя из вероятности отказа конструктивных узлов, которые, в свою очередь, будут формироваться на основе вероятности отказа деталей данных узлов.

Пусть N_i – количество конструктивных узлов МНА, сам магистральный насосный агрегат обозначим как M .

Каждый конструктивный узел МНА состоит из j -го набора деталей:

$$N_i = \{n_1, n_2, \dots, n_j\}, \quad (1)$$

где n_j – деталь конструктивного узла МНА.

Обозначим вероятность отказа i -го конструктивного узла как Q_N . Данная вероятность определяется как максимальная вероятность отказа любой детали, входящей в состав узла:

$$Q_N = \max_{n \in \{1, \dots, j\}} Q_n, \quad (2)$$

где Q_n – вероятность отказа детали конструктивного узла МНА.

Вероятность работоспособности конструктивного узла МНА формируется исходя из вероятности отказа:

$$P_N = 1 - Q_N. \quad (3)$$

Так как вероятность отказа всего МНА будет определяться через максимальную вероятность отказа любого из узлов, вероятность работоспособности МНА в целом можно выразить следующим образом:

$$Q_M = \max_{N \in \{1, \dots, i\}} Q_N. \quad (4)$$

Соответственно, вероятность работоспособности всего МНА будет:

$$P_M = 1 - Q_M = 1 - \max_{N \in \{1, \dots, i\}} (1 - P_N), \quad (5)$$

или в эквивалентной форме:

$$P_M = \min_{N \in \{1, \dots, i\}} P_N. \quad (6)$$

В результате вероятность отказа всего МНА будет основываться на наименьшей вероятности работоспособности любой детали из любого конструктивного узла насоса.

Рассмотрение отказа каждой детали МНА связано с тем, что насосный агрегат как система является восстанавливаемой, а детали как таковые являются конечными элементами данной системы, заменой которых обеспечивается восстановление работоспособности МНА. Благодаря данному условию обеспечивается целесообразность использования распределения Вейбулла как основного метода обработки статистических данных об отказах.

Основой разрабатываемого метода оценки технического состояния является, как было описано ранее, распределение Вейбулла, используемое для анализа статистических данных о часах наработки деталей МНА. Рассмотрим первый шаг в обработке данных и вычислением собственной вероятности отказа деталей.

Статистические данные об отказах деталей насосных агрегатов представляются в виде графовых структур, которые описывают последовательный отказ деталей друг за другом, с указанием часов наработки. Такой формат представления данных потребует в дальнейшем при анализе корреляции отказа пар деталей. На рисунке 1 представлена структура файла, который используется предлагаемым методом. Исходя из файла формируется список эмпирических данных о случаях отказа каждого типа деталей и часах наработки, при которых произошел отказ. По результатам применения распределения Вейбулла для каждой детали МНА формируется функция распределения, которая будет в дальнейшем использоваться в процессе оценки собственной вероятности отказа детали.

```

    {
      "from": 5,
      "hours_work": 70,
      "hours": 15462
    },
    {
      "from": 3,
      "hours_work": 297,
      "hours": 15759
    },
    {
      "from": 3,
      "hours_work": 124,
      "hours": 15883
    }
  ],
  "cluster_limits": [
    3086,
    6236,
    9367,
    12699,
    15729,
    15883
  ]
},
]

```

Рисунок 1 – Формат статистических данных

На рисунке 2 представлено сравнение функции распределения Вейбулла с иными функциями распределения, построенными благодаря другим методам обработки статистических данных. На основе проведенного сравнительного анализа с применением статистики Колмогорова–Смирнова был сделан выбор использования непосредственно распределения Вейбулла.

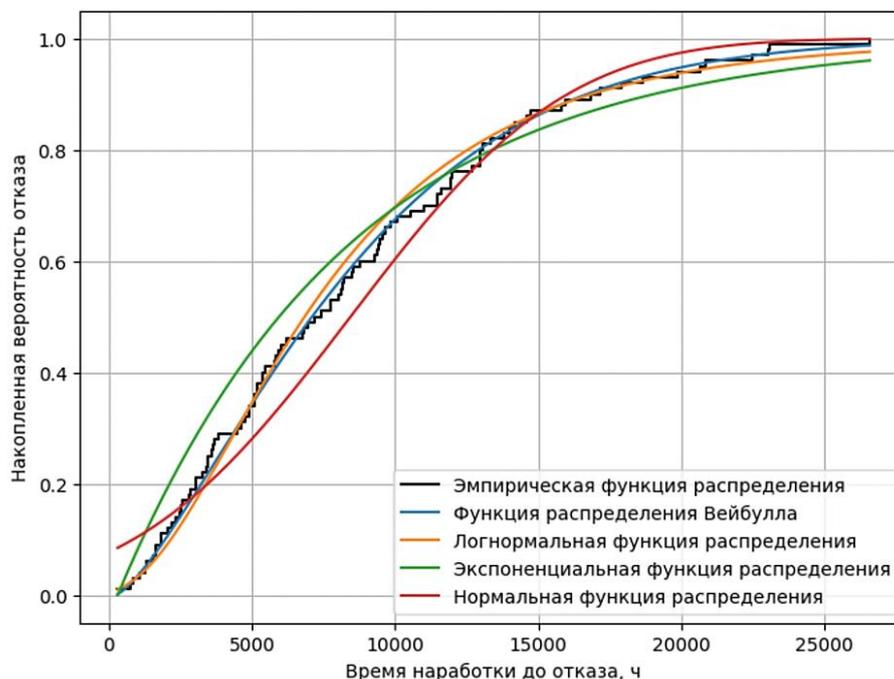


Рисунок 2 – График функций распределений

Собственная вероятность отказа детали позволяет качественно определить отказ как самостоятельной компоненты, а не части системы. Исходя из этого требуется анализ корреляции зависимости отказа одних деталей насосного агрегата от отказа других, для чего проводится вторая часть анализа статистических данных.

Как было описано ранее, статистические данные имеют вид графовой структуры, обеспечивающей описание последовательного отказа деталей в процессе эксплуатации МНА. Данный формат данных позволяет произвести анализ возможной зависимости отказа пар деталей. Также, если обратиться к рисунку 1, можно заметить, что жизненный цикл МНА разделен на кластеры для рассмотрения каждого участка жизненного цикла насосного агрегата по отдельности, позволяя разделить формирующиеся корреляции в начальных этапах эксплуатации и конечных периодах. Благодаря этому обеспечивается более детальное изучение и анализ формирующихся зависимостей.

На основе данных последовательных данных об отказах деталей в процессе эксплуатации МНА формируются наиболее часто встречаемые пары деталей, отказ которых имеет потенциальную зависимость. Данные пары деталей формируются для каждого кластера по отдельности. После чего для каждой детали, которая отказывает после начальной (первой детали пары), собираются данные о часах наработки, после которой отказывает данная деталь (деталь, которая имеет зависимость от отказа первой). Этот процесс аналогичен с тем, как формируются данные для использования распределения Вейбулла в задаче вычисления функции распределения вероятности отказа детали в зависимости от времени наработки. В результате для каждой пары деталей формируется дополнительная функция распределения, которая позволяет определять вероятность отказа детали в случае, если произойдет предварительный отказ первой детали данной пары.

Стоит отметить, что вероятность того, что после отказа первой детали произойдет отказ второй, формируя данную пару, можно вычислить следующим образом. Исходя из статистических данных, создается список отказов, которые происходили после отказа первой детали из рассматриваемой пары. Далее проводится суммирование количества отказов второй детали рассматриваемой пары и суммирование всего количества отказов, возникающих после отказа первой детали, что представлено в формуле 1.

$$P(A \rightarrow B) = \frac{n}{N}, \quad (7)$$

где n – сумма отказов второй детали рассматриваемой пары, после отказа первой;

N – общая сумма отказов, после отказа первой детали.

Благодаря этому вычисляется вероятность выполнения сценария коррелируемого отказа деталей. Данное значение далее будет использоваться для вычисления итоговой вероятности отказа.

Рассмотрим сценарий работы с имеющимися статистическими данными. Входными данными является наработка МНА, а также наработка каждой детали, так как в процессе эксплуатации насосного агрегата, часть деталей заменялась из-за чего их наработка не идентична работе всего агрегата. Помимо этого, для работы предлагаемого метода необходимы данные о том,

какие детали заменялись при прошлых обслуживаниях и ремонтах МНА. Далее для каждой детали, в соответствии с функциями распределения Вейбулла, формируется вероятность отказа, а также определяется наличие корреляции отказа пар деталей, а именно существует ли вероятность отказа определенной детали в соответствии с прошлой отказавшей при эксплуатации данного МНА.

В случае нахождения детали, которая может быть начальной для коррелируемого отказа пары деталей, производится дополнение имеющейся собственной вероятности отказа второй детали по следующему принципу, представленному в формуле 2.

$$P(B) = P(B|A) \cdot P(A \rightarrow B) + P(B|\neg A) \cdot P(\neg(A \rightarrow B)), \quad (8)$$

Исходя из данных формулы, вычисляется вероятность отказа второй детали B с учетом корреляции ее отказа от предыдущей отказавшей.

Благодаря представленному методу достигается возможность учитывать возникновения корреляции отказа пар деталей МНА, тем самым увеличивая точность системы оценки технического состояния. Представленные результаты могут быть использованы далее в процессе формирования методики мониторинга и оценки технического состояния МНА для применения результатов в системе управления парком насосных агрегатов.

Список литературы:

1. Газаля, Х. Техническое диагностирование и прогнозирование технического состояния оборудования / Х. Газаля, М. Саида. – Текст : непосредственный // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 4-5. – С. 157-164.
2. Огнев, В. Ю. Мониторинг технического состояния магистральных нефтепроводов с использованием компьютерных технологий / В. Ю. Огнев, П. Н. Ягунов. – Текст : непосредственный // Инновационная наука. – 2017. – № 4-3. – С. 95-97.
3. Каракулов, И. В. Прогнозирование технического состояния электроцентробежного насоса на основе нейросетевого моделирования / И. В. Каракулов, А. В. Ключев, В. Ю. Столбов. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 37-46.
4. Салов, И. В. Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии / И. В. Салов, И. А. Щербатов, Ю. А. Салова. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 57-62.
5. Острейковский, В. А. Модели и методы статистической теории надежности в развитии концепции уровней описания старения оборудования сложных систем с длительными сроками активного существования / В. А. Острейковский, А. В. Сорочкин. – Текст : непосредственный // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 3. – С. 5-15.

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ТУРБОДЕТАНДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА ДВИГАТЕЛЯ ПРЯМОГО ТОКА**

аспирант **Балакин Антон Михайлович**,
студент **Крюкова Майя Артемовна**,
магистр **Канакин Михаил Константинович**,
студент **Коростелева Елена Витальевна**,
студент **Гуренко Владислав Дмитриевич**,
науч. руководитель: д-р техн. наук, директор института энергетики
Барсков Виктор Валентинович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

**INFLUENCE OF LOAD VARIATION ON OPERATION MODES
OF TURBOEXPANDER UNIT WHEN USING DIRECT CURRENT ENGINE
AS A GENERATOR**

Postgraduate Student **Balakin Anton Mikhailovich**,
Student **Kryukova Maya Artemovna**,
Master **Kanakin Mikhail Konstantinovich**,
Student **Korosteleva Elena Vitalievna**,
Student **Gurenko Vladislav Dmitrievich**,
Academic Advisor: Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Energy
Barskov Viktor Valentinovich,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation

Аннотация. Представлена актуальность турбогенераторов малой мощности (до 100 Вт) и рассмотрена возможность использования в них электродвигателя прямого тока как электрогенерирующего элемента для работы в составе газорегуляторных пунктов шкафного типа. Приведены результаты анализа зависимости режимов работы установки (расхода, напряжения, частоты вращения и мощности) от изменения нагрузки сопротивления, полученные в ходе физического эксперимента.

Ключевые слова: турбодетандер, децентрализованная генерация энергии, коллекторный двигатель, маломощный генератор прямого тока, нагрузка сопротивления.

В связи с возрастающим в последние годы спросом на децентрализованную генерацию энергии, увеличивается потребность в разработке маломощного турбинного оборудования [1].

Важным типом микротурбинных установок, особенно для России с единой системой газоснабжения, являются турбодетандерные генераторы, которые предназначены для работы в качестве автономного энергоисточника на газораспределительных станциях (ГРС) и используют природный газ в качестве рабочего тела. Данные установки разрабатываются следующими зарубежными фирмами – ABB, Rotaflow, Atlas Copco, RMG [2].

Если рассмотреть модельный ряд как зарубежных, так и отечественных установок, можем отметить, что они имеют мощность более 1 кВт и обладают высокими частотами вращения ротора [3].

В нашей стране введется активная работа над проектированием и производством турбодетандеров, например такие, как центробежно-осевая реактивная турбина [5] и турбодетандерная электрогенераторная установка [6]. Таким образом, становятся актуальными вопросы проработки конструкции их элементов, анализа различных вариантов выполнения узлов [3].

Для децентрализованной генерации энергии немаловажным комплексом являются газорегуляторные пункты, предназначенные для снижения давления газа и поддержания его на необходимом заданном уровне. Для расположения их в месте потребления или в непосредственной близости от него предлагается использовать турбодетандерные генераторы в составе ГРП шкафного типа (ГРПШ) [4]. Необходимая мощность такой установки рассматривается в пределах до 1 кВт, причем основной упор делается на разработку агрегатов мощностью менее 100 Вт.

Из-за малых габаритов ГРПШ и мощности такого комплекса возникает идея применения турбодетандеров малой мощности, однако данное решение имеет ряд своих трудностей. Так как для проектирования турбогенератора необходим электрогенератор малой мощности. В виду отсутствия на международном рынке подходящих устройств, был использован коллекторный двигатель постоянного тока, работающего в обратную сторону согласно правилу Ленца.

В работе [3] в ходе эксперимента было выяснено, что мощность, выдаваемая двигателем, сильно зависит от сопротивления приходящей нагрузки. В результате эксперимента были получены следующие зависимости, представленные на рисунке 1.

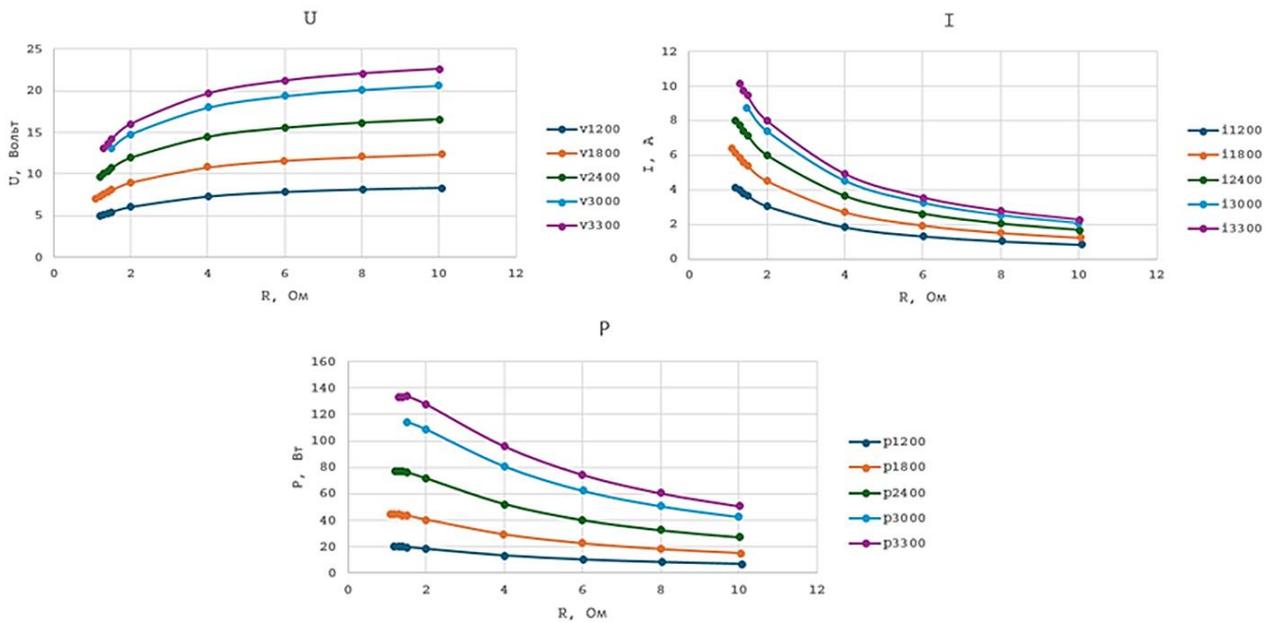


Рисунок 1 – Зависимости значений напряжения, электрического тока и мощности от сопротивления [3]

Можем увидеть, что данные графики не равномерные, поэтому для более полного понимания рабочего процесса детандера, необходимо проверить, влияние сопротивления нагрузки непосредственно на его режим работы.

В виду этого был проведен физический эксперимент, в ходе которого менялось сопротивление приходящей нагрузки при постоянном давлении на входе и выходе из установки. Были сняты показатели напряжения, из которых в последствии были получены значения частоты вращения вала, сопротивления и расхода.

Схема установки, использовавшейся в эксперименте, представлена на рисунке 2.

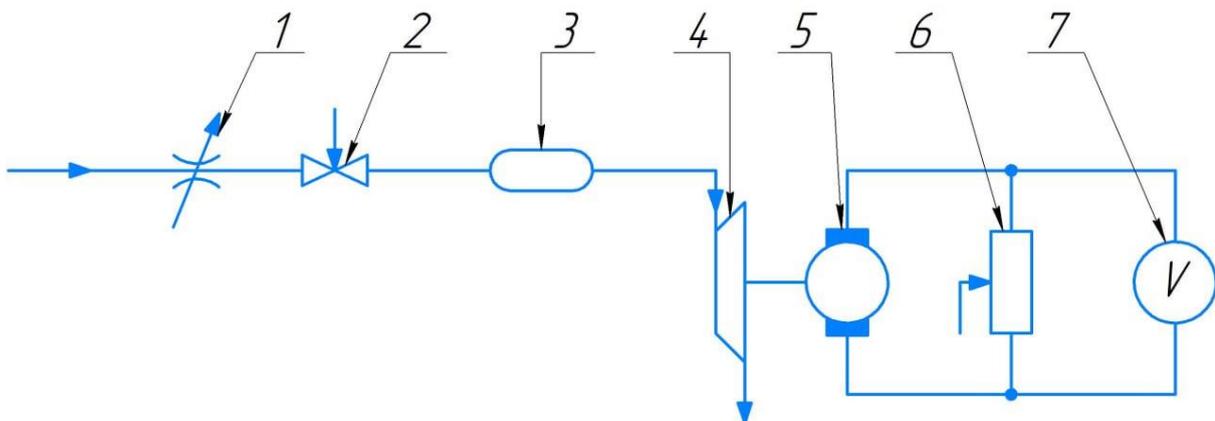


Рисунок 2 – Схема установки

При постоянном давлении на входе рабочее тело подавалось через дроссельную шайбу 1 и регулирующий кран 2 в уравнительную камеру 3, после чего направлялось непосредственно в турбодетандер 4, где вырабатываемая им механическая работа, преобразовывалась в электрическую энергию с помощью

генератора постоянного тока 5, входящего в состав турбодетандерной установки. По средствам изменения сопротивления нагрузки 6, было снято напряжение, замеряемое вольтметром 7.

В ходе данного эксперимента производился замер сопротивления и напряжения, однако частота вращения вала и мощность, выдаваемая установкой, являются расчетными величинами.

В работе [3] было рассмотрено влияние характеристик двигателя прямого тока, работающего в режиме генератора, в соответствии с правилом Ленца, и получены графики зависимостей, с помощью которых была определена зависимость частоты вращения от сопротивления нагрузки и напряжения на выходе.

В данной работе в результате снятия значений режимов генератора были определены величины k и R , коэффициент зависимости частоты от общей ЭДС и сопротивление соответственно, а потом с помощью приведенных ниже формул была определена n -частота вращения вала.

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot n - \frac{k \cdot n \cdot R}{(R_{\text{нагр}} + R)} \quad (1)$$

$$P_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{нагр}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – выходная мощность;

$U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение на выходе;

$I_{\text{нагр}}$ – электрический ток нагрузки;

$R_{\text{нагр}}$ – сопротивление сети.

В последствии были сформированы зависимости напряжения, расхода, мощности и частоты вращения вала от сопротивления нагрузки.

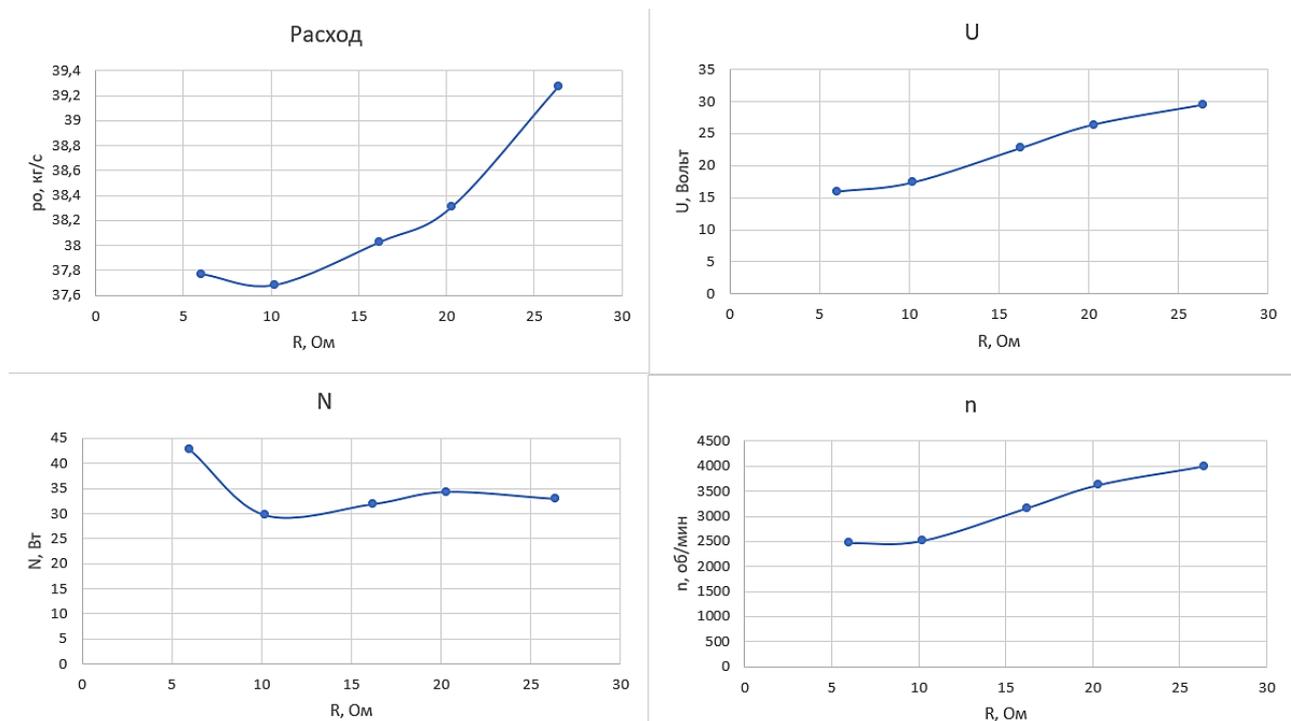


Рисунок 3 – Зависимости значений расхода, напряжения, мощности и частоты вращения от сопротивления

Проведя анализ полученных в ходе физического эксперимента результатов, можно заключить, что на малых значениях сопротивления, были получены более низкие значения расхода, напряжения и частоты вращения вала, а также более высокие значения мощности. Однако при дальнейших экспериментах, в ходе которых увеличивался показатель сопротивления, значения мощности значительно уменьшились, а напряжение, расход и частота вращения вала увеличились.

В работе [3] были приведены зависимости значений напряжения, электрического тока и мощности от сопротивления при нескольких постоянных значениях частоты вращения ротора генератора. Данные зависимости показывали, что при увеличении постоянной частоты вращения вала напряжение, электрический ток и мощность возрастали, однако в рамках нынешнего эксперимента, исходя из графиков, представленных на рисунке 2, можем заключить, что при увеличивающемся значении частоты вращения напряжение сети также возрастало, а выходная мощность, напротив, незначительно уменьшалась.

Это происходит, так как с увеличением нагрузки уменьшается ток возбуждения и магнитный поток возбуждения, а следовательно, увеличивается напряжение и частота вращения коллекторного двигателя, соответственно, и потребляемая мощность падает.

Исходя из выше приведенных формул (1) и (2), при постоянной частоте вращения ток с увеличением нагрузки действительно падает, однако общий ЭДС, которая распределяется между сопротивлением якоря и нагрузкой не изменяется. Поэтому при постоянной частоте выходное напряжение растет, так как внешняя нагрузка увеличивается. Также из-за того, что уменьшается напряжение на якоре, падает магнитный момент вращения, от чего ротор генератора испытывает меньше сопротивления при раскрутке, соответственно идет увеличение частоты вращения турбины, что приводит к тому, что общая ЭДС системы увеличивается. Таким образом, на результат исследования влияют оба этих фактора. Можем сделать вывод, что чем больше сопротивление нагрузки, тем турбинная установка ближе к тому, чтобы работать на холостом ходу.

Можем предположить, что при значениях нагрузки от 1 до 5 Ом будет наблюдаться резкое падение частоты вращения вала, а после прохождения пикового сопротивления, генератор будет выходить на режим короткого замыкания и частота вращения начнет резко расти.

Список литературы:

1. Рассохин, В. А. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом / В. А. Рассохин, Н. А. Забелин, Ю. В. Матвеев. – Текст: непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 4. – С. 41–51.
2. Фокин, Г. А. Автономные источники электрической и тепловой энергии для магистральных газопроводов и газораспределительных станций / Г. А. Фокин. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 168 с. – Текст: непосредственный.

3. Рассмотрение возможности применения коллекторного двигателя прямого тока в качестве электрогенерирующего элемента турбодетандерной установки малой мощности / В. В. Барсков, А. М. Балакин, М. А. Крюкова, Е. В. Коростелева. – Текст: непосредственный // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 197-199.
4. Аржаева, Н. В. Направление модернизации газорегуляторных пунктов / Н. В. Аржаева, Н. А. Чернышова, Е. С. Хомякова. – Текст: электронный // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2017. – С. 30-34.
5. Патент на полезную модель № 184274 U1 Российская Федерация, МПК F01D 1/00. Центробежно-осевая реактивная турбина : № 2018101158 : заявл.12.01.2018 : опубл. 22.10.2018 / Н. А. Забелин, С. Н. Беседин, Г. Л. Раков [и др.] ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»). – EDN SXPCOZ. – Текст: непосредственный.
6. Патент на полезную модель № 187613 U1 Российская Федерация, МПК F01D 15/10, H02P 9/04, H02K 15/02. Турбодетандерная электрогенераторная установка : № 2018127766 : заявл. 27.07.2018 : опубл. 13.03.2019 / Г. А. Фокин, А. Б. Федотов, В. М. Иванов, Н. А. Забелин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Санкт-Петербург». – EDN SMMDWT. – Текст: непосредственный.

© Балакин А. М., Крюкова М. А., Канакин М. К.,
Коростелева Е. В., Гуренко В. Д., 2025

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ГРАДИРНЯМИ

студент **Гильмутдинова Зарина Альбертовна**,
науч. руководитель: канд. техн. наук **Шагиева Гузель Камилевна**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена анализу методов очистки циркуляционной воды в системе оборотного водоснабжения с градирнями. Рассмотрены основные типы загрязнений. Описаны современные технологии, применяемые для очистки циркуляционной воды.

Ключевые слова: циркуляционная вода, методы очистки, биологические загрязнения, отложения, коррозия металлов.

METHODS OF PURIFICATION OF CIRCULATING WATER IN THE PLANT CYCLE

Student **Gilmutdinova Zarina Albertovna**,
Academic Advisor: PhD in Engineering **Shagieva Guzel Kamilevna**,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the analysis of methods of purification of circulating water in a circulating water supply system with cooling towers. The main types of pollution are considered. Modern technologies used to purify circulating water are described.

Keywords: circulating water, purification methods, biological contamination, deposits, corrosion of metals.

В процессе эксплуатации систем оборотного водоснабжения с градирнями на тепловых электрических станциях возникают трудности, связанные с образованием отложений, биологическим обрастанием, коррозией оборудования, осаждением взвешенных веществ (частиц песка, окалин, продуктов коррозии), которые приводят к засорению теплообменных поверхностей, снижению пропускной способности и локальным перегревам [1].

Рассмотрим методы борьбы с этими явлениями.

Для предотвращения минеральных отложений используют традиционный метод водообмена с помощью продувки системы. Это эффективный способ снижения концентрации примесей, однако он сопряжен с большими потерями воды и тепла. Более экологичной альтернативой является стабилизационная обработка реагентами. Например, гексаметафосфат натрия, связывая ионы кальция, предотвращает кристаллизацию карбонатов, а

карбоксиметилцеллюлоза создает защитный коллоидный слой на поверхностях, подавляя рост отложений. Эффективность реагентов зависит от точного дозирования и контроля pH, что требует автоматизированных систем управления.

Физические методы, такие как магнитная или акустическая обработка, приобретают популярность благодаря отсутствию химических отходов. Воздействие магнитного поля изменяет структуру воды, препятствуя образованию жестких кристаллов: ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} формируют аморфные взвеси, которые легко удаляются фильтрацией. Исследования на ТЭС в Германии показали, что магнитная обработка снижает образование накипи на 40–60%, но ее эффективность падает при высокой минерализации воды (> 500 мг/л) [2]. Акустические колебания, разрушающие уже сформированные отложения, часто комбинируют с ультразвуковой очисткой теплообменников

Биологические загрязнения (рисунок 1), такие как бактериальные биопленки, водоросли и грибковые колонии, развиваются в системах охлаждения, которые являются идеальной для них средой (в условиях повышенной температуры, большего количества света и кислорода) [3]. Эти образования не только снижают теплопередачу, но и провоцируют микробиологически индуцированную коррозию. Биологические обрастания образуются на поверхностях оросителей, водоуловителей, приводят к ухудшению охлаждающей способности градирен.



Рисунок 1 – Обрастание трубопровода железобактериями

Для подавления биологической активности применяются биоциды на основе хлора, озона, медьсодержащие соли, полимерные биоциды, а также ультрафиолетовое облучение, разрушающее клеточные структуры и другие методы.

Коррозия металлов (рисунок 2), усугубляемая биопленками и минеральными отложениями, приводит к точечным пробоям труб и загрязнению воды оксидами железа. Ортофосфаты, добавляемые в циркуляционную воду, образуют на стальных поверхностях защитную пленку, но их избыток провоцирует рост водорослей. Силикаты, взаимодействуя с

кальцием, создают плотные стеклоподобные слои, устойчивые к агрессивным средам. Азотсодержащие ингибиторы, эффективны в нейтральной среде, но дороги. Современные разработки включают гибридные ингибиторы, сочетающие органические полимеры с неорганическими компонентами: они адсорбируются на металле, блокируя анодные и катодные участки коррозии. Например, состав на основе полиаспарагиновой кислоты и цинка демонстрирует 90 % защиту при концентрации всего 5 мг/л [4].



Рисунок 2 – Коррозионный износ трубопровода

Покрытия внутренних поверхностей – дополнительный барьер против коррозии и обрастаний. Эпоксидные смолы, армированные стекловолокном, выдерживают температуру до 120 °С и механические нагрузки, но требуют идеальной подготовки поверхности перед нанесением [5]. Стеклоэмалевые покрытия, спеченные при высоких температурах, устойчивы к абразивному износу и химическим воздействиям, но их ремонт затруднен. Нанотехнологии предлагают новые решения: например, покрытия с наночастицами диоксида титана, которые под УФ-излучением генерируют активные формы кислорода, разрушающие органические загрязнения.

Современные системы мониторинга интегрируют датчики pH, электропроводности, мутности и биологической активности, передающие данные в режиме реального времени. Платформы на основе искусственного интеллекта, такие как GE Predix, анализируют эти данные, прогнозируя точки образования отложений и оптимизируя дозировку реагентов [6].

Перспективным направлением является использование экологически безопасных реагентов. Биоразлагаемые ингибиторы коррозии на основе растительных экстрактов (например, танинов из коры деревьев) показывают эффективность, сопоставимую с синтетическими аналогами. Энергоэффективные технологии, такие как электродеионизация или обратный осмос с рекуперацией энергии, снижают потребление воды на 30–50 % [7].

Современные методы очистки циркуляционной воды представляют собой сложный технологический комплекс, адаптированный к специфике загрязнений

и требованиям конкретных производственных циклов. Успешное решение задач по поддержанию качества воды достигается за счет комбинации физических, химических и биологических подходов, а также внедрения автоматизированных систем мониторинга. Дальнейшее развитие этой области связано с разработкой экологически безопасных реагентов, энергоэффективных технологий и интеллектуальных систем управления, способных прогнозировать и предотвращать критические изменения в водной среде.

Внедрение инноваций сталкивается с барьерами: высокой стоимостью, нехваткой квалифицированного персонала и консерватизмом отрасли. Решение этих проблем требует государственной поддержки, международной кооперации и образовательных программ. Уже сейчас ясно, что будущее систем оборотного водоснабжения – в синергии химии, биологии и цифровых технологий, обеспечивающей устойчивость и эффективность энергетики.

Список литературы:

1. Водоподготовка в энергетике: учебник / С. Л. Громов, Е. К. Долгов, К. А. Орлов и др. – М.: Издательство МЭИ, 2021 – С. 576. – Текст: непосредственный.
2. Верховинский, И. Л. Использование магнитного преобразователя накипи для повышения эффективности работы котлоагрегатов / И. Л. Верховинский, Н. Д. Наракидзе, Е. А. Кривобок. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 5(180). – С. 27-29. – EDN STXXUB.
3. Мишуров, В. И. Исследование экстрактов хвойных деревьев в качестве ингибиторов коррозии / В. И. Мишуров, А. С. Кулакова. – Текст: непосредственный // Молодой исследователь Дона. – 2022. – № 2(35). – С. 24-27.
4. Коррозия и защита металлов : учебно-методическое пособие в 2 частях / Н. Г. Россина, Н. А. Попов, М. А. Жиликова, А. В. Корелин ; научный редактор А. А. Попов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Часть 1. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. – С. 108. – Текст: непосредственный.
5. Трубачев, С. А. Эффект добавок антипиренов на горючесть и дымообразование стеклопластиков на основе эпоксидных смол / С. А. Трубачев, Е. А. Соснин. – Текст: непосредственный // Химические науки. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 1-2.
6. Корпорация ЭЛАР. ООО «Электронный архив»: [сайт]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 06.04.2025). – Текст: электронный.
7. Горская, О. И. Биолого-химический мониторинг Ростовской АЭС как эффективный инструмент предупреждения биологических помех в системах циркуляционного и технического водоснабжения / О. И. Горская. – Текст: непосредственный // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4 (45). – С. 6-14.

© Гильмутдинова З. А., 2025

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ПРОТИВОТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСАДОК НА ОСНОВЕ ВЫСШИХ АЛЬФА-ОЛЕФИНОВ

студент **Рафиков Тимур Дамирович**,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматриваются различные способы получения противотурбулентных присадок, являющихся одними из наиболее важных компонентов в транспортировке нефти и нефтепродуктов по трубопроводам. Рассматриваются преимущества и недостатки способов получения присадок при различных методиках и технологических процессах. Основными характеристиками полученных присадок, используемых при сравнении способов, являются устойчивость полученной товарной формы присадки, продолжительность процесса, количество необходимых для проведения стадий и др. В данной статье собраны и сопоставлены наиболее распространенные способы получения противотурбулентных присадок, что облегчает сравнение и ознакомление с существующими и разрабатываемыми технологиями получения присадок.

Ключевые слова: противотурбулентная присадка, молекулярная масса, полиальфаолефины, нерастворитель, деструкция, суспензия, полимеризация.

METHODS OF PRODUCTION OF SUSPENSION ANTITURBULENCE ADDITIVES BASED ON HIGHER ALPHA-OLEFINS

Student **Rafikov Timur Damirovich**,
Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

Abstract. This article considers various methods of obtaining antiturbulent additives, which are one of the most important components in the transport of oil and petroleum products through pipelines. Advantages and disadvantages of methods of obtaining additives at different methods and technological processes are considered. The main characteristics of the obtained additives, used in the comparison of methods, are stability of the obtained commercial form of the additive, duration of the process, number of stages required for carrying out the process, etc. The article presents the main characteristics of the obtained additives. In this article the most common methods of obtaining antiturbulent additives are collected and compared, which facilitates comparison and familiarisation with existing and developing technologies of additives obtaining.

Keywords: antiturbulent additive, molecular weight, polyalphaolefins, insolvent, degradation, suspension, polymerisation.

Противотурбулентные присадки (ПТП) являются добавками, позволяющими снизить значение гидродинамического сопротивления, что, в свою очередь, позволяет уменьшить затраты на энергопотребление.

Турбулентный режим течения характеризуется пульсациями таких характеристик, как плотность, температура, давление, скорость потока, и возникает при движении жидких углеводородов по нефтепроводу при определенных условиях. Данный режим течения приводит к высоким расходам энергии на обеспечение необходимой скорости потока.

Ввод ПТП в поток перекачиваемой жидкости повышает скорость течения в пристенном слое и способствует увеличению размеров переходной зоны. Благодаря этому происходит увеличение объемов перекачиваемой жидкости.

Клубки макромолекул находятся в слое гидродинамически активного полимера, движущегося вместе с перекачиваемой жидкостью. Полимерные клубки, перемещаясь границы слоев, постоянно деформируются и в итоге подвергаются деструкции.

Молекулы полимеров способны воздействовать на пульсации, соизмеримые с их размером. Основными характеристиками полимеров, которые определяют их активность, являются размеры макромолекул (порядка 100 нм), вязкоупругость, конформация в растворе, гибкость цепи и молекулярная масса (ММ) полимера (от 10^6 Да) [1].

Основные преимущества применения ПТП [2]:

- ввод присадки в перекачиваемую жидкость на низких дозировках;
- присадки обеспечивают быстрое увеличение пропускной способности трубопровода;
- низкие первоначальные затраты;
- позволяют понизить расходы на техническое обслуживание и эксплуатацию насосных установок при сохранении высоких эксплуатационных показателей;
- приводят к понижению рабочего давления при сохранении пропускной способности;
- снижают риск возникновения аварийной ситуации (прорыв трубопровода).

Одними из условий, необходимых для использования полимера для производства ПТП, являются высокое значение молекулярной массы и растворимость в углеводородных жидкостях. Полимеры и сополимеры высших альфа-олефинов являются наиболее распространенными при производстве ПТП.

Синтез полиальфаолефинов осуществляется методом координационной полимеризации высших альфа-олефинов (C_4 - C_{16}) в присутствии катализаторов Циглера-Натта. Альфа-олефины от гексена-1 до децена-1 чаще всего применяются в качестве мономеров. Природа молекулы мономера сильно влияет на длину полимерной цепи [3].

Противотурбулентные присадки делятся на суспензионные и растворные. Суспензионные присадки представляют собой суспензию полимера в слабополярной жидкости. Растворные присадки являются растворами полимера

в неполярной жидкости (нефрас, гексан). Чтобы предотвратить слипание полимерных частиц используют антиагломераторы (соли органических кислот, амиды и сложные эфиры высших карбоновых кислот). По сравнению с присадками растворного типа суспензионные являются более распространенными, т.к. обладают значительно меньшими значениями вязкости и содержат 25-35 % полимерного компонента, по сравнению с 10 % в растворных присадках. Суспензионные присадки эффективнее, т. к. их получают из блочных полимеров с более высокой молекулярной массой, чем растворные присадки, синтезируемые полимеризацией в среде растворителя [2].

Одним из основных способов получения присадок суспензионного типа считается блочная полимеризация и криогенное измельчение блочного полимера. В настоящее время разрабатываются альтернативные способы получения суспензии полимера, такие как микроблочная полимеризация в капсулах, полимеризация в среде фторированных или перфторированных алканов, осаждение полимера из раствора и термическое пересаживание.

Технология, основанная на блочной полимеризации и последующем криогенном измельчении блочного полимера, включает 3 стадии [4]:

- 1) получение блочного полимера;
- 2) измельчение полученного эластомерного полимера;
- 3) получение устойчивой суспензии полимерных молекул в жидкостинерастворителе.

Получение присадки способом блочной полимеризации

Результатом блочной полимеризации является эластомерный материал, характеризующийся пониженной температурой стеклования. Процесс осуществляют в герметичных реакторах, исключающих контакт с атмосферным кислородом и влагой, способными вызывать дезактивацию каталитической системы Циглера-Натта.

Ключевой технологической сложностью при блочной полимеризации остается контроль тепловыделения. На поздних стадиях превращения экзотермический характер реакции полимеризации в сочетании с высокой вязкостью полимерной матрицы приводит к образованию локальных перегревов. Поскольку рост температуры вызывает уменьшение молекулярной массы конечного продукта, критическое значение приобретает использование реакторного оборудования с эффективной системой теплоотвода.

Протекание процесса до конверсий более 90 % повышает вероятность образования «балластного» полимера, обладающего низкой ММ [5].

Одним из наиболее распространенных способов измельчения полимера является криогенное измельчение.

Технологический процесс измельчения продуктов блочной полимеризации включает несколько основных этапов. На первом этапе полимер охлаждают до температур ниже его температуры стеклования, обычно с использованием жидкого азота, после чего подают в криогенную мельницу для измельчения до размеров частиц порядка нескольких сотен микрометров. Полученный материал поступает в сепаратор, где происходит разделение на мелкую и крупную фракции – последняя возвращается на доизмельчение, а

мелкодисперсная фракция направляется на приготовление суспензии.

Процесс диспергирования сопровождается частичной деструкцией полимерных цепей. Для стабилизации продукта в состав вводят добавки, например, ингибиторы окислительной деструкции. Суспензию формируют в жидкой среде, подобранной с учетом двух критических параметров: полимер должен быть в ней нерастворим, плотность среды должна быть близка к плотности полимера для предотвращения расслоения при хранении. Такой подход обеспечивает получение стабильных полимерных суспензий с контролируемыми характеристиками частиц.

Для предотвращения агломерации измельченных частиц полимера применяются поверхностно-активные вещества (ПАВ), например, стеарамид, препятствующий слипанию порошка.

ПТП суспензионного типа должны содержать тонкоизмельченный полимер для оптимизации продолжительности процесса растворения полимера. Однако измельчение частиц полимера до размеров 100-300 мкм подразумевает интенсивное механическое воздействие на частицы полимера, что влечет за собой деструкцию молекул и уменьшение ММ продукта.

Поэтому на данный момент криогенное измельчение постепенно исключают из технологии получения суспензионных ПТП.

К недостаткам данного способа относят:

- 1) деструкцию частиц полимера;
- 2) повышенную опасность установок криогенного измельчения;
- 3) высокую стоимость жидкого азота;
- 4) длительное время синтеза;
- 5) сложность контроля температурного режима процесса и отвода тепла.

Получение присадки способом микроблочной полимеризации высших альфа-олефинов в капсулированной форме

Капсулирование осуществляется с использованием коаксиальных форсунок специальной конструкции, где центральный цилиндрический канал малого диаметра служит для подачи мономерно-катализаторной смеси на основе катализатора Циглера-Натта, а концентрический внешний канал большего диаметра предназначен для подачи материала оболочки.

Полимеризация протекает внутри образованных капсул в течение 24-72 часов, достигая степени конверсии мономера до 95 % [6]. Ключевыми особенностями данной технологии являются одностадийное получение диспергированного полимера непосредственно в ходе синтеза и сохранение молекулярных характеристик полимера благодаря изолированным условиям полимеризации. Основным технологическим ограничением выступает сравнительно низкая производительность процесса, обусловленная продолжительным временем полимеризации и конструктивными особенностями системы капсулирования.

Данный метод представляет особую ценность для производства специализированных полимерных композиций с точно заданными дисперсными характеристиками, где приоритет отдается чистоте и однородности продукта, а не высокой производительности процесса.

Получение присадки способом полимеризации в среде перфторированных или фторированных алканов

Процесс производства суспензионной ПТП осуществляется методом полимеризации высших альфа-олефинов в среде фторсодержащих органических растворителей.

Фторированные и перфторированные алканы (ПФА) являются инертной средой и не дезактивируют катализаторы Циглера-Натта. Важной характеристикой ПФА является то, что они не растворяют высшие альфа-олефины и их полимеры, что является важным условием для суспензионной полимеризации.

В результате образуется тонкодисперсная суспензия. Для перевода ее в товарную форму проводят замену ценных ПФА альтернативной дисперсионной средой (ДС), имеющей иную химическую природу. Фторорганические соединения применяют в качестве ДС благодаря способности легко отделяться от полимеров за счет разницы плотностей, что позволяет повторно использовать их без дополнительной очистки [1].

Технология замены включает следующие этапы: декантация фторорганического нерастворителя и последующее диспергирование полимера в новой дисперсионной среде с антиагломератором. В качестве дисперсионных сред наиболее широко применяются высшие алифатические спирты, гликоли (этиленгликоль, пропиленгликоль), простые эфиры [4].

Использование антиагломераторов (преимущественно стеарата кальция) создает ряд технологических сложностей. При перекачке светлых нефтепродуктов присутствие таких добавок крайне нежелательно, т. к. приводит к образованию несгораемого остатка в конечном продукте.

Технологический процесс требует обязательного предварительного переосаждения антиагломератора, которое осуществляется путем нагревания в спиртах для придания ему высокой удельной поверхности, что обеспечивает эффективное нанесение на суспендированный полимер.

Дополнительные проблемы связаны с применением спиртов при получении товарной формы присадки. Данные соединения вызывают загрязнение остаточных компонентов процесса – непрореагировавших альфа-олефинов и фторсодержащего растворителя. Это значительно осложняет организацию их рециркуляции в производственном цикле, снижая экономическую эффективность всего процесса.

Решением данной проблемы стало использование триглицеридов жирных кислот как дисперсионной среды. Применение триглицеридов жирных кислот обусловлено их ключевыми технологическими преимуществами: возможностью многократной рециркуляции без дополнительной очистки и нелетучестью, что существенно упрощает процесс регенерации мономеров методом простой перегонки. Важным аспектом данной технологии является исключение необходимости введения антиагломераторов, т. к. растительные масла обеспечивают достаточную стабилизацию дисперсной системы. Это достигается за счет их высокой химической инертности по отношению к полимерной фазе и оптимальным поверхностным свойствам, способствующим

самопроизвольному диспергированию частиц.

Получение присадки способом осаждения из раствора

Данный способ позволяет сократить количество стадий процесса и снизить деструкцию полимера на этапе его производства.

К полимеру с высокой ММ, полученному полимеризацией высших альфа-олефинов в среде растворителя, добавляют жидкость, не растворяющую полимер (например, изопропиловый спирт). Образование суспензии происходит при постепенном добавлении изопропилового спирта, который адсорбируется раствором полимера [2].

Предлагаемый метод обеспечивает сохранение молекулярно-массовых характеристик полимера при его переходе из истинного раствора в коллоидную форму, полностью исключая процессы деструкции полимерных цепей, что позволяет увеличить концентрацию активного вещества в товарной присадке до 35 % [6].

Преимуществами данной технологии является отсутствие необходимости в дополнительной стадии механического измельчения, которая может приводить к разрушению макромолекул, а также исключение термической деструкции полимера (по сравнению с термическим переосаждением).

Но недостатками данного метода являются:

- 1) невысокое качество полученного полимера;
- 2) большие объемы растворителей, которые необходимо регенерировать;
- 3) загрязнение окружающей среды;
- 4) высокая летучесть и токсичность изопропилового спирта;
- 5) повышенная вероятность нарушения устойчивости суспензии при хранении и агломерация частиц полимера.

Получение присадки способом термического переосаждения

Формирование тонкодисперсной суспензии достигается за счет термического переосаждения полимера в жидкой среде, которая при комнатной температуре выступает нерастворителем для данного полимерного соединения. Особенностью данной системы является наличие верхней критической температуры смешения, значение которой находится в диапазоне 40-60 °С.

Получение ПТП методом термического переосаждения включает следующие стадии:

1. Полимеризация высших альфа-олефинов с катализатором Циглера-Натта до глубокой конверсии мономера.
2. Предварительное измельчение продукта блочной полимеризации до размеров частиц более 1 мм, что не приводит к значительной деструкции частиц [3].
3. Смешение измельченного полимера с жидкостью-нерастворителем и, при необходимости, с антиагломератором и ингибитором деструкции.
4. Растворении полимера в жидкости при повышенной температуре.
5. Постепенное охлаждение присадки и получение товарной формы.

Преимущества способа:

- Исключение операций по регенерации большого объема растворителей.
- Получение полимерных частиц с узким фракционным составом (средний размер около 250 мкм), что обеспечивает высокую скорость растворения в углеводородных средах [3].
- Минимальное образование отходов на всех технологических стадиях, снижающее экологическую нагрузку.
- Недостатки способа:
- Необходимость предварительной стадии измельчения высокоэластичного полимера.
- При нагревании системы до критической температуры смешения и выше необходимо длительное время до полной гомогенизации раствора, что понижает производительность. Кроме того, происходит термическая деструкция полимера при длительном нагревании [2].
- Высокая вероятность расслоения при охлаждении и неустойчивость системы.

Вывод

На данный момент основными полимерами, применяемыми для производства противотурбулентных присадок, являются полиальфаолефины. Среди других полимеров, растворимых в углеводородных жидкостях, нет аналогов, сопоставимых по соотношению показателей цены и качества присадки. Рассмотренные методы получения присадок основаны на разных технологических подходах, поэтому каждая технология имеет свои преимущества и недостатки.

Исследования в области получения противотурбулентных присадок направлены на разработку способов, исключающих деструкцию макромолекул, что способствует повышению эффективности присадки. Методы синтеза присадок должны обеспечивать высокую производительность и качество активного компонента в конечном продукте.

Список литературы:

1. Патент № 2579583 С1 Российская Федерация, МПК С08F 110/14, С08F 2/06, С08F 10/14. Способ получения противотурбулентной присадки и противотурбулентная присадка, полученная на его основе: № 2015130502/05: заявл. 24.07.2015: опубл. 10.04.2016 / П. Г. Русинов, А. В. Балашов, И. Э. Нифантьев; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «НефтеТрансХим». – EDN NVXECQ. – Текст: непосредственный.
2. Сичи, У. Анализ применения химических реагентов для повышения энергоэффективности магистральных нефтепроводов: магистерская диссертация / У. Сичи; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа источников ресурсов (ИШПР), Отделение нефтегазового дела (ОНД); науч. рук. А. Л. Саруев. – Томск, 2018. – Текст: непосредственный.
3. Патент № 2481357 С1 Российская Федерация, МПК С08F 10/14, С08F 4/642, С08F 2/02. Способ получения противотурбулентной присадки суспензионного типа, снижающей гидродинамическое сопротивление

углеводородных жидкостей: № 2011139652/04: заявл. 30.09.2011: опубл. 10.05.2013 / Г. В. Несын, А. М. Ширяев, М. И. Валиев [и др.]; заявитель Открытое акционерное общество «Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть» (ОАО «АК «Транснефть»), Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт транспорта нефти и нефтепродуктов» (ООО «НИИ ТНН»). – EDN ZGRIBF. – Текст: непосредственный.

4. Патент № 2443720 С1 Российская Федерация, МПК С08F 255/08, С08F 10/14, С08F 2/18. Способ получения антитурбулентной присадки суспензионного типа: № 2010146020/04: заявл. 11.11.2010: опубл. 27.02.2012 / Г. В. Несын, В. С. Станкевич, Ю. В. Сулейманова [и др.]; заявитель Закрытое акционерное общество «СИБУР Холдинг». – EDN ZGHDPF. – Текст: непосредственный.

5. Несын, Г. В. Антитурбулентная присадка суспензионного типа на основе полимеров высших бб-олефинов / Г. В. Несын и др. – Текст: непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 112-115.

6. Патент № 2607914 С1 Российская Федерация, МПК В01F 3/08, С08F 10/14, С08F 4/642. Способ формирования и состав противотурбулентной присадки: № 2015150475: заявл. 24.11.2015: опубл. 11.01.2017 / В. Н. Манжай, А. В. Абдусаламов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН). – EDN WVRERD. – Текст: непосредственный.

© Рафиков Т. Д., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

аспирант **Кравчук Артем Алексеевич**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент

Доманов Виктор Иванович,
Ульяновский государственный технический университет,
г. Ульяновск, Российская Федерация

Аннотация. В работе особое внимание уделено надежности и показателям работы электродвигателей и полупроводниковых преобразователей. Приводится пример использования импульсно-векторной системы управления электроприводом.

Ключевые слова: электропривод, надежность, полупроводниковый преобразователь, импульсно-векторное управление, синхронная реактивная машина.

INVESTIGATION OF WAYS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

Postgraduate Student **Kravchuk Artem Alekseevich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Domanov Victor Ivanovich,
Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract. The work focuses on the reliability and performance of electric motors and semiconductor converters. An example of using a pulse vector control system for an electric drive is given.

Keywords: electric drive, reliability, semiconductor converter, pulse vector control, synchronous reaction machine.

В контексте технико-экономической оценки эффективности электропривода ключевым аспектом выступает его надежность. При идентичных условиях ее уровень зависит от рабочих режимов, условий эксплуатации и конструктивных особенностей. В течение всего периода функционирования электроприводов, рассматриваемых как электромеханические системы, необходимо проводить отслеживание и анализ их работы и условий эксплуатации с целью оптимизации надежности и увеличения периода безотказной службы. Прогресс экономики в индустриальном обществе влечет за собой рост объемов промышленного производства, в котором энергетика играет первостепенную роль. В современных электрических приводах отчетливо прослеживается тренд на

широкое внедрение вычислительных технологий. Это способствует расширению спектра выполняемых задач и переходу к прецизионным режимам функционирования, что необходимо для повышения интенсивности производственных операций. Однако это влечет за собой увеличение сложности архитектуры систем управления электроприводами, делая любые сбои в их работе более значимыми и затратными. По мере роста числа элементов в электроприводе, даже при условии их высокой индивидуальной надежности, совокупная надежность всей системы падает. Данный эффект объясняется тем, что выход из строя одного элемента нередко приводит к полному или частичному отказу всей системы. Значимое место в энергетике занимают полупроводниковые преобразователи напряжения, применяемые во всех фазах производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Надежность полупроводниковых устройств управления несколько выше, а их жизненный цикл обычно составляет 5-6 лет.

Ключевыми причинами поломок выступают нештатные ситуации, отклонения от рекомендованных условий использования и внезапный выход из строя отдельных элементов. Эксплуатация электрического привода в аномальных режимах может спровоцировать чрезмерное повышение температуры обмотки статора, что, в свою очередь, приведет к его неисправности и остановке работы.

Чтобы предотвратить поломки во время функционирования, конструкция преобразователя должна обеспечивать: дублирование ключевых компонентов с автоматическим переходом на резервный модуль при отказе основного элемента; возможность мониторинга электрических цепей полупроводникового преобразователя в процессе его использования. Сокращение времени простоя при ремонте достигается за счет модульного принципа построения конструкции. При таком подходе устройство разделяется на отдельные функциональные блоки и узлы, выполненные в виде легкозаменяемых конструкций, подключаемых к электрической схеме посредством штекерных соединителей. Сменные блоки должны обладать электрической и механической взаимозаменяемостью, то есть все электрические и механические параметры блоков должны соответствовать требованиям для обеспечения работоспособности устройства после их замены на запасных без дополнительной настройки и регулировки.

Значительная часть выпускаемых полупроводниковых преобразователей используется для электропитания и контроля электроприводов. Также широко применяются полупроводниковые преобразователи в электротехнологическом оборудовании, таком как электропечи, электронагреватели, сварочные аппараты, установки для электрофизической и электрохимической обработки металлов и т. п. Особую категорию составляют полупроводниковые преобразователи, применяемые для коррекции параметров сети. Среди компенсационных устройств наиболее многообещающими являются динамические компенсаторы искажений напряжения (ДКИН). Типовая структура такого преобразователя представлена на схеме, показанной на рисунке 1.

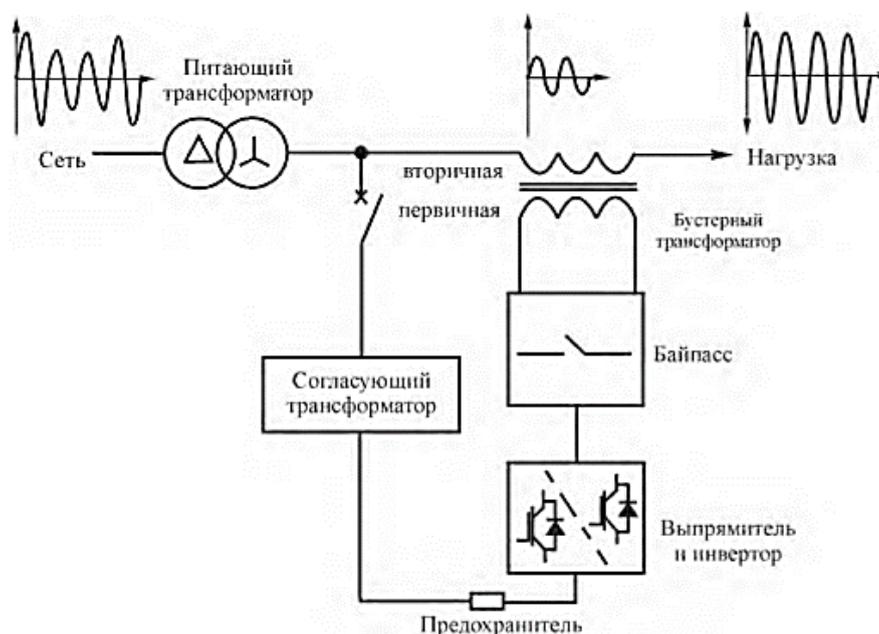


Рисунок 1 – Функциональная схема динамического компенсатора искажения напряжений

Для гарантированного и бесперебойного питания потребителей при кратковременных снижениях напряжения в электросетях используются динамические компенсаторы. ДКИН представляет собой полупроводниковый преобразователь напряжения, построенный на IGBT-модулях и подключенный к сети потребителя. Через специальный вольтодобавочный трансформатор происходит перераспределение мощности, позволяющее компенсировать провалы напряжения, возникающие при коротких замыканиях или просадках. Преобразователи на основе полупроводников находят широкое применение в системах электроприводов, управляющих критически важными механизмами. Вопросы надежности таких систем являются приоритетными. Необходимо подчеркнуть, что с увеличением мощности установок возрастает как их значимость, так и масштаб потенциальных последствий, вызванных их выходом из строя. На рис. 2 приведена гистограмма вероятности выхода из строя полупроводниковых преобразователей.

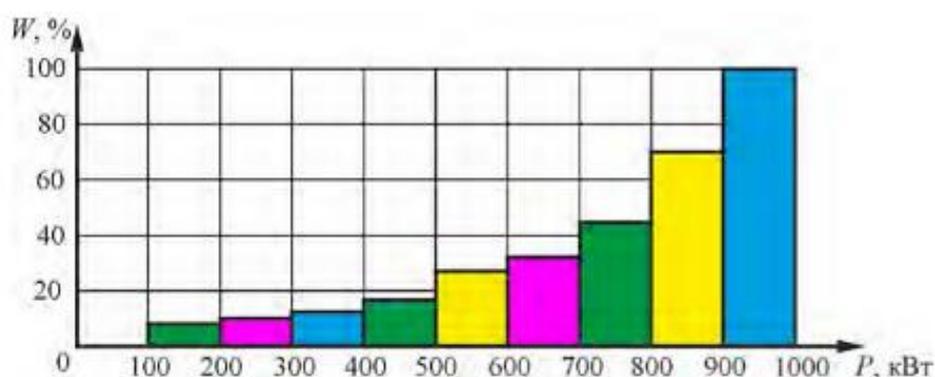


Рисунок 2 – Гистограммы вероятности выхода из строя полупроводниковых преобразователей

Разнообразие факторов может привести к неисправностям: от коротких замыканий и скачков напряжения до проблем с теплоотводом, просчетов в проектировании или неправильной эксплуатации. При этом, если рассматривать полупроводниковые преобразователи, на долю выпрямительного модуля и цепи постоянного тока приходится сравнительно небольшая часть – не более 15 % всех отказов.

Электроприводы, использующие инновационные и нестандартные конструкции электрических машин, демонстрируют наивысший уровень надежности. Подобные приводные системы выделяются широким спектром возможных конфигураций и технических реализаций. В последнее время электротехнические системы, использующие вентильно-индукторные электроприводы или реактивные двигатели, стали пользоваться значительной популярностью [1]. Существующие исследования альтернативных конфигураций электроприводов представляются ограниченными для их надежного внедрения в реальные производственные процессы, особенно в электроприводах, используемых в металлургическом оборудовании, известном своими сложными условиями функционирования [2]. Одним из примеров такой системы может служить импульсно-векторная система управления (ИВСУ) синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) [3]. Сама машина отличается простотой конструкции ротора и высокой технологичностью изготовления [4]. Первоначальная концепция реализации силовых цепей предусматривает использование многофазной системы с независимыми источниками электропитания для каждой фазы [5]. Отказ от индивидуальных источников в пользу более простой схемы приводит к структуре с импульсно-векторным управлением [3] (см. рис. 3).

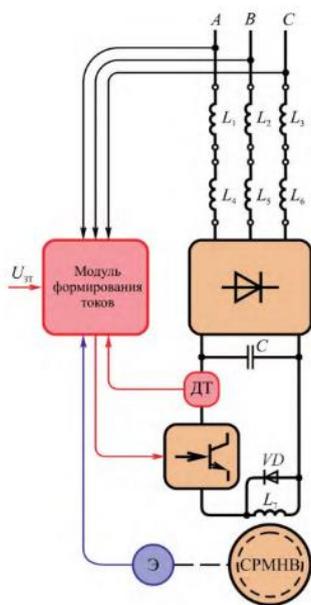


Рисунок 3 – Пример упрощенной схемы импульсно-векторного управления СРМНВ

На рисунке 3 L1...L6 – фазные обмотки машины, силовая часть полупроводникового преобразователя представляет собой трехфазную мостовую схему, выполненную на диодах, имеется всего один транзистор (независимо от фазности системы). Использование единственного IGBT-транзистора в преобразователе положительно сказывается на надежности системы, так как уменьшение числа компонентов повышает общую устойчивость схемы. Кроме того, такой подход снижает стоимость устройства. Импульсно-векторная модуляция позволяет регулировать скорость в диапазоне от 1:2 до 1:3.

Использование синхронного реактивного мотора с независимым возбуждением (СРМНВ) позволяет существенно повысить надежность электропривода – коэффициент надежности возрастает с 0,9 до 0,98. Это обусловлено несколькими факторами. В конструкции СРМНВ отсутствует потребность в обмотках возбуждения ротора. Как следствие, исключается необходимость в возбuditеле как компоненте системы управления, а также в контактных кольцах и щеточно-коллекторном узле. Улучшенная механическая прочность ротора способствует снижению вибраций, что благоприятно влияет на эксплуатацию подшипников двигателя. И, наконец, упрощенная схема силовых цепей преобразователя, включающая всего один IGBT-транзистор, также вносит вклад в общую надежность электропривода.

Список литературы:

1. Бычков, М. Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы / М. Г. Бычков. – Текст: непосредственный // Электричество. – 1998 – № 6. – С. 50-53.
2. Бычков, М. Г. Основы теории, управление и проектирование вентильно-индукторного электропривода: специальность 05.09.03 «Электрические комплексы и системы»: дис. На соиск. ... д-ра. техн. наук / Михаил Григорьевич Бычков; Московский энергетический институт (Технический университет. – М., 1999. – 372 с. – Текст: непосредственный.
3. Пат. 2510877 Российская Федерация, МПК H02P27/04. Электропривод с синхронной реактивной машиной / Ю. С. Усынин, А. Н. Горожанкин, А. Е. Бычков, Е. В. Белоусов, А. М. Журавлев. – № 2012143554/07; заявл. 11.10.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. – Текст: непосредственный
4. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения / Ю. С. Усынин, М. А. Григорьев, К. М. Виноградов, А. С. Герасимов. – Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3, № 11(27) – С. 80-83.
5. Основы теории электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю. С. Усынин, С. А. Чупин, М. А. Григорьев и др. – Текст: непосредственный // Тр. VII Международной (XVIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу «АЭП–2012». – Иваново, 2012. – С. 31-34.

© Кравчук А. А., 2025

О ПРИМЕНЕНИИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ В СЕТЯХ 6-35 кВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

магистрант **Мустакимов Амир Марсович**,
доцент **Гатауллин Айрат Мухамедович**,
науч. руководитель: канд. техн. наук, доцент **Губаев Дамир Фатыхович**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе проводится анализ требований к заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ. Определены виды заземления нейтрали в данных сетях. Рассмотрен мировой опыт заземления нейтрали с определением целесообразности применения конфигурации заземления через дугогасящий реактор с параллельным присоединением низкоомного резистора. При анализе Правил устройства электроустановок определены условия, при которых применяется заземление нейтрали через дугогасящий реактор. Определены также условия применения дугогасящих реакторов на подстанциях с выделением преимуществ их применения.

Ключевые слова: сети, электроснабжение, дугогасящий реактор, заземление нейтрали, однофазное замыкание на землю.

ON THE USE OF ARC-EXTINGUISHING REACTORS IN 6-35 kV NETWORKS AND THE SPECIFICS OF THEIR OPERATION

Master Student **Mustakimov Amir Marsovich**,
Associate Professor **Gataullin Ayrat Mukhamedovich**,
Academic Advisor: PhD in Engineering, Associate Professor
Gubaev Damir Fatykhovich,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. In this paper, the requirements for neutral grounding in 6-35 kV networks are analyzed. The types of neutral grounding in these networks have been determined. The world experience of neutral conductor grounding is considered with the determination of the expediency of using a grounding configuration through an arc-extinguishing reactor with parallel connection of a low-resistance resistor. When analyzing the Rules for electrical installations, the conditions under which neutral grounding is applied through an arc-extinguishing reactor are determined. The conditions for the use of arc-extinguishing reactors at substations are determined, highlighting the advantages of their use.

Keywords: networks, power supply, arc extinguishing reactor, neutral grounding, single-phase earth fault.

В настоящее время вопрос заземления в сетях 6-35 кВ является достаточно важным аспектом в обеспечении надежного электроснабжения потребителя. Необходимо выделить требования к режиму заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ:

- в месте замыкания ток однофазного замыкания на землю и величина перенапряжения на неповрежденных фазах не должна влиять на электроснабжение потребителя;
- конфигурация и схема релейной защиты от ОЗЗ должна соответствовать необходимым требованиям селективности;
- уровень и объем изоляции оборудования должен обладать необходимым запасом прочности;
- определение количества, состава и характеристик ограничителей перенапряжения для защиты от перенапряжений в сети;
- надежность электроснабжения потребителя;
- обеспечение необходимого сопротивления контура заземления объекта электроэнергетики;
- безопасность проведения работ персоналом и защищенности оборудования при ОЗЗ [1, 2].

Исходя из данных требований к заземлению нейтрали, можно отметить, что существует достаточно большой набор технических решений, реализуемых в сетях 6-35 кВ. В рассматриваемых сетях реализуется четыре режима заземления нейтрали (рис. 1).

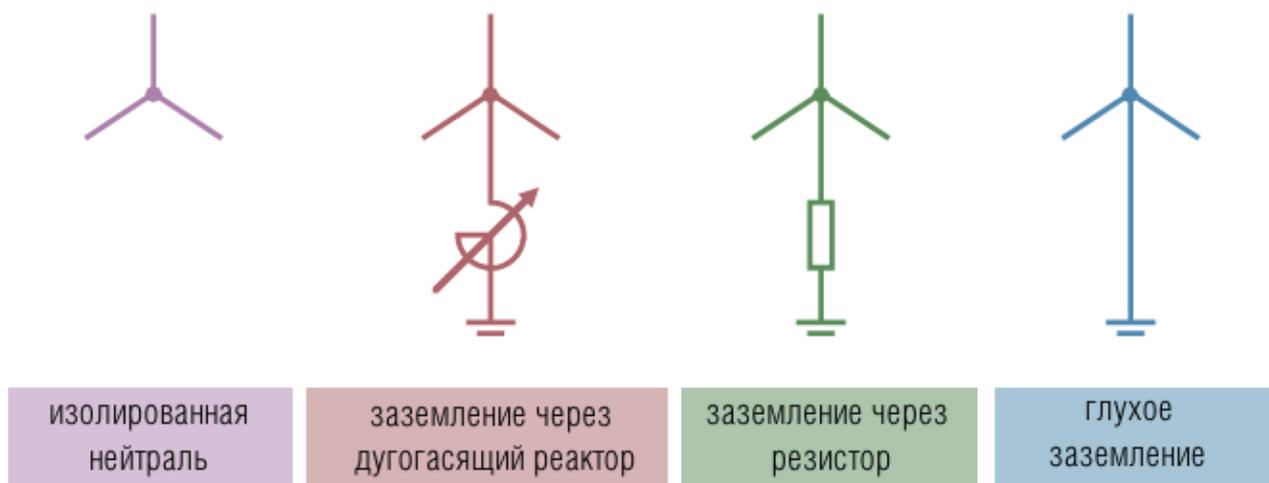


Рисунок 1 – Режимы заземления нейтралей, реализуемые в сетях 6-35 кВ

В мировой электроэнергетике в сетях до 69 кВ используется четыре варианта заземления нейтральной точки электрической сети: изолированная; заземленная через дугогасящий реактор (ДГР); заземленная через высокоомный или низкоомный резистор; глухозаземленная, которая не применяется в сетях среднего напряжения в Российской Федерации.

Помимо этого, необходимо выделить, что в мире применяется комбинация с ДГР и резисторами. Такой режим заземления нейтрали применяется в сетях

20 кВ в Германии. Дугогасящий реактор обеспечивает гашение перекрытий изоляции при замыканиях на землю, тем самым снижая емкость в сети, а низкоомный резистор подключается только кратковременно во время специальным однофазным выключателем, параллельно реактору. Низкоомный резистор таким образом обеспечивает селективность релейной защиты за счет определения фидера с устойчивым ОЗЗ [3].

Анализируя нормативную документацию в Российской Федерации, можно отметить, что в пункте 1.2.16 Правил устройства электроустановок закреплено следующее: «Работа электрических сетей напряжением 2-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор» [4]. В ходе анализа регламентирующих документов, которые определяют режим заземления нейтрали выявлено, что четких требований к конкретному заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ не присутствует.

Помимо этого, необходимо выделить, что в сетях до 20 кВ с железобетонными и металлическими опорами необходимо обязательно использовать средства компенсации емкостных токов, а также до 35 кВ, где емкостные токи могут достигать более 10 ампер (А). Дополнительно регламентируется, что в сетях, где не присутствуют железобетонные и металлические опоры, требуется применять средства в сетях 3-6 кВ с токами более 30 А, 10 кВ – более 20 А, а в сетях 15-20 кВ – более 15 А. Также необходимо отметить, что в схемах с генераторами от 6 до 20 кВ необходима компенсация емкостных токов при величине более 5 А [5].

На рисунке 2 приведен пример подстанции 110/10 кВ с двумя трансформаторами, на которой заземление нейтрали реализовано через дугогасящий реактор.

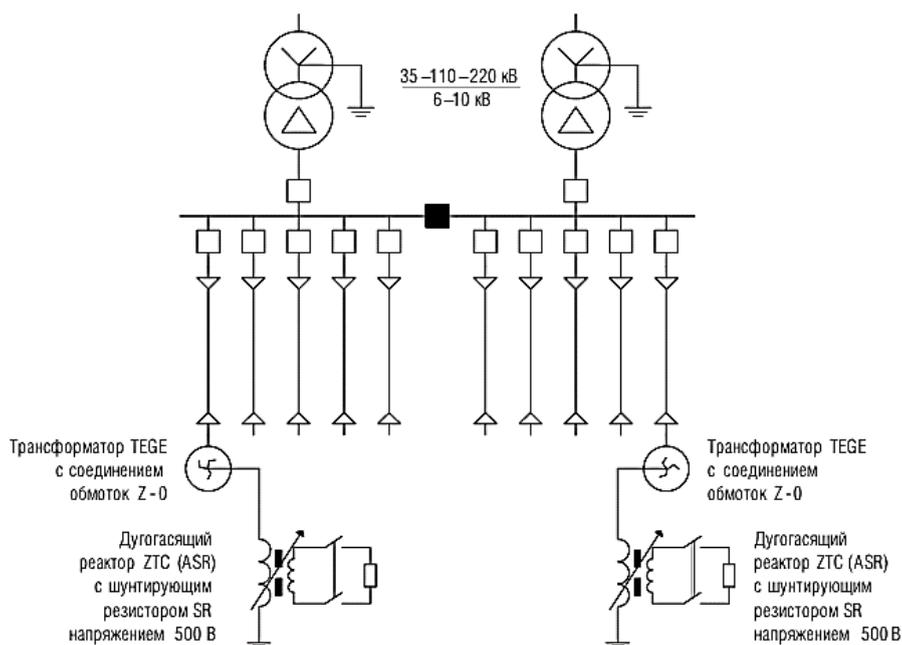


Рисунок 2 – Понижающая подстанция 110/10 кВ с нейтралью по низкой стороне, реализованной через дугогасящий реактор

Необходимо отметить особенности эксплуатации такого режима заземления нейтрали: при ОЗЗ в сети с дугогасящим реактором возникают большие по величине емкостные токи, которые компенсируются индуктивной составляющей, равной по величине емкостной. Это позволяет обеспечить нулевое значение тока, что дает возможность при возникновении первого ОЗЗ не отключать линию электропередач и обеспечивать потребителя электроэнергией. Особенно популярно применение дугогасящего реактора на подстанциях, где присутствует большое количество кабельных линий [6].

Данное техническое решение в виде дугогасящего реактора в сетях 6-35 кВ имеет следующие преимущества:

- отсутствие необходимости отключения потребителя при однофазном замыкании на землю;
- несрабатывание токовой отсечки на линии, т. к. при ОЗЗ наблюдаются достаточно малые остаточные токи;
- при однофазных замыканиях возможна самоликвидация повреждения;
- использование ДГР позволяет организовать селективность релейной защиты от ОЗЗ;
- использование данного технического решения позволяет исключать повреждения трансформаторов напряжения в ходе возникновения феррорезонансных явлений;
- при применении ДГР в сети увеличивается чувствительность сигнализации при однофазном замыкании на землю через большое переходное сопротивление. Анализируя опыт внедрения дугогасящих реакторов показывает, что при существенных емкостных токах в сети 6 кВ и активной проводимости цепи в месте замыкания может превышать 10 кОм. Наличие правильно настроенного в резонанс ДГР может выявлять замыкания на землю даже при больших значениях переходного сопротивления – 10 кОм и менее.

Говоря о российских электрических сетях 6-35 кВ с дугогасящими реакторами можно выделить, что конструктивно реализованы они в следующих конфигурациях – ручное регулирование и с подмагничиванием. Но к сожалению, без шунтирующего резистора возможна проблема с организацией селективности релейной защиты от однофазных замыканий на землю. Это приводит к тому, что в таких сетях не могут применяться простые токовые защиты и направленные защиты. В связи с тем, что ДГР компенсирует ток ОЗЗ в месте повреждения до нулевых значений.

Также режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор со шунтирующим резистором низкого напряжения, подключенным к вторичной обмотке силового трансформатора напряжением 500 В, обеспечивает возможность реализации селективной защиты от замыканий на землю (рисунок 3). Такие защиты запускаются и срабатывают на сигнал, не на отключение в данных сетях.

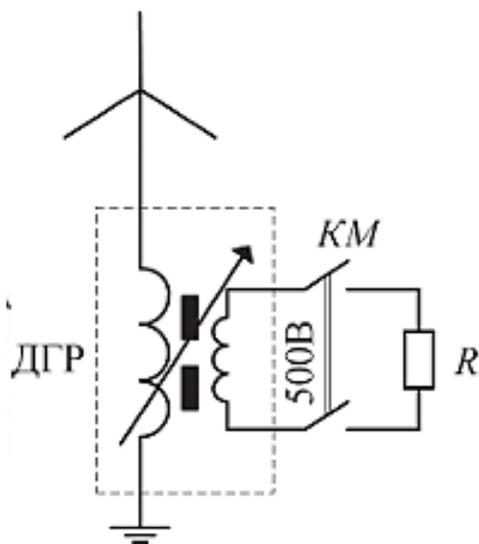


Рисунок 3 – Дугогасящий реактор в сети 10 кВ с низковольтным шунтирующим резистором

Наличие низковольтного шунтирующего резистора обеспечивает следующую логику: перед моментом однофазного замыкания ДГР настроен в резонанс, а резистор отключен. На начальном этапе замыкания дуга зажигается, но неустойчива, переменнo гасится и зажигается.

Важно отметить, что в этот момент реактор компенсирует емкостный ток, что способствует гашению дуги и неотключению фидера. В случаях устойчивости замыкания в дугогасящих реакторах с выдержкой времени подключается шунтирующий резистор, который включается командой регулятора реактора.

Время включения резистора составляет от одной до трех секунд. За это время шунтирующий резистор создает некоторый активный ток в поврежденном фидере. Но при этом, данного тока достаточно для обеспечения селективности работы релейной защиты от замыканий на землю.

При нормальном режиме работы сети шунтирующий резистор отключен от дугогасящего реактора и никакoм образом не влияет на точность настройки компенсации ДГР. Во время замыкания резистор подключается до 3 секунд, но при этом, если за этот промежуток времени замыкание самоустранивается, то резистор отключается регулятором дугогасящего реактора. Также важно отметить, если ДГР определяет, что однофазное замыкание возникло и держится более 5 секунд, то также включается низковольтный резистор.

При применении в сетях 6-35 кВ дугогасящих реакторов с низковольтными резисторами можно повысить надежность работы сети, а также снизить аварийность при ОЗЗ. Но в последнее время наблюдается возросшая аварийность в сетях данного уровня напряжения. Это объясняется тем, что дугогасящие реакторы некоторых производителей не соответствовали требованиям и техническим параметрам сети.

Подводя итоги, можно сказать, что применение дугогасящих реакторов в сетях 6-35 кВ обуславливается рассчитываемым электроэнергетическим режимом в данной схеме. Помимо этого, необходимо выделить, что ДГР позволяет обеспечивать надежность электроснабжения потребителя за счет компенсации емкостных токов в сетях при однофазных замыканиях на землю.

Список литературы:

1. Гатауллин, А. М. Функциональные покрытия с использованием наноматериалов для электроэнергетики / А. М. Гатауллин, Д. Ф. Губаев. – Текст: непосредственный // Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике : коллективная монография. Том 2. – Казань : Издательство Казанского государственного энергетического университета, 2014. – С. 209-218.
2. Гатауллин, А. М. Интеллектуальная система энергоснабжения, учитывающая степень загрязнения изоляторов / А. М. Гатауллин. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей, Нижний Новгород, 17 декабря 2019 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2019. – С. 166-172. – EDN CORUOG.
3. Афанасенко, А. С. Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и селективность релейной защиты от однофазных замыканий на землю / А. С. Афанасенко, Г. С. Кудряшев. – Текст: электронный // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. – 2014. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 06.04.2025).
4. Министерство энергетики Российской Федерации. Правила устройства электроустановок / Министерство энергетики Российской Федерации. – 6-е и 7-е. – М., 2003 – 504 с.
5. О технических требованиях к дугогасящим реакторам в распределительных сетях 6-35 кВ / Д. А. Матвеев, А. М. Быкова, А. В. Жуйков [и др.]. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 2016. – № 8. – С. 3-8.
6. Титенков, С. С. Режимы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю / С. С. Титенков, А. А. Пугачев. – Текст: непосредственный // Энергоэксперт. – 2010. – № 2. – С. 18-25.

© Мустакимов А. М., Гатауллин А. М., 2025

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ

студент **Зиятдинова Анна Романовна**,
науч. руководитель: канд. экон. наук, доцент **Уразбахтина Лилия Равилевна**,
Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Импортозамещение в топливно-энергетическом комплексе России стало одной из ключевых стратегий в условиях глобальных экономических изменений и санкционного давления. В статье рассматриваются основные направления и механизмы реализации стратегий импортозамещения, а также их влияние на устойчивое развитие сектора. Описаны ключевые программы и инициативы, направленные на создание собственных технологических решений и развитие отечественных производителей. Особое внимание уделено проблемам и вызовам, связанным с реализацией стратегии импортозамещения, а также предложены пути их преодоления. Обоснована важность комплексного подхода к решению вопросов технологического суверенитета и повышения конкурентоспособности отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Ключевые слова: импортозамещение, топливно-энергетическая отрасль, технологическое развитие, санкции, нефтегазовая промышленность, государственная политика, экономическая безопасность.

IMPLEMENTATION OF THE IMPORT SUBSTITUTION STRATEGY IN THE FUEL AND ENERGY COMPLEX OF RUSSIA

Student **Ziyatdinova Anna Romanovna**,
Academic Advisor: PhD in Economics, Associate Professor,
Urazbakhtina Liliya Ravilevna,
Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russian Federation

Abstract. Import substitution in the fuel and energy complex of Russia has become one of the key strategies in the context of global economic changes and sanctions pressure. The article examines the main directions and mechanisms for implementing import substitution strategies, as well as their impact on the sustainable development of the sector. Key programs and initiatives aimed at creating our own technological solutions and developing domestic manufacturers are described. Particular attention is paid to the problems and challenges associated with the implementation of the import substitution strategy, and ways to overcome them are proposed. The importance of an integrated approach to solving issues of technological sovereignty and increasing the competitiveness of domestic products in

the domestic and foreign markets is substantiated.

Keywords: import substitution, fuel and energy industry, technological development, sanctions, oil and gas industry, public policy, economic security.

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) России традиционно играет ключевую роль в экономике страны, обеспечивая значительную долю бюджетных поступлений и являясь основным экспортером энергоресурсов. Вместе с тем, длительное время отрасль зависела от импорта сложного оборудования и технологий, что создавало риски для энергетической безопасности страны. Ситуация усугубилась после введения западных санкций против России, которые ограничили доступ к современным западным технологиям и оборудованию. В связи с этим вопрос импортозамещения стал одной из центральных задач государственной политики в сфере ТЭК.

Одним из наиболее сложных направлений стала разработка технологий для добычи трудноизвлекаемых запасов нефти и газа. Здесь отечественным производителям пришлось конкурировать с мировыми лидерами, такими как Schlumberger и Halliburton. В качестве примеров успешных проектов можно привести разработку отечественного оборудования для гидроразрыва пласта (ГРП) и бурового инструмента. Компании, такие как «Новомет» и «Уралмаш Нефтегазовое оборудование», сумели создать конкурентоспособные продукты, способные заменить зарубежные аналоги [1].

Транспортировка энергоресурсов – еще одно направление, где импортозамещение играет ключевую роль. Строительство магистральных трубопроводов, таких как «Северный поток-2» и «Сила Сибири», потребовало значительных вложений в разработку и производство отечественного оборудования. Важно отметить, что санкции против ряда российских проектов привели к необходимости ускоренной локализации производства компрессорного оборудования и сварочной техники.

Нефтепереработка и нефтехимия являются одними из наиболее зависимых от импорта секторов ТЭК. Тем не менее, в последние годы был сделан значительный прогресс в создании отечественных катализаторов и оборудования для нефтепереработки. Компания «Газпромнефть» активно развивает собственные технологии глубокой переработки нефти, что позволяет минимизировать зависимость от иностранных поставщиков [1].

Проблема импортозамещения в ТЭК возникла еще в 1990-е годы, когда российская экономика столкнулась с резким сокращением инвестиций в наукоемкие отрасли. В результате многие предприятия стали зависеть от зарубежных поставщиков оборудования и технологий. К началу 2000-х годов ситуация начала улучшаться благодаря росту цен на нефть и газ, однако зависимость от импорта сохранялась.

Особое значение вопрос импортозамещения приобрел после 2014 года, когда были введены первые пакеты санкций против России. Ограничения коснулись, в частности, поставок оборудования для добычи трудноизвлекаемой нефти, арктических проектов и шельфовых разработок. Эти ограничения вынудили Россию активизировать усилия по созданию собственных аналогов

критически важных технологий [2].

Несмотря на очевидные успехи, процесс импортозамещения сталкивается с рядом серьезных вызовов:

1. Недостаток финансирования. Многие проекты требуют значительных капиталовложений, которых не хватает у большинства отечественных предприятий.

2. Низкая инновационная активность. Долгие годы российская наука и промышленность отставали в разработке новых технологий, что усложняет быстрое замещение зарубежных аналогов.

3. Отсутствие квалифицированных кадров. Недостаточная подготовка специалистов в технических областях замедляет процессы разработки и внедрения новых продуктов.

4. Конкуренция с зарубежными производителями. Российским компаниям приходится конкурировать с международными гигантами, обладающими значительным опытом и ресурсами [3].

Для успешного импортозамещения необходимы следующие меры:

- увеличение государственных инвестиций: создание специализированных фондов поддержки и выделение целевых субсидий для разработчиков и производителей;
- поддержка научно-исследовательских работ: активизация сотрудничества между научными учреждениями и предприятиями для ускорения разработки новых технологий;
- подготовка кадров: разработка образовательных программ, ориентированных на подготовку специалистов в области высоких технологий;
- создание благоприятных условий для бизнеса: упрощение бюрократических процедур, снижение налоговой нагрузки и предоставление льготных кредитов для малого и среднего бизнеса.

Для реализации поставленных целей правительство принимает ряд мер, направленных на поддержку отраслей ТЭК. Среди них:

1. Государственная поддержка проектов модернизации и инноваций. Государство выделяет субсидии и гранты на разработку, и внедрение новых технологий в сфере энергетики.

2. Стимулирование инвестиций в ТЭК. Для привлечения частных инвесторов создаются льготные налоговые режимы и предоставляются государственные гарантии.

3. Международное сотрудничество. Россия активно развивает партнерские отношения с зарубежными странами в области энергетики, участвуя в международных проектах и соглашениях [1].

Результаты реализации стратегии уже ощутимы. За последние годы значительно возросли объемы добычи и экспорта углеводородов, модернизированы ключевые объекты инфраструктуры, начато активное развитие ВИЭ. Однако перед отраслью стоят новые вызовы, такие как необходимость адаптации к изменениям климата, переход к низкоуглеродной экономике и усиление конкуренции на мировых рынках энергоресурсов [4].

Перспективы дальнейшего развития ТЭК связаны с углублением интеграции науки и промышленности, ускорением цифровизации процессов, а также активным участием в глобальных инициативах по устойчивому развитию.

Для успешной реализации стратегии импортозамещения в топливно-энергетическом комплексе России рекомендуется сосредоточиться на нескольких ключевых направлениях. Во-первых, необходимо усилить государственную поддержку, увеличив финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, предоставляя налоговые льготы и субсидии предприятиям, разрабатывающим и производящим отечественное оборудование. Также важно создать специальные фонды для поддержки малых и средних предприятий, работающих в сфере импортозамещения.

Во-вторых, необходимо разработать образовательные программы, обеспечивающие подготовку высококвалифицированных специалистов в технических и инженерных специальностях, организовывать стажировки и обмены опытом с ведущими иностранными компаниями, а также поддерживать программы переподготовки и повышения квалификации работников отрасли.

В-третьих, следует совершенствовать нормативно-правовую базу, ужесточая требования к доле отечественных комплектующих и материалов в государственных закупках, вводя преференции для российских производителей при участии в тендерах и конкурсах, а также устанавливая обязательные квоты на использование отечественного оборудования в крупных инфраструктурных проектах.

Кроме того, важно интегрировать науку и промышленность, укрепляя связи между научными институтами и промышленными предприятиями для ускорения внедрения новых технологий, создавая совместные исследовательские центры и технопарки, специализирующиеся на разработках в области ТЭК, и поощряя трансфер технологий и коммерциализацию научных достижений [5].

Также необходимо укреплять международное сотрудничество, развивая партнерство с дружественными странами в области обмена технологиями и оборудованием, участвуя в международных проектах и программах, направленных на совместное решение технологических задач, и продвигая российские разработки на международные рынки.

Наконец, рекомендуется внедрять цифровые технологии и автоматизированные системы управления на всех этапах производственного цикла, использовать большие данные и искусственный интеллект для оптимизации процессов добычи, переработки и транспортировки энергоресурсов, а также инвестировать в развитие кибербезопасности и защиту критически важной инфраструктуры.

Эти меры помогут ускорить процесс импортозамещения, повысить эффективность и конкурентоспособность топливно-энергетической отрасли России, а также укрепить ее позиции на мировом рынке энергоресурсов.

Импортозамещение в топливно-энергетическом комплексе России

представляет собой стратегически важный вектор развития, направленный на обеспечение энергетической независимости и устойчивости экономики в условиях внешних ограничений. Реализованные меры позволили достичь определенных успехов в замене зарубежных технологий и оборудования отечественными аналогами, особенно в таких сферах, как добыча углеводородов, транспортировка энергоресурсов и переработка нефти.

Однако процесс импортозамещения сталкивается с серьезными вызовами, связанными с недостатком финансирования, низкой инновационной активностью и нехваткой квалифицированных кадров. Для успешного преодоления этих трудностей требуются дополнительные государственные инвестиции, активная поддержка научно-исследовательской деятельности и создание благоприятных условий для бизнеса.

Комплексный подход, включающий государственное регулирование, стимулирование частного сектора и взаимодействие науки и промышленности, станет ключевым фактором успеха в достижении технологической независимости и повышении конкурентоспособности российского топливно-энергетического комплекса на мировом рынке.

Список литературы:

1. Министерство энергетики Российской Федерации. Стратегия развития ТЭК до 2035 года. – М.: Минэнерго, 2020. – Текст: непосредственный.
2. Горбатко, Е. С. Инвестиционная политика Российской Федерации: влияние санкций / Е. С. Горбатко, А. И. Жаднов. – Текст: электронный // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/24FAVN323.pdf> (дата обращения: 27.03.2025).
3. Кармова, Б. З. Решение проблем импортозамещения в России в условиях санкций / Б. З. Кармова, А. А. Кожаев. – Текст: непосредственный // Журнал «Экономика и бизнес: теория и практика». – 2024. – № 3-1(109). – С. 151-156. – DOI:10.24412/2411-0450-2024-3-1-151-157.
4. Бусыгина, А. А. Импортозамещение как вектор развития отрасли энергетики РФ в условиях современных угроз / А. А. Бусыгина, Л. Р. Уразбахтина. – Текст: непосредственный // Проблемы научной мысли. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 140-145.
5. Попова, Н. И. Импортозамещение в современной России: проблемы и перспективы / Н. И. Попова, Т. Л. Сергеева. – Текст: непосредственный // BENEFICIUM. – 2022. – № 2(43). – С. 73-84. – DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2022.2(43).73-84.

© Зиятдинова А. Р., 2025

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА: ВОЗМОЖНОСТИ И БАРЬЕРЫ

студент **Журова Инна Сергеевна**,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Современный энергетический сектор трансформируется под влиянием цифровых технологий, таких как P2P-энергетика («от пользователя к пользователю»), блокчейн, IoT (интернет вещей), ИИ (искусственный интеллект) и Smart Grid (умные сети). Эти решения способствуют децентрализации, повышению эффективности и устойчивости энергосистем, но сталкиваются с технологическими, финансовыми и организационными барьерами. В статье анализируются ключевые технологии и их синергия, а также ограничения для успешной цифровизации.

Ключевые слова: цифровизация энергетики, децентрализация, P2P-энергетика, технологии, барьеры.

HIGH TECHNOLOGIES IN DIGITALIZATION OF ENERGY SECTOR: OPPORTUNITIES AND BARRIERS

Student **Zhurova Inna Sergeevna**,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The modern energy sector is undergoing transformation driven by digital technologies like P2P(peer to peer) energy trading, blockchain, IoT (internet of things), AI (artificial intelligence), and Smart Grids. These solutions enable decentralization, efficiency, and sustainability but face technological, financial, and organizational barriers. The article analyzes key technologies and their synergies, as well as limitations for successful digitalization.

Keywords: digitalization of energy, decentralization, P2P energy, technologies, barriers.

Современный энергетический сектор переживает масштабную трансформацию, обусловленную необходимостью перехода к устойчивому развитию, декарбонизации и повышению эффективности использования ресурсов. Традиционные централизованные энергосистемы сталкиваются с вызовами, такими как рост спроса на энергию, нестабильность возобновляемых источников энергии и высокие эксплуатационные издержки. В связи с этим цифровые технологии, включая P2P-энергетику, блокчейн, IoT и (ИИ) становятся ключевыми драйверами перехода к интеллектуальным, децентрализованным и устойчивым энергосистемам.

В мире энергетики формируется новая парадигма, основанная на концепции P2P (peer-to-peer) рынков. Эта модель дополняет централизованные системы, снижая их нагрузку в пиковые периоды. В рамках P2P структуры каждый участник сети становится не только потребителем энергии, но и ее поставщиком. Это означает, что энергия может продаваться напрямую между участниками без необходимости в посредниках [1, с. 64-65]. Например, домохозяйства с солнечными панелями объединяются в единую сеть и могут продавать друг другу избыточную энергию через специальное приложение. Это выгодно всем: продавец зарабатывает, а покупатели получают дешевую электроэнергию, за счет снижения транзакционных издержек.

Для обеспечения этого процесса используются умные счетчики и адаптивные алгоритмы взаиморасчетов, которые функционируют в режиме реального времени, а для принятия решений с целью повышения производительности, безопасности и устойчивости энергосистем используются оцифрованные данные. Диджитализация, или цифровизация, в энергетике представляет процесс внедрения цифровых технологий в различные аспекты энергетического сектора, включая производство, распределение, потребление и управление энергоресурсами. Этот процесс охватывает множество высоких технологий, таких как Интернет вещей (IoT) и промышленный Интернет вещей (IIoT); искусственный интеллект (ИИ), большие данные и машинное обучение; блокчейн и распределительные реестры; беспилотные транспортные средства; цифровые двойники и дополненная виртуальная реальность; облачные и квантовые вычисления.

Ключевую роль в новой экосистеме P2P играет блокчейн (цепочка блоков информации). Это технология распределенного реестра, которая создает безопасную среду для взаимодействия участников P2P рынка, обеспечивая бесперебойную работу, прозрачность и надежность сделок благодаря алгоритмам записи информации через преобразование данных в строку символов установленного объема, или хеш. Так, например, дом с солнечными панелями генерирует больше энергии, чем нужно. Избыточная энергия регистрируется в блокчейне. Соседи могут видеть доступную энергию и покупать ее напрямую по более низкой цене, чем у традиционного поставщика. Транзакции фиксируются в блокчейне и становятся доступными для всех участников сети, что обеспечивает прозрачность и безопасность. Также блокчейн использует криптографию для защиты данных, что делает его устойчивым к взломам и мошенничеству. Это позволяет минимизировать риски мошенничества и повысить доверие между участниками.

Кроме того, блокчейн позволяет использовать смарт-контракты – программируемые контракты, которые автоматически выполняются при выполнении определенных условий. Например, когда производится продажа избыточной энергии, смарт-контракт автоматически переводит средства и фиксирует транзакцию [2, с. 340-342].

Таким образом, интеграция P2P моделей и блокчейн-технологий способствует децентрализации и цифровизации энергетической сферы, открывая новые горизонты для устойчивого и эффективного использования

энергетических ресурсов. Однако технология блокчейн имеет недостатки, которые препятствуют ее масштабному применению. Так, существует риск атаки в случае, если один майнер или группа майнеров возьмет под контроль более 51 % хешрейта сети, они смогут манипулировать транзакциями, включая возможность их аннулирования. Это ставит под угрозу целостность всей системы и может вызвать недоверие со стороны пользователей. Кроме вопроса кибербезопасности при масштабировании использования технологии возникает проблема высоких экономических издержек: комиссии за транзакции растут по мере увеличения популярности блокчейн-сетей, что делает их обработку дорогостоящей для пользователей. При этом скорость транзакций остается низкой. Хотя обновления системы направлены на увеличение ее пропускной способности, все еще требуются дополнительные тестирования для ее совершенствования.

Также нельзя игнорировать высокую энергозатратность блокчейн-технологий, которые требуют значительных ресурсов для бесперебойной работы, что приводит к высоким издержкам на оборудование и эксплуатацию [3]. Таким образом, несмотря на потенциал блокчейн-технологий в энергетике, вышеупомянутые недостатки представляют собой серьезные вызовы, которые препятствуют достижению их широкого применения и эффективности.

Для оптимизации P2P торговли энергией используется технология Интернета вещей (IoT), которая позволяет пользователям лучше управлять своими ресурсами и получать максимальную выгоду от своих инвестиций.

Концепция Интернета вещей предоставляет новые возможности для различных отраслей, особенно для энергетического сектора, где ожидаются значительные изменения в организации труда и производственных процессов. Считается, что IoT станет одним из основных трендов, определяющих развитие мировой экономики в ближайшие десятилетия.

Интернет вещей представляет собой сеть физических объектов, оснащенных встроенными датчиками, программным обеспечением и другими технологиями, позволяющими им обмениваться данными через интернет. Эти объекты могут быть разнообразными: от бытовых приборов и автомобилей до промышленных машин и инфраструктуры.

В энергетике IoT применяется в двух ключевых областях: оптимизации потребления ресурсов и мониторинге состояния оборудования для своевременного обслуживания и предотвращения аварий. Использование сенсоров и датчиков, подключенных к интернету, позволяет создавать «умные» электросети и инфраструктуру Smart Grids, что значительно повышает эффективность энергоснабжения [4, с. 31-33]. Внедрение IoT может сократить затраты на энергоснабжение на 20-30 % за счет повышения эффективности управления ресурсами. Более того, использование «умных» счетчиков может снизить потребление энергии домохозяйствами на 10-15 % [5]. Хотя говорить о полностью сформированном потребительском рынке IoT в энергетике пока рано, так как многие комплексные проекты находятся на этапе коммерциализации, и лишь немногие компании фиксируют прибыль. Тем не менее с 2014 года количество организаций, рассматривающих IoT как

стратегическое направление, значительно возросло, а средний рост продуктов и решений, связанных с IoT, составил около 50 % в год [6]. Это свидетельствует о растущем интересе к технологиям, которые могут трансформировать энергетическую отрасль, благодаря повышению продуктивности сети за счет интеграции процессов и устройств. Однако при этом также снижается отказоустойчивость системы. Любой сбой в программном обеспечении или некорректная работа отдельных устройств способны заблокировать работу всей системы.

Более узкая категория IoT, которая фокусируется на использовании подключенных к сети Интернет-устройств в промышленности и производстве представляет Промышленный интернет вещей (IIoT). Это многоуровневая система, где различные объекты энергетических предприятий взаимодействуют друг с другом для выполнения производственных и экономических задач. IIoT позволяет автоматизировать управление этими объектами, снижая необходимость в человеческом вмешательстве [7, с. 97-100]. Это способствует повышению эффективности, улучшению мониторинга и управлению ресурсами в энергетическом секторе, а также оптимизации процессов и сокращению затрат. В глобальном масштабе технология IIoT считается основным направлением четвертой промышленной революции, которая заключается в интеграции физического и виртуального миров.

Другой высокотехнологичной отраслью цифровизации энергетики является развитие искусственного интеллекта. С его помощью успешно решается проблема возобновляемых источников, которая заключается в их ненадежности из-за зависимости от погодных условий [8, с. 8-10]. Так, Xcel использует интеллектуальный анализ данных для создания более точных метеорологических отчетов, опираясь на данные местных спутников, метеостанций и ветропарков. Алгоритмы ИИ обучаются выявлять шаблоны в этих данных и на основании этого делают прогнозы [9]. Например, компания Nnergix разрабатывает высокоточные прогнозы погоды на основе спутниковых изображений, что позволяет предсказывать атмосферные условия для конкретных регионов [10]. В целом, преимущества ИИ в энергетике включают повышение точности прогнозов погоды и оптимизацию работы возобновляемых источников энергии.

Таким образом, для сбора и передачи данных в энергетике применяется IoT, а для эффективного анализа этих больших данных – ИИ. Для значительно более быстрого анализа требуются квантовые и облачные вычисления, которые предоставляют новые возможности для решения сложных задач оптимизации и моделирования.

Облачные вычисления предоставляют пользователям доступ к мощным вычислительным ресурсам через интернет. Это включает в себя серверы, системы хранения данных, базы данных и программное обеспечение, которые можно настраивать под конкретные нужды. Все данные о производстве и потреблении энергии сохраняются в облаке, что позволяет анализировать привычки в потреблении энергии и выявлять возможности для экономии. Так, например, на облачных платформах можно видеть, когда производится больше

всего энергии (например, в солнечные дни) и когда потребляется больше всего электроэнергии (например, вечером). С помощью этих сервисов можно получить рекомендации о том, когда лучше всего использовать собственную энергию или когда выгоднее всего продавать излишки обратно в сеть. Это помогает как сэкономить затраты на оплату энергии, так и снизить количество потребляемой энергии за счет сокращения потерь при распределении от централизованной системы.

Благодаря этой технологии компании в энергетической отрасли могут быстрее внедрять инновации, адаптировать свои ресурсы к меняющимся требованиям и снижать затраты, в том числе и за счет экономии на масштабах. Для поставщиков энергоресурсов облачные решения становятся ценным инструментом, позволяющим им реализовывать стратегии, направленные на привлечение и удержание клиентов.

Квантовые вычисления, в свою очередь, могут предоставить необходимые мощности для решения сложных задач, которые невозможно эффективно решить с помощью традиционных компьютеров. Сейчас квантовые компьютеры находятся на ранней стадии разработок и работают преимущественно в лабораторных условиях для выполнения конкретной задачи. Однако уже существуют такая машина от Google [11, с. 77], способная обрабатывать огромные объемы неструктурированных данных и быстро находить в них необходимую информацию. Это особенно полезно в таких областях, как поиск и оптимизация энергоресурсов, где требуется анализировать множество переменных и сценариев [12, с. 78]. Например, электросеть, которая снабжает энергией целый город, имеет множество источников энергии. Для того чтобы оптимально распределить доступную энергию между всеми потребителями, учитывая множество факторов: спрос на электроэнергию, погодные условия, состояние оборудования и т. д. – необходимо учитывать огромное количество переменных и возможных сценариев. Классические компьютеры могут справляться с такими задачами, но время вычислений может быть очень долгим. Квантовые компьютеры используют квантовые биты, которые могут находиться в нескольких состояниях одновременно. Это позволяет им обрабатывать информацию параллельно и находить оптимальные решения быстрее, чем классические компьютеры [13, с. 38-39].

Таким образом, объединение IoT, ИИ и облачных и квантовых вычислений может создать мощный инструмент для анализа данных в энергетике, позволяя компаниям не только улучшать свою операционную эффективность, но и разрабатывать более устойчивые и инновационные подходы к управлению энергетическими ресурсами. Это способствует созданию более эффективных систем распределения электроэнергии.

Таковыми системами являются системы Smart Grid (умные сети), которые обеспечивают эффективное распределение электроэнергии между производителями и потребителями, автоматически отслеживая и оптимизируя потоки электричества. Они являются основой диджитализации и децентрализации энергетического сектора. Это особенно важно в условиях

непостоянной выработки энергии возобновляемыми источниками, что делает необходимость в таких сетях актуальной для повышения эффективности использования энергии.

Рынок технологий Smart Grid, или «умных» сетей, находится на стадии активного формирования и развития в большинстве стран. Например, Китай стремился достичь к 2020 году уровня оснащенности современными системами учета энергоресурсов от 90 % до 95 %. Этот процесс сопровождается постоянным обновлением и модернизацией энергетической инфраструктуры умными, интеллектуальными системами распределения и учета. Экономическая эффективность проектов в области интеллектуального учета энергии уже доказана множеством успешных реализаций. Ожидается, что совокупные выгоды от внедрения систем смарт-учета в этих странах могут достигать 27 миллиардов евро. Кроме того, внедрение таких технологий способствует снижению потребления энергии на уровне 2,2-3,2 % в зависимости от региона, а также уменьшению пиковой нагрузки в энергосистеме на 0,5-9,9 % [14]. Таким образом, Smart Grid представляет собой не просто технологическую новинку, но и важный шаг к цифровизации энергетики, позволяющий повысить эффективность системы распределения.

С оптимизацией распределения энергии и минимизацией потери операторы смарт-грид используют цифровые двойники, чтобы моделировать различные сценарии работы сети. Это позволяет более эффективно использовать ресурсы и снижать затраты.

Цифровые двойники в энергетике представляют собой виртуальные модели физических объектов, процессов или систем, которые используются для мониторинга, анализа и оптимизации работы энергетических установок. Эти технологии позволяют создавать точные симуляции, что помогает в принятии решений и повышении эффективности. То есть цифровой двойник – это динамическая модель, воспроизводящая ключевые параметры объекта с погрешностью до 5 % [15], созданная с использованием данных из сенсоров и других источников информации. Эта модель может включать не только геометрические параметры, но и динамическое поведение системы, что позволяет прогнозировать ее работу в различных условиях.

В энергетике цифровые двойники находят множество применений. Во-первых, они позволяют в режиме реального времени отслеживать состояние генераторов, трансформаторов и других элементов энергетической инфраструктуры, что помогает оперативно выявлять неисправности и предотвращать аварии. Во-вторых, с помощью цифровых двойников можно моделировать различные сценарии работы энергетических систем, находя оптимальные режимы работы, что ведет к снижению затрат и повышению общей эффективности [16, с. 357]. Кроме того, цифровые двойники могут использоваться для анализа исторических данных и прогнозирования потребления энергии в будущем, что особенно важно для планирования загрузки генераторов и управления сетями. Они также помогают в управлении жизненным циклом оборудования, включая планирование технического обслуживания и замену устаревших компонентов. Технология служит

обучающими инструментами, позволяя сотрудникам тренироваться в безопасной виртуальной среде, что повышает уровень их подготовки и снижает риски при реальной эксплуатации [17].

Таким образом, комплексный подход к модернизации и оптимизации энергетических систем (рис.) представляет интеграцию ИИ, IoT, облачных и квантовых вычислений, технологии блокчейн, цифровых двойников и smart grid.

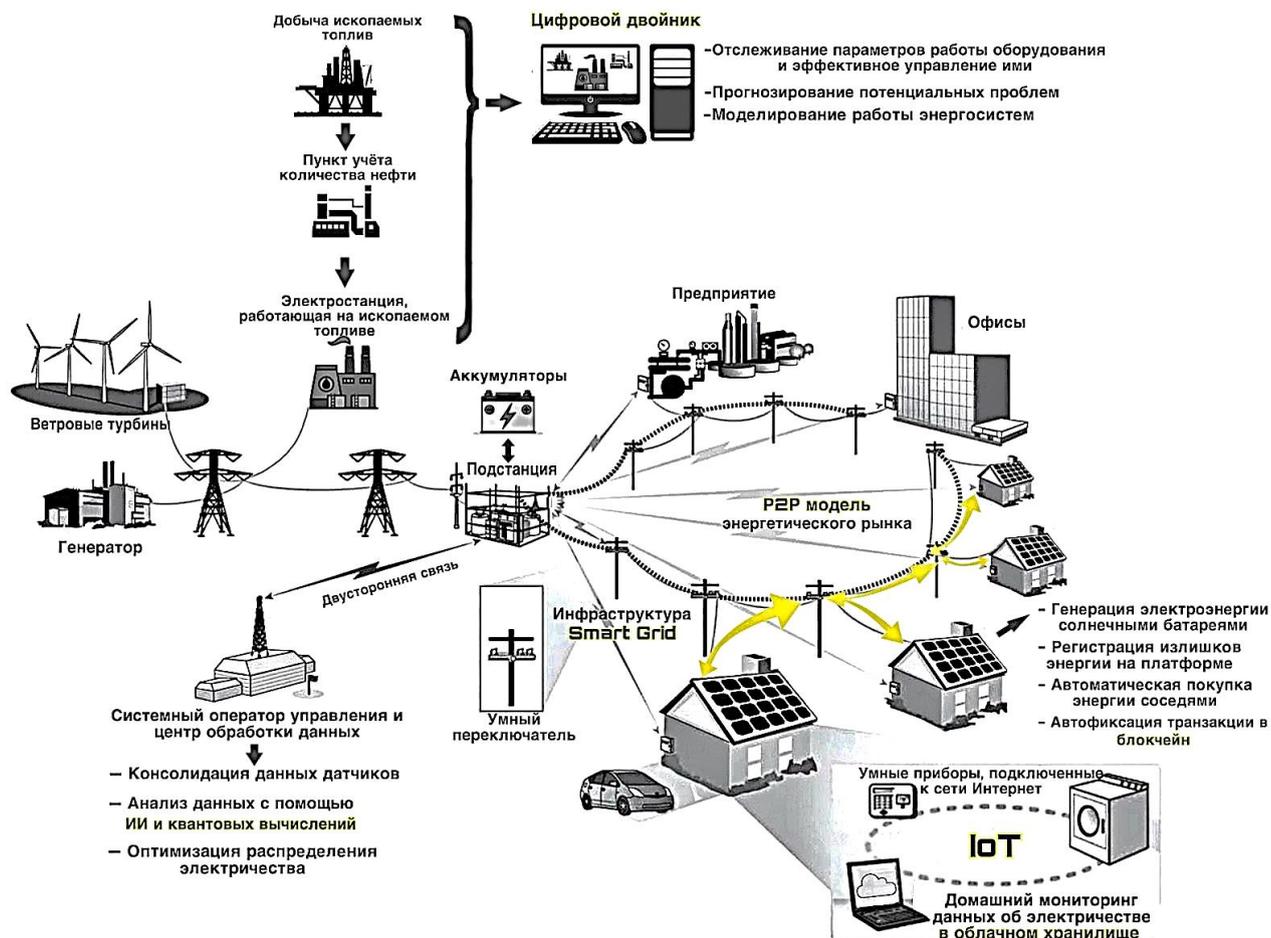


Рисунок – Схема энергетической системы с применением цифровых технологий

Эти технологии взаимосвязаны и дополняют друг друга, что создает синергетический эффект, который значительно повышает эффективность и устойчивость энергетических систем. IoT-объекты собирают данные о состоянии сети, которые затем анализируются с помощью ИИ для оптимизации работы smart-грид. Цифровые двойники используются для визуализации данных из IoT и моделирования различных сценариев, а блокчейн обеспечивает безопасность и прозрачность всех транзакций, связанных с использованием энергии. Также благодаря анализу данных и автоматизации бизнес-процессов цифровая трансформация энергетики увеличивает доходы компаний на 3-4 % в год. Так, например, умные технологии в реальном времени позволяют нефтегазовым компаниям: увеличить сырьевую базу в 3 раза; повысить объемы

добычи нефти на 10 %; увеличить производительность на 10 %; снизить себестоимость добычи на 15 %; уменьшить количество аварий, включая утечки и выбросы, на 20-30 %. Таким образом, экономическая эффективность «умной» нефтедобычи достигается за счет сокращения простоев скважин и оптимизации процессов добычи.

Однако, несмотря на множество технологических достижений, внедрение цифровых технологий в энергетическом секторе сталкивается с рядом серьезных трудностей, которые можно систематизировать по трем ключевым аспектам: кадровые, технологические, организационно-управленческие, культурные и финансовые.

1. Кадровые ограничения заключаются в нехватке квалифицированных специалистов. Без наличия экспертов, обладающих необходимыми цифровыми навыками, компаниям будет сложно эффективно осуществить процесс цифровой трансформации.

2. Технологические барьеры представляют недостаток проработки технологий, отсутствие звеньев в технологических цепочках, ограниченность объемов производства и материалов для внедрения повсеместно и устаревшие системы. Переход на цифровые технологии требует кардинального пересмотра существующих методов работы организации. Однако нежелание или неспособность обновить устаревшие системы может существенно затормозить этот процесс. Также к технологическим угрозам относятся вопросы кибербезопасности. С увеличением объема данных, перемещающихся в облачные сервисы, и с ростом зависимости от новых технологий, организациям становится сложнее обеспечивать надежную защиту своей информации от потенциальных угроз [12, с. 88].

3. Организационно-управленческие риски возникают из-за статичности корпоративных культур и сопротивления изменениям. Сотрудники часто не готовы принимать новые организационные структуры и участвовать в процессе цифровой трансформации. Нежелание делиться знаниями и взаимодействовать внутри организации также усугубляет ситуацию. Цифровая инновация требует создания взаимодействующих, самоуправляющихся команд, что противоречит традиционным иерархическим структурам.

4. Финансовые ограничения связаны с дороговизной цифровых преобразований и проявляются в высоких первоначальных инвестициях, необходимых для новых решений и обновления инфраструктуры. Эти затраты усугубляются проблемой морального износа технологий, поскольку быстрое устаревание требует постоянных вложений в обновления. Бюджетные ограничения также могут препятствовать долгосрочным инвестициям в цифровизацию, а скрытые расходы на обучение, интеграцию и поддержку новых систем добавляют дополнительную нагрузку на финансовые ресурсы. В условиях ограниченного бюджета компании часто прибегают к бесплатным версиям программного обеспечения, что позволяет снизить затраты. Однако важно также учитывать необходимость создания материально-технической базы, что требует значительных вложений в оборудование и инфраструктуру. Все эти факторы в совокупности затрудняют реализацию цифровых стратегий в

энергетическом секторе, создавая дополнительные вызовы для компаний на пути к цифровизации [18, с. 22-24].

В целом, современная энергетика активно трансформируется благодаря цифровым технологиям, среди которых наиболее перспективными являются P2P-энергетика, блокчейн, IoT, искусственный интеллект, Smart Grid и цифровые двойники. Эти решения позволяют создавать децентрализованные, эффективные и устойчивые энергосистемы, где потребители становятся активными участниками рынка, а управление ресурсами оптимизируется в режиме реального времени. Однако внедрение этих технологий сталкивается с серьезными барьерами: технологическими (энергозатратность блокчейна, киберриски, незрелость квантовых вычислений), финансовыми (высокие затраты на внедрение и поддержку), кадровыми (нехватка специалистов), и организационно-управленческими (неготовность к изменениям). Для преодоления этих ограничений необходимы дальнейшие исследования в области энергоэффективных алгоритмов, гибридных вычислительных моделей, кибербезопасности и стандартизации, а также социально-экономические исследования, направленные на адаптацию рынка к новым моделям взаимодействия. Успешная цифровизация энергетики требует комплексного подхода, объединяющего технологические инновации, регулирование и вовлечение всех участников отрасли.

Список литературы:

1. Перекальский, И. Н. Применение технологий распределенного реестра (blockchain) в электроэнергетических системах / И. Н. Перекальский, С. Е. Кокин. – Текст: непосредственный // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2020. – № 1. – С. 64-75.
2. Залюбовский, А. О. Использование цифровых технологий и смарт-контрактов в солнечной энергетике / А. О. Залюбовский. – Текст: непосредственный // Гуманитаризация инженерного образования: методологические основы и практика. – 2020. – С. 338-343.
3. Эволюция технологии, которая трансформирует все сферы современной экономики / Хабр: [сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/754820/> (дата обращения: 20.01.2025). – Текст: электронный.
4. Гаврилова, В. А. Интернет вещей в энергетике / В. А. Гаврилова. – Текст: непосредственный // Тинчуринские чтения-2021 «Энергетика и цифровая трансформация». – 2021. – С. 31-33.
5. Умные сети и возобновляемая энергия: как IoT меняет отрасль / Рынок Электротехники: [сайт]. – URL: <https://marketelectro.ru/> (дата обращения: 10.02.2025). – Текст: непосредственный.
6. Куликов, А. А. Интернет вещей в энергетике / А. А. Куликов, И. П. Маслов. – Текст: непосредственный // Россия молодая: сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. – 2017. – С. 1-5.
7. Цуриков, Г. Н. Применение промышленного интернета вещей на объектах

- энергетики / Г. Н. Цуриков, И. А. Щербатов. – Текст: непосредственный // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2018. – № 2. – С. 97-100.
8. Абдуназарова, Р. А. Внедрение искусственного интеллекта в возобновляемую энергетику / Р. А. Абдуназарова. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2023. – № 24 (471). – С. 8-10.
9. Могиленко, А. Применение алгоритмов искусственного интеллекта в мировой энергетике / А. Могиленко. – Текст: электронный // Энергетика и промышленность России: [сайт]. – URL: <https://www.eprussia.ru/epr/> (дата обращения: 28.02.2025).
10. Sentinel: [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.nnergix.com> (дата обращения: 28.02.2025). – Текст: электронный.
11. Мускина, Д. Р. Самый мощный квантовый компьютер от Google / Д. Р. Мускина. – Текст: непосредственный // Актуальные вопросы науки и практики. – 2021. – С. 77-81.
12. Хитрых, Д. О. Цифровая трансформация энергетической отрасли / Д. О. Хитрых. – Текст: непосредственный // ЭП. – 2021. – № 10 (164). – С. 76-89.
13. Козихин, И. А. Улучшение решения задачи коммивояжера с помощью квантовых вычислений: анализ и результаты / И. А. Козихин. – Текст: непосредственный // Ученые записки УлГУ. Серия «Математика и информационные технологии». – 2023. – № 1. – С. 35-45.
14. TAdviser: [сайт]. – 2025. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:SmartGrid\(Умные_Сети\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:SmartGrid(Умные_Сети)) (дата обращения: 11.03.2025). – Текст: электронный.
15. Зуйкова, А. Что такое цифровые двойники и где их используют / А. Зуйкова. – Текст: электронный // РБК. Тренды: [сайт]. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/> (дата обращения: 12.03.2025).
16. Шананин, В. А. Создание цифровых двойников в строительстве при помощи искусственного интеллекта / В. А. Шананин, К. Ю. Лосев. – Текст: непосредственный // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 6. – С. 357-360.
17. Моя энергия: [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.myenergy.ru/professional/2022/> (дата обращения: 21.03.2025). – Текст: электронный.
18. Митяева, Н. В. Барьеры цифровой трансформации и пути их преодоления / Н. В. Митяева, О. В. Заводило. – Текст: непосредственный // Промышленность: экономика, управление, технологии. – 2019. – № 3 (77). – С. 20-24.

© Журова И. С., 2025

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ РЕАКТОРНОГО УЗЛА В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ CLIPS

канд. техн. наук, доцент **Ремизова Ирина Викторовна**,
ассистент **Новикова Мария Андреевна**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается возможность создания экспертной системы управления, контроля и диагностики реакторного узла в процессе получения полиэтилена высокого давления в среде CLIPS. Представлено формирование базы знаний и базы данных для данного технологического процесса. Приведены примеры формирования программного кода для поставленной задачи.

Ключевые слова: экспертная система, производство полиэтилена высокого давления, факты и правила CLIPS, база знаний.

DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM FOR CONTROL, MONITORING AND DIAGNOSTICS OF THE REACTOR UNIT IN THE PROCESS OF PRODUCING HIGH-PRESSURE POLYETHYLENE IN THE CLIPS ENVIRONMENT

PhD in Technology, Associate Professor **Remizova Irina Viktorovna**,
Assistant **Novikova Maria Andreevna**,
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the possibility of creating an expert control system, monitoring and diagnostics of the reactor unit in the process of producing high-pressure polyethylene in the CLIPS environment. The formation of a knowledge base and a database for this technological process is presented. Examples of the formation of the program code for the task are given.

Keywords: expert system, high-pressure polyethylene production, CLIPS facts and rules, knowledge base.

В настоящее время наблюдается возрастание интереса и спроса на применение интеллектуальных технологий в разных областях. Одним из направлений развития данных технологий являются экспертные системы. Экспертная система – это компьютерная программа, разрабатываемая для

формализации и имитации рассуждений и действий человека или системы, обладающих знаниями и опытом эксперта в определенной предметной области. Экспертная система обрабатывает поставленные задачи, ситуации и вопросы, предоставляя в ответ советы, прогнозы или прямые инструкции пользователю [1]. Экспертная система предназначена в помощь эксперту – человеку и не предусматривает его замену [2].

Экспертная система предоставляет возможность решать разнообразные задачи, связанные с принятием решений, наращивая свою эффективность по мере накопления знаний и опыта.

В основе экспертной системы следующие компоненты:

– База знаний: содержит необходимую информацию и правила, используемые для решения задач в данной области. Человек – эксперт собирает информацию из внешних источников по рассматриваемой экспертной области. Полученные данные систематизируются и структурируются в базе знаний.

– Интерпретатор: отвечает за осуществление рассуждений и принятие решений. Данный компонент системы использует правила и процедуры, сопоставляя информацию, заданную в базе знаний и представленные для обработки входные данные для получения решений и выводов по рассматриваемой ситуации.

В дополнение к основным компонентам системы может быть добавлен пользовательский интерфейс, взаимодействующий с пользователем.

Популярной средой для разработки экспертных систем считается CLIPS (C Language Integrated Production System) – программная среда с открытым исходным кодом. Первая версия CLIPS представлена в 1985 году в Центре космических полетов имени Линдона Джонсона (NASA). На сегодняшний день CLIPS остается востребованным инструментом, продукт поддерживается и обновляется [3].

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) – это термопластичный полимер, широко используемый как в промышленности, так и в быту. Газофазная полимеризация этилена методом высокого давления осуществляется по радикальному механизму в присутствии инициаторов под высоким давлением 150 МПа и температуре 255 °С. Непосредственно синтез ПЭВД ведется в реакторе автоклавного типа, непрерывного действия с встроенной многосекционной дисковой мешалкой, проходящей по высоте всего аппарата. Сжатый до давления 150 МПа этилен нагнетается в верхнюю и среднюю части колонны синтеза. Симметрично с вводом этилена организована подача инициатора, инициаторными насосами ИН1 и ИН2. Условно реактор делят на 4 секции в соответствии с местом ввода газа. Полиэтилен (ПЭ) и непрореагировавший этилен выгружаются из нижней части реактора через клапан «Фишер» (КФ). Далее смесь, пройдя продуктовый холодильник (ПХ), поступает в отделитель высокого давления (ОВД), где осуществляется отделение 95 % ПЭ. Технологическая схема процесса представлена на рис. 1.

Производственный процесс обладает повышенной степенью опасности и аппаратного оформления. В режиме нормального функционирования установка

синтеза ведет себя достаточно устойчиво, однако в результате действия сильных неучтенных факторов, а также вследствие физико-химических особенностей процесса, на которые не рассчитана система регулирования, возникает ситуация, когда управляемость процессом зависит от квалификации оперативного персонала. Анализ информации, накопленной в общей и специальной литературе, а также полученной в результате бесед с экспертами, позволил выделить группу эвристик, позволяющих расширить область управляемости процессом за регламентные границы.

Например, для реактора одним из возмущений является нарушение режима перемешивания продукта, что может возникать из-за повышения нагрузки на электродвигатель мешалки. Об этом можно судить по росту температуры электродвигателя. Причинами возникновения этого нарушения могут стать, например, попадание ПЭ в электродвигатель или перегрев электродвигателя мешалки из-за возрастания температуры на входе в реактор. Распознавание причин важно для определений мер их устранения и может быть выполнено по оценке состояния дополнительных параметров.

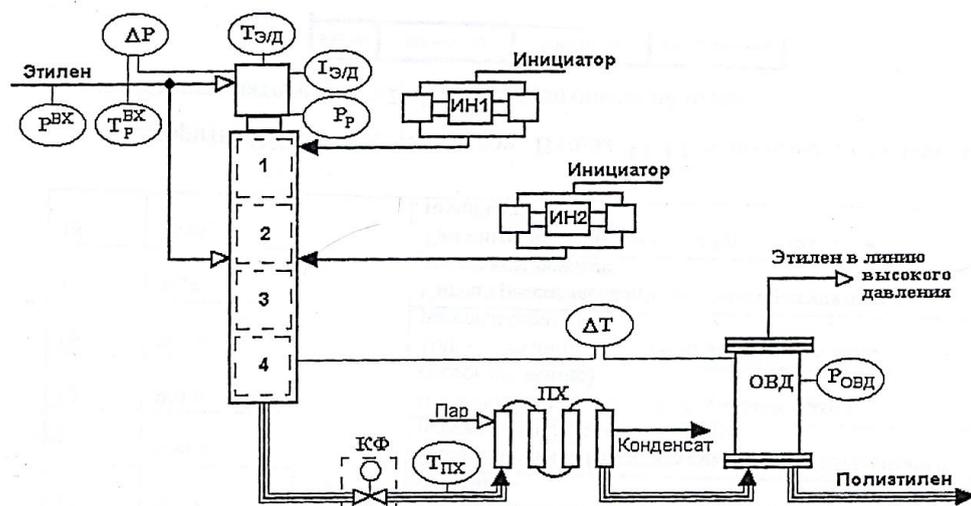


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса получения полиэтилена высокого давления

Так одновременный рост температуры и тока электродвигателя указывает на попадание ПЭ в электродвигатель, а рост температур электродвигателя и этилена на входе в реактор говорит о перегреве электродвигателя мешалки из-за возрастания температуры на входе в реактор. В первом случае рекомендуется увеличить расход газа через электродвигатель, а во втором – увеличить расход охлаждающей воды в конечном холодильнике компрессора.

Нарушение гидродинамического режима напрямую связано со снижением давления в реакторе и вызывается неисправностью клапана «Фишер» (клапан залип в открытом состоянии) или частичной потерей проходимости в среднюю часть реактора. Одновременное снижение давления в реакторе и рост давления на входе в реактор свидетельствует о залипании клапана, в то время как параллельный снижению давления в реакторе рост

перепада давлений между реактором и компрессором указывает на потерю проходимости. При выявлении неисправности клапана рекомендуется перейти на ручное управление, и если клапан не восстановится, уйти с режима, а при обнаружении потери проходимости – перераспределить нагрузку между точками ввода этилена.

Высокая вязкость готового продукта часто тянет за собой ряд нештатных ситуаций, например, ухудшение проходимости между реактором и ОВД. Наиболее характерным свидетельством о данном нарушении является падение перепада температур между реактором и ОВД. Если это сопровождается ростом давления в ОВД, то, скорее всего, наблюдается забивка ПХ и следует снизить производительность линии и произвести его пропарку. Если наблюдается одновременно с падением перепада температур между реактором и ОВД снижение температуры перед продуктовым холодильником, то это говорит о неисправности в системе регулирования температуры в холодильнике и следует отрегулировать подачу охлаждающей воды в ПХ.

При разработке экспертной системы основополагающим этапом является формализация экспертной информации или иначе разработка базы знаний и базы данных. Структурированная база знаний для технологического процесса получения ПЭВД в реакторном узле представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1 – База знаний разрабатываемой экспертной системы

<i>Основные параметры</i>	<i>Нарушение</i>	<i>Дополнительные параметры</i>	<i>Причины</i>	<i>Рекомендации</i>
Температура э/д мешалки	Замедление режима перемешивания (повышение нагрузки на э/д)	Рост тока э/д мешалки	Попадание ПЭ в э/д	Увеличить расход газа через э/д
		Рост температуры этилена на входе в реактор	Перегрев э/д мешалки	Увеличить расход охлаждающей воды в конечном холодильнике компрессора
Перепад температур между реактором и ОВД	Ухудшение проходимости между реактором и ОВД (падение перепада температур)	Рост давления в ОВД	Забивка ПХ	Снизить производительность линии и произвести пропарку ПХ
		Снижение температуры перед ПХ	Неисправность системы регулирования температуры в ПХ	Отрегулировать подачу охлаждающей воды в ПХ
Давление в реакторе	Нарушение гидродинамического режима (падение давления в реакторе)	Рост давления на входе в реактор	Залипание клапана	Перейти на ручное управление, и если клапан не реагирует – уйти с режима
		Рост перепада давлений между реактором и компрессором	Потеря проходимости	Перераспределить нагрузку между точками ввода этилена

Параметры, указанные в базе знаний (см. таблица 1), используются для составления базы данных, в которой на основании технического регламента определяются аварийные пределы и эксплуатационные значения [4] (табл. 2).

Таблица 2 – База данных разрабатываемой экспертной системы

Название	Обоз.	Ед. изм.	Нижний аварийный предел	Регламентный диапазон	Верхний аварийный предел
Температура мешалки э/д	T_{ed}	°C	10	40 – 60	80
Перепад температуры между реактором и ОВД	ΔT	°C	10	15 – 25	30
Давление в реакторе	P_r	МПа	135	142 – 148	160
Ток э/д мешалки	I_{ed}	А	50	70 – 105	138
Температура на входе в реактор	T_{vh}	°C	10	25 – 45	60
Давление в ОВД	P_{ovd}	МПа	20	23 – 25	35
Температура перед ПХ	T_{do_PH}	°C	260	269 – 279	290
Давление на входе в реактор	P_{vh_r}	МПа	140	157 – 163	200
Перепад давлений между реактором и компрессором нагнетения	ΔP	МПа	0	0 – 10	20

Формирование структуры предметной области в среде разработки CLIPS определяется образованными ранее базой знаний и значениями параметров базы данных. Посредством конструкции `deftemplate` формируется шаблон для ввода данных.

В первую очередь в систему заносятся основные сведения о параметрах технологического процесса: название параметра, нижний и верхний аварийные пороги. Структура шаблона для всех параметров реактора приведена ниже.

```
(deftemplate parametr_PEVD
  (slot parametr)
  (slot low)
  (slot heigh)
)
```

Факты являются одной из основных форм представления информации в системе CLIPS и состоят из статических сведений о предметной области [5]. В данном случае конструкция `deftemplate` используется для формирования структуры вносимых фактов соответствующего типа. При использовании шаблона информация является валидной, и для создания факта нет необходимости располагать информацией в строгом порядке, что может быть полезно, если была пропущена какая-то информация.

Следующий шаг внести в систему сами факты с использованием конструкции `deffacts`. Для ввода параметров реактора используется разработанный шаблон.

```
(deffacts parametr
  (parametr PEVD (parametr Ted) (low 10) (heigh 80))
  (parametr PEVD (parametr delT) (low 10) (heigh 30))
  (parametr PEVD (parametr Pr) (low 135) (heigh 160))
  (parametr PEVD (parametr Ied) (low 50) (heigh 138))
  (parametr PEVD (parametr Tvh) (low 10) (heigh 60))
  (parametr PEVD (parametr Povd) (low 20) (heigh 35))
  (parametr PEVD (parametr Tdo_PH) (low 260) (heigh 290))
  (parametr PEVD (parametr Pvh_r) (low 140) (heigh 200))
  (parametr PEVD (parametr delP) (low 0) (heigh 20))
)
```

Аналогичным образом, заносятся факты, отражающие текущие значения технологического процесса. Первоначально создается шаблон, после фиксируются сами факты.

Шаблон для текущих значений:

```
(deftemplate curret_values
  (slot parametr)
  (slot value)
)
```

Ввод параметров текущих значений по шаблону:

```
(deffacts values
  (curret_values (parametr Ted) (value 81))
  (curret_values (parametr delP) (value 20))
  (curret_values (parametr Pr) (value 145))
  (curret_values (parametr Ied) (value 140))
  (curret_values (parametr Tvh_r) (value 27))
  (curret_values (parametr Povd) (value 24))
  (curret_values (parametr Tdo_PH) (value 270))
  (curret_values (parametr Pvh_r) (value 160))
  (curret_values (parametr delP) (value 5))
)
```

Знания предметной области представляются в CLIPS в виде правил. Правила определяют набор действий, которые необходимо выполнить в данной ситуации. Они состоят из предпосылок и действия. Предпосылки представляют собой набор условий, которые должны удовлетвориться, чтобы правило выполнилось.

С помощью правил, оформленных в формате ЕСЛИ – ТО и реализуемых командой defrule, формируются алгоритмы записи новых фактов об авариях и алгоритмы выдачи рекомендаций. Например, ниже представлено правило для формирования аварии перегрева двигателя.

Правило ЕСЛИ температура двигателя выше 80 °С, ТО факт авария перегрев электродвигателя.

```
(defrule peregrev_Ted
  (parametr PEVD (parametr Ted) (heigh ?heigh))
  (current_values (parametr Ted) (value ?value))
  (test (> ?value ?heigh))
=>
  (assert (alarm peregrev_Ted))
)
```

По тому же принципу записывается и более сложное правило с оператором И:

Правило ЕСЛИ температура электродвигателя выше верхнего предела И ток электродвигателя выше верхнего уровня, ТО факт попал полиэтилен И вывести текст “Причина: попал полиэтилен. Рекомендации: увеличить расход газа через двигатель”.

```
(defrule popal_polietilen
  (alarm peregrev_Ted)
  (alarm heigh_Ied)
=>
  (assert (alarm popal_polietilen))
  (printout t "Reason: Popal polietilen, uvelichit raskhod gaza cherez
dvigatel " crlf)
  (printout t "Recommendation: Popal polietilen, uvelichit raskhod gaza
cherez dvigatel " crlf)
)
```

Все представленные правила формируются, опираясь на базу знаний, представленную в таблице 1.

Работоспособность прописанных конструкций кода проверяется с использованием команд reset (очистка памяти от информации о фактах и перезапуск процесса) и run (запуск выполнение кода).

Полученный результат формирования экспертной системы представлен на рисунке 2. В верхней части экранной формы расположен листинг экспертной системы и результат ее работы (выданы: авария попадания полиэтилена, рекомендация – увеличить расход газа через электродвигатель). В нижней части рисунка представлены записанные и созданные факты.

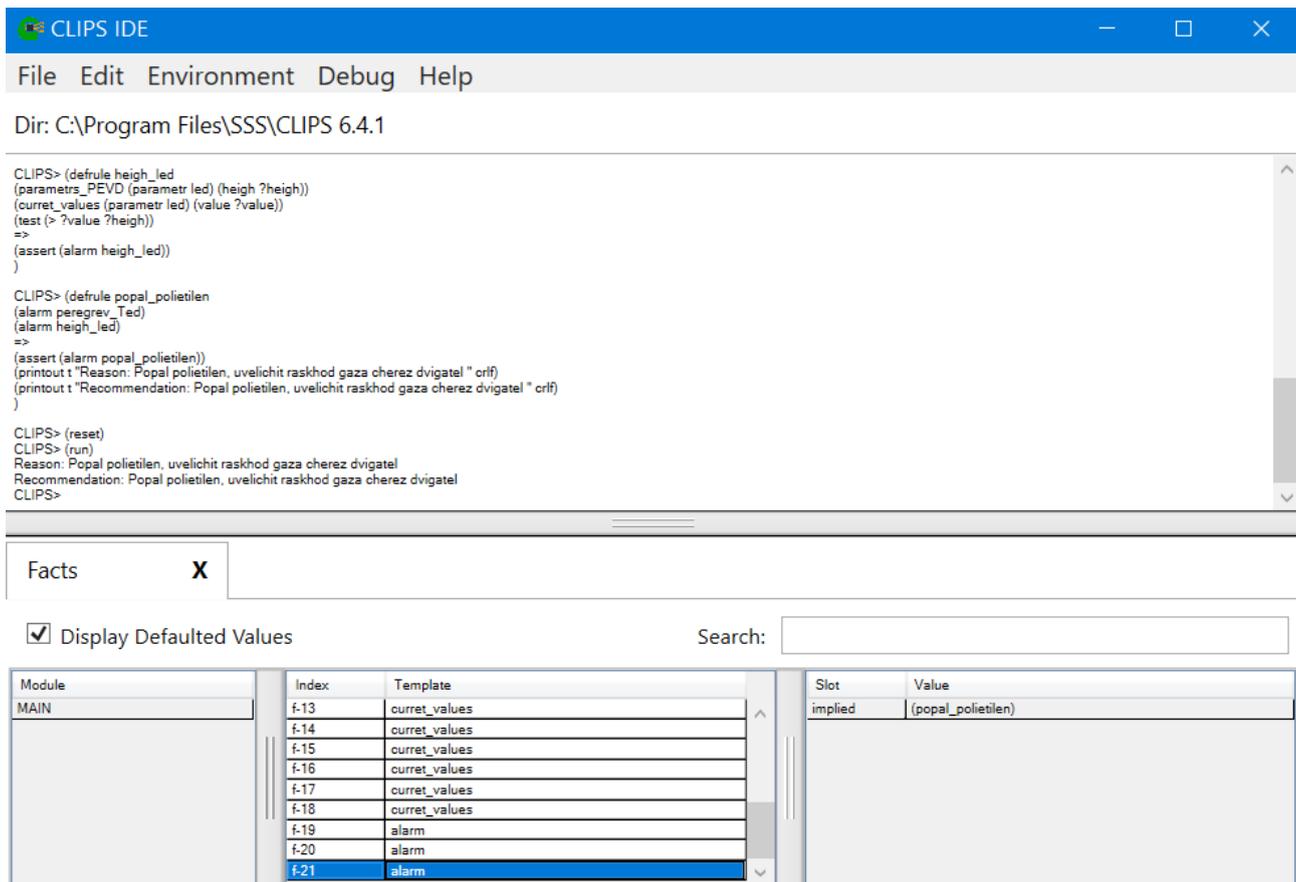


Рисунок 2 – Результат проверки работы экспертной системы

Таким образом, разработана экспертная система, выполняющая функции управления, контроля и диагностики реакторного узла в процессе получения полиэтилена высокого давления. База знаний системы создана и проверена на основе опыта профильных экспертов в области производства полиэтилена высокого давления. В дальнейшем возможно совершенствование системы при определении новых правил-условий работы, корректировки работы посредством ввода текущих значений.

В рамках развития полученной основы экспертной системы стоит добавить в программный код аварийные сценарии по параметрам, неучтенным при формировании рекомендаций. Кроме того, следует расширить систему, включив дополнительные возможности аналитики с использованием алгоритмов машинного обучения.

Список литературы:

1. Рудакова, И. В. Изучение структуры и методов синтеза экспертной системы в экспертной оболочке KARPA v. 2.4 : метод. указания / И. В. Рудакова, О. А. Ремизова, Л. А. Русинов. – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2006. – 17 с. – Текст: непосредственный.
2. Луткевич, Б. Экспертная система / Б. Луткевич. – Текст: электронный // TechTarget: [сайт]. – URL: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/expert-system> (дата обращения: 11.04.2024).

3. Станкевич, Л. А. Интеллектуальные системы и технологии : учебник и практикум для вузов / Л. А. Станкевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 478 с. – Текст: непосредственный.
4. KREDO: Технология производства полиэтилена высокого давления. – URL: <https://kredo-polimer.ru/press-center/articles/> (дата обращения: 11.04.2024). – Текст: электронный.
5. Короткин, А. А. Экспертные системы в среде CLIPS : учебно-методическое пособие / А. А. Короткин; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : ЯрГУ, 2020. – 52 с. – Текст: непосредственный.

© Ремизова И. В., Новикова М. А., 2025

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОПЛА ЛАВАЛЯ

студент **Орлов Сергей Александрович**,
науч. руководитель: канд. физ-мат. наук, доцент
Никифоров Дмитрий Константинович,
Калужский филиал Московского государственного
технического университета имени Н. Э. Баумана,
г. Калуга, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается теоретический анализ условий, при которых сопло Лавалья может обеспечить переход от дозвукового горения к детонационному режиму за счет генерации ударных волн в сверхзвуковом потоке. Математически выведены уравнения для определения критических параметров (число Маха, давление, температура), необходимых для самоподдерживающейся детонации.

Ключевые слова: сопло Лавалья, детонационное горение, импульсные детонационные двигатели (PDE).

MATHEMATICAL MODELING OF DETONATION IN GASES USING A LAVAL NOZZLE

Student **Orlov Sergey Aleksandrovich**,
Academic Advisor: PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor
Nikiforov Dmitry Konstantinovich,
Bauman Moscow State Technical University (Kaluga branch),
Kaluga, Russian Federation

Abstract. The article presents a theoretical analysis of the conditions under which a Laval nozzle can facilitate the transition from subsonic combustion to a detonation regime through the generation of shock waves in a supersonic flow. Mathematical equations are derived to determine the critical parameters (Mach number, pressure, temperature) required for self-sustained detonation.

Keywords: Laval nozzle, detonation combustion, pulse detonation engines (PDE).

Современные транспортные системы, наземные и воздушные платформы, требуют постоянного повышения энергоэффективности и компактности силовых установок. Одним из перспективных направлений является переход от традиционного дефлаграционного горения к детонационным режимам, способным обеспечить более высокий термический КПД и удельный импульс. В работе исследуется теоретическая возможность применения сопла Лавалья для инициации детонации в газовых смесях. Такой подход открывает новые

горизонты для проектирования импульсных детонационных двигателей (PDE), которые могут стать основой для энергоэффективных силовых установок, в частности, в беспилотной авиации, где снижение массы и увеличение производительности критически важны.

Классические методы, такие как прямое искровое зажигание, использование преддетонаторов или использование лазерного импульса требуют значительных энергозатрат и особых условий. В этом контексте особый интерес представляет применение газодинамических устройств, способных генерировать управляемые ударные волны. Сопло Лавалья, изначально разработанное для ускорения газов до сверхзвуковых скоростей, может стать инструментом для создания таких условий. Его геометрия (сужающе-расширяющийся канал) позволяет не только формировать сверхзвуковые потоки, но и контролировать параметры ударных волн, что открывает возможность инициации детонации [2].

Теоретической основой исследования выступают уравнения Рэнкина-Гюгонио, описывающие параметры за ударным фронтом, а также модель Зельдовича-фон Неймана-Деринга (ZND), связывающая гидродинамику ударной волны с кинетикой химических реакций. Особое внимание уделяется роли геометрии сопла: критическому сечению (A^*), степени расширения (A_e/A^*) и их влиянию на конечную скорость потока ($M > 1$).

Практическая значимость работы связана с перспективой применения результатов в проектировании импульсных детонационных двигателей (PDE), где снижение энергозатрат на инициацию детонации напрямую влияет на эффективность системы. Кроме того, предлагаемый подход может быть адаптирован для управления взрывными процессами в промышленности и энергетике.

Основные способы инициации детонации:

1. *Искровое зажигание*: использование электрической искры для локального нагрева смеси, что запускает быстрое горение, перерастающее в детонацию. Применяется в двигателях внутреннего сгорания и экспериментальных установках.

2. *Ударные волны*: сжатие газа ударной волной, повышающее температуру и давление до уровня самовоспламенения. Например, в детонационных трубах или импульсных детонационных двигателях.

3. *Тепловое воздействие*: нагрев газа до температуры самовоспламенения с помощью нагревательных элементов, лазера или открытого пламени.

4. *Химические инициаторы*: введение химических веществ (катализаторов, взрывчатых материалов), которые запускают экзотермические реакции, выделяющие энергию, достаточную для детонации.

5. *Комбинированные методы*: например, сочетание ударной волны и искрового зажигания для повышения надежности иницирования, или использование химических добавок с тепловым воздействием.

Инициирование детонационного горения в первую очередь связано с достижением термодинамическими параметрами критических показателей. Однако существуют альтернативные механизмы, например, переход дефлаграции в детонацию, для которого характерны специфические требования к исходным условиям системы [1].

Исследуя методы активации детонации с помощью ударных волн, можно предложить применение сопла Лавалья. Его роль заключается в ускорении фронта горения исходного топлива, что способствует запуску детонации в целевом топливном составе. Далее проанализируем реализуемость этого подхода и общую теоретическую модель подобной системы.

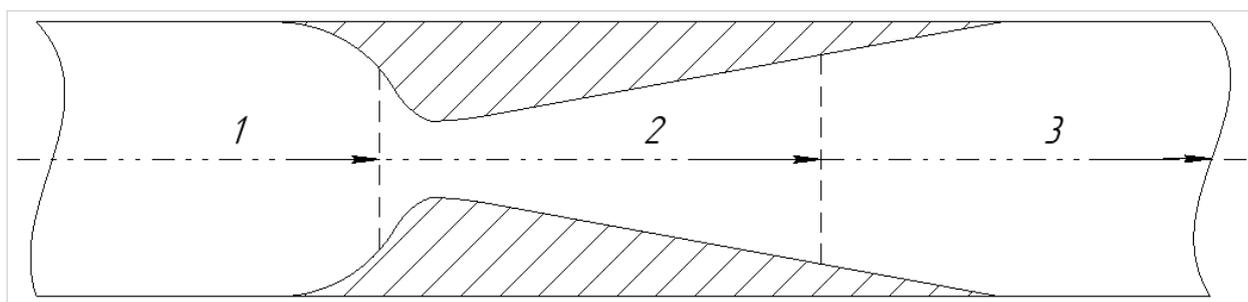


Рисунок – Схема внедрения сопла Лавалья с зонами горения и детонации

Цифрами обозначены принципиальные зоны в рамках цилиндрической трубы: 1 – зона горения первичного топлива; 2 – зона ускорения потока газов до скорости, необходимой для инициации детонации в зоне 3; 3 – зона инициации и распространения детонации далее по трубе.

С физической точки зрения, описание данного процесса может быть обосновано ключевыми уравнениями и условиями, вытекающими из теории горения и детонации.

Согласно модели Зельдовича-Неймана-Деринга (ЗНД), детонационная волна представляет собой ударный фронт, за которым располагается зона химических реакций. Устойчивость такой структуры определяется соотношением:

$$\tau < \frac{L}{U}, \quad (1)$$

где τ – время индукции;

L – длина зоны реакции;

U – скорость.

Для устойчивого протекания детонации индукционный период τ (время до старта химической реакции) должен быть короче времени релаксации системы t_r . Кроме того, давление и температура в области за ударным фронтом обязаны превосходить критические пороговые значения, необходимые для самовоспламенения топливной смеси.

Критерий Чепмена-Жуге – это фундаментальное условие определяет стационарность детонационной волны. Согласно ему, скорость детонации соответствует минимально возможной скорости распространения ударной

волны, при которой продукты реакции движутся со скоростью звука относительно фронта. Математически это выражается через равенство скорости потока продуктов горения локальной скорости звука в среде.

Условие Чепмена-Жуге (ЧЖ,СЖ):

$$D_{CJ} \cong \sqrt{2Q(\gamma^2 + 1)}, \quad (2)$$

где D_{CJ} – скорость детанации Чепмена-Жуге;

γ – показатель адиабаты;

Q – удельная энергия реакции (на единицу массы).

Термодинамические параметры среды до и после прохождения ударной волны играют ключевую роль в анализе детонационных процессов и описываются условием Рэнкина-Гюгонио. Они позволяют определить, достигаются ли в зоне за фронтом волны критические значения давления и температуры, необходимые для самовоспламенения топливной смеси.

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{2\gamma}{1+\gamma} M^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (3)$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{(2\gamma M^2 - (\gamma-1))((\gamma-1)M^2 + 2)}{(\gamma-1)^2 M^2}, \quad (4)$$

где $M = \frac{U}{a_0}$ – число Маха ударной волны (отношение скорости газа к скорости звука невозмущенной волны).

Ударная волна должна создать достаточное давление и температуру для запуска химических реакций. Соотношения Рэнкина-Гюгонио связывают параметры до ($p_2; T_2; \rho_2$) и после ($p_3; T_3; \rho_3$) ударного фронта.

Из уравнения Аррениуса следует вывод Критерий спонтанного зажигания. Температура за ударной волной должна достигать значения, при котором скорость реакции $k(T)$ становится достаточной для выделения энергии, поддерживающей детонацию.

$$k(T_3)\tau > 1 \quad (5)$$

$$k(T) = A e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}, \quad (6)$$

где A – предэкспоненциальный множитель;

E_a – энергия активации (Дж/моль);

T – рост температуры за счет ударного сжатия.

Для определения толщины ударного фронта требуются вычислительные мощности для решения уравнения Навье-Стокса или же экспериментальные данные. Но из данного уравнения видна зависимость от скорости (кинетической энергией и объемом, охваченным волной за единицу времени)

Связь начальной скорости с числом Маха в сопле Лавала выражается через данное выражение для адиабатического течения:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left(\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{(\gamma-1)M^2}{2} \right) \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, \quad (7)$$

где A – площадь сечения на выходе сопла;

A^* – площадь критического сечения.

Сопло Лавала преобразует тепловую энергию в кинетическую. Начальная скорость v_1 (дозвуковая) связана с числом Маха на выходе из сопла через параметры газа и геометрию сопла.

Начальная скорость v_1 (перед соплом) связана с числом Маха M_1 в камере сгорания:

$$M_1 = \frac{v_1}{a_1}, \quad (8)$$

где скорость звука в камере сгорания:

$$a_1 = \sqrt{\gamma RT_1}. \quad (9)$$

Объединим данные и проанализируем, приняв, что $M_1 \ll 1$ (дозвуковой поток) и учитывая критические условия детонации: $p_3 \geq p_{дет}$; $T_3 \geq T_{дет}$; τ меньше условия по уравнению (1). Из уравнения расхода для сопла Лавала (7) однозначно можно определить число маха при заданной геометрии сопла. Определим скорость на выходе из сопла:

$$v_2 = M \sqrt{\gamma RT_2}, \quad (10)$$

где T_2 определяется из адиабатического расширения:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(1 + \frac{(\gamma-1)M^2}{2} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Подставляя значения из условия Рэнкина-Гюгоню, найдем минимальное необходимое значение числа Маха для инициации:

$$M_{min} \geq \sqrt{\frac{(\gamma+1) p_{дет}/p_1 + (\gamma-1)}{2\gamma}}. \quad (12)$$

Таблица – Расчетные данные начальных параметров перед соплом Лавала

Топливо	$p_{дет}$ (МПа)	$T_{дет}$ (К)	p_1 (МПа)	T_1 (К)	M
Водород	2	1200	5	1300	1,9
Метан	3	1500	10	1800	2,5
Пропан	4	1700	15	2100	3,0

Теоретический анализ подтверждает, что интеграция сопла Лавала может использоваться для инициации детонации в газовых смесях за счет генерации управляемых сверхзвуковых потоков. Ключевым механизмом является

ускорение фронта горения и формирование ударных волн, которые создают критические условия, необходимые для самоподдерживающейся детонации. На основе уравнений Рэнкина-Гюгонно и модели ЗНД были определены минимальные значения числа Маха ($M = 1,9 - 3,0$ для водорода, метана и пропана), обеспечивающие переход к детонационному режиму. Интеграция критерия Чепмена-Жуге позволила описать устойчивость волны и ее связь с термодинамическими параметрами среды [4].

В перспективе применение результатов для проектирования энергоэффективных импульсных детонационных двигателей (PDE), где снижение затрат на инициацию напрямую повышает КПД системы. Особую актуальность эта работа приобретает в контексте применения в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) гражданского и военного назначения, где требования к малому весу, высокой энергоотдаче и автономности являются критическими [4, 5]. Кроме того, метод может быть адаптирован для управления взрывными процессами в промышленности. Для реализации подхода требуются дальнейшие исследования, включающие экспериментальную проверку моделей, учет диссипативных эффектов и оптимизацию геометрии сопла под различные топливные составы. Таким образом, предложенная концепция открывает возможности для создания компактных и высокопроизводительных систем детонационного горения.

Список литературы:

1. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе; под ред. Р. И. Солоухина. – М.: Наука, 1980. – 478 с. – Текст: непосредственный.
2. Wolański, P.: Detonative propulsion. Proc. Combust. Inst. 34. 125–158 (2013). URL: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.10.005>.
3. Zeldovich, Ya. B. To the question of energy use of detonation combustion. Journal of Propulsion and Power. 22(3). 588-592 (2006). URL: <https://doi.org/10.2514/1.22705>.
4. От ускорителя Стечкина к высокочастотному бескапанному пульсирующему детонационному двигателю / Е. Ю. Марчуков, Ю. Н. Нечаев, А. С. Полев, А. И. Тарасов. – Текст: непосредственный // ИИЕТ РАН РФ. Симпозиум, посвященный памяти академика Б. С. Стечкина (к 115-летию со дня рождения), Москва, 27 января 2006 г. – М., 2006.
5. Булат, П. В. Обзор проектов детонационных двигателей. Импульсные двигатели / П. В. Булат, Н. В. Продан. – Текст: непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 1667-1671.

© Орлов С. А., 2025

ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ СЖИГАНИЯ В НТВ-ТОПКАХ

студент **Федорук Софья Сергеевна**,
ст. преподаватель **Рыжиков Владимир Александрович**,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследуются технология сжигания RDF-топлива (Refuse Derived Fuel) в НТВ-топках (низкотемпературные вихревые топки) как эффективный метод энергетической утилизации отходов. Описывается принцип работы НТВ-топки, преимущества использования RDF-топлива, включая сокращение объемов отходов на полигонах и производство энергии. Подчеркивается важность подготовки топлива для обеспечения экологической безопасности процесса.

Ключевые слова: топливо, энергетика, переработка отходов, утилизация, сортировка.

PROBLEMS OF WASTE DISPOSAL IN ST. PETERSBURG AND THE PROSPECT OF BURNING THEM IN NTV FURNACES

Student **Fedoruk Sofia Sergeevna**,
Senior Teacher **Ryzhikov Vladimir Alexandrovich**,
St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design,
Higher School of Technology and Energy,
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The technology of burning RDF fuel (Refuse Derived Fuel) in LTV furnaces (low-temperature vortex furnaces) is investigated as an effective method of energy utilization of waste. The operating principle of the LTV furnace, the advantages of using RDF fuel, including the reduction of waste volumes at landfills and energy production are described. The importance of fuel preparation for ensuring the environmental safety of the process is emphasized.

Keywords: fuel, energy, waste processing, disposal, sorting.

Экологическая ситуация в современном мире, включая Санкт-Петербург, продолжает оставаться сложной, требующей незамедлительных мер. Научно-технический прогресс и растущее воздействие человека на природу приводят к

ухудшению экологической обстановки. Основной проблемой является загрязнение окружающей среды, вызванное выбросами промышленных предприятий, выхлопами автотранспорта и, в частности, твердых коммунальных отходов.

Особенно остро стоит вопрос утилизации отходов. Рост потребления, в том числе целлюлозно-бумажной продукции, привел к увеличению объемов отходов, которые загрязняют природный ландшафт. Эти отходы могут стать источником вредных веществ, угрожающих экосистемам и здоровью человека. На данный момент значительное количество мусора, образовавшегося в Санкт-Петербурге, по-прежнему хранится на свалках, не подвергаясь повторному использованию [1].

Для решения этой проблемы в Санкт-Петербурге функционирует АО «Невский экологический оператор», призванный собирать и обеспечивать надлежащую утилизацию всего мусора. Однако эффективность системы во многом зависит от внедрения новых технологий сортировки, переработки и утилизации отходов, чтобы уменьшить нагрузку на свалки и обеспечить повторное использование ресурсов. Необходимо стремиться к сокращению количества отходов, повторному использованию материалов и внедрению экологически чистых технологий, чтобы улучшить экологическую обстановку в городе и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

АО «Невский экологический оператор» (НЭО) использует ряд методов переработки и сортировки отходов, хотя конкретные детали технологических процессов могут варьироваться и постоянно совершенствоваться. В общих чертах можно выделить следующие основные этапы и методы:

Первым и важным этапом является сортировка отходов, которая начинается с первичной сортировки. Отходы поступают на конвейерную ленту, где происходит ручная и автоматизированная сортировка. Рабочие отбирают крупные фракции (бумага, пластик, стекло, металл), а также опасные отходы. Следующим этапом является автоматическая сортировка с использованием автоматизированных систем сортировки, основанных на различных технологиях, таких как:

1. Оптические сортировщики: распознают различные материалы по цвету, форме и спектральным характеристикам с помощью камер и датчиков.
2. Магнитные сепараторы: извлекают металлические отходы.
3. Вихревые сепараторы: отделяют цветные металлы.
4. Воздушные сепараторы: разделяют отходы по плотности с помощью воздушных потоков.

Существует отдельная линия для сортировки крупногабаритных отходов (мебель, бытовая техника и т. д.) с целью извлечения пригодных для переработки материалов.

Вторым немаловажным этапом является переработка различных видов отходов. Различные виды пластика (ПЭТ, ПВД, ПНД и др.) сортируются, измельчаются, очищаются и перерабатываются во вторичное сырье (гранулы, хлопья), которое используется для производства новых изделий. Бумага и картон сортируются по видам, очищаются от примесей и перерабатываются в

макулатуру, которая используется для производства новой бумаги и картона. Стекло сортируется по цвету, очищается от примесей и перерабатывается в стеклобой, который используется для производства новых стеклянных изделий. Металлические отходы сортируются по видам (черные и цветные металлы), очищаются и переплавляются для производства новых металлических изделий. Органические отходы (пищевые отходы, растительные остатки) могут компостироваться с использованием различных технологий (например, аэробное компостирование, анаэробное сбраживание) для получения компоста, который используется в качестве удобрения [2].

Таблица 1 – Характеристики некоторых горючих компонентов ТКО [3]

Компонент	Влажность, %			Зольность, %			Теплота сгорания на сухую беззольную массу, МДж/кг
	холодный	теплый	переходный	холодный	теплый	переходный	
Пищевые отходы	73,8	70,9	69,4	7,2	15,0	7,7	18,2
Бумага, картон	28,7	31,8	38,1	7,2	11,3	13,7	16,9
Дерево	14,9	12,3	32,8	3,2	3,1	3,2	20,3
Кожа, резина	5,1	4,2	19,6	16,0	18,8	11,3	31,1
Пласт-масса	8,1	6,6	23,2	1,4	3,5	6,9	27,4
Текстиль	40,9	22,8	33,9	1,4	8,3	6,5	22,6
Отсев	51,9	50,2	47,9	53,7	20,5	40,3	20,1

Одним из ключевых целей, которые ставит перед собой АО «Невский экологический оператор», является вовлечение переработанных твердых коммунальных отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья или энергии. В связи с этим появляется необходимость создания высокоэффективного сжигания отходов. В поисках экологически чистых источников энергии все чаще обращают внимание на переработку отходов. RDF-топливо – топлива, получаемого из твердых бытовых отходов, один из перспективных вариантов, позволяющих одновременно решить проблему мусора и получить энергию. Часть отходов, непригодных для вторичной переработки, может использоваться для производства RDF-топлива, которое можно использовать для сжигания на специализированных электростанциях для получения энергии.

Завершающим этапом является утилизация топлива, которое включает в себя размещение на полигонах и энергетическую утилизацию. Отходы, непригодные для переработки и компостирования, размещаются на полигонах (специально оборудованных площадках для захоронения отходов). НЭО стремится к минимизации объемов отходов, направляемых на полигоны, путем увеличения объемов переработки и использования других методов утилизации. Энергетическая утилизация (сжигание с получением энергии) рассматривает возможность строительства мусоросжигательных заводов с системой утилизации тепла для производства электроэнергии.

Энергетическая утилизация RDF-топлива подразумевает наличие системы пылеприготовления, предназначенное для измельчения и подготовки до состояния, пригодного для эффективного и стабильного сжигания в котлах [4].

Улучшить технико-экономические и экологические показатели котлов, повысить надежность работы, расширить используемую топливную базу RDF позволяют современные способы сжигания топлива. Перспективные разработки основаны на многократной циркуляции частиц в камере горения: топки с кипящим слоем, низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания топлива. Эта технология, применяемая для энергетической утилизации RDF, обеспечивающая эффективное сжигание неоднородного топлива благодаря созданию вихревого слоя, в котором топливо интенсивно перемешивается с воздухом, обеспечивая полное и равномерное сгорание при высокой температуре; тепло, выделяемое при этом, используется для производства пара и далее электроэнергии или тепла, а дымовые газы проходят через систему очистки.

Принцип работы топочной установки (рис.) основывается на создании эффективной вихревой зоны для полного сгорания топлива. Топливо и основная часть (60-80 %) воздуха для горения подаются через прямоточные горелки, расположенные на фронтальной стенке топки под углом 40-45°. Остальной воздух направляется встречным потоком вдоль фронтального ската с помощью системы нижнего дутья, расположенной в нижней части топки, формируя вихревую зону. В этой зоне в результате взаимодействия встречно-направленных потоков, циркулирует от 70 до 100 % газов, обеспечивая интенсивное перемешивание топлива и воздуха. При развороте струй у задней стенки топки крупные частицы под действием инерции и веса оседают вниз, где вовлекаются в многократную циркуляцию нижним дутьем, в то время как мелкие частицы уносятся восходящим потоком в основную зону факела, способствуя более эффективному сгоранию [5].

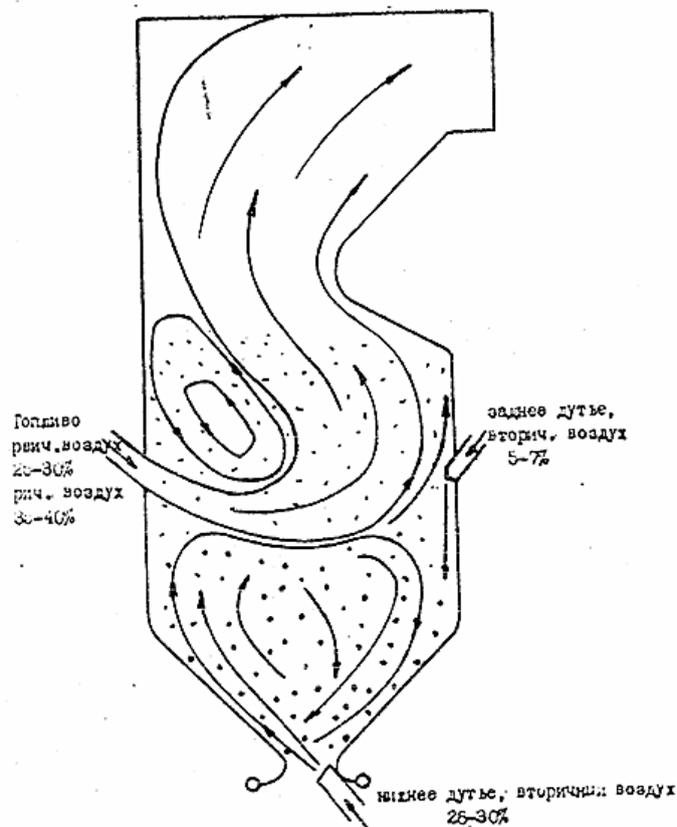


Рисунок – Схема НТВ сжигания

Описанная схема организации топочного процесса позволяет увеличить время пребывания частиц в топочном объеме и создает оптимальные условия для смешения топлива с окислителем благодаря активной рециркуляции газов. Принудительная подача горячих топочных газов и горящих частиц топлива к горелке с помощью нижнего дутья стабилизирует процесс воспламенения. Это дает возможность использовать топливо более грубого помола, что, в свою очередь, снижает затраты электроэнергии на размол, устраняет риски взрывов и пожаров, увеличивает производительность размольных мельниц и упрощает систему пылеприготовления.

В заключение стоит отметить, что сжигание RDF-топлива в НТВ-топке представляет собой перспективный и эффективный метод энергетической утилизации отходов, открывающий путь к получению ценной тепловой и электрической энергии, значительно сокращая при этом объемы захоронения отходов на полигонах. При условии тщательной подготовки RDF-топлива и применения передовых систем очистки дымовых газов этот процесс не только становится экологически безопасным, так как снижаются вредные выбросы в окружающую среду за счет пониженной температуры и восстановительной зоны. Удобство хранения и транспортировки RDF-топлива обеспечивает оптимизацию логистических затрат, что делает эту технологию не только экологически, но и экономически привлекательной. Таким образом, НТВ-топки, работающие на RDF, открывают новые возможности для устойчивого развития, сочетая в себе решение проблемы утилизации отходов и производство энергии.

Список литературы:

1. Государственное регулирование охраны окружающей среды: [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/> (дата обращения: 07.04.2024). – Текст: электронный.
2. Современные технологии переработки отходов. РДФ топливо: [сайт]. – URL: <https://spb-neo.ru/press-tsentr/news/> (дата обращения: 07.04.2024). – Текст: электронный.
3. Технология обращения с твердыми коммунальными отходами. Ч. 2: учебное пособие / Е. А. Васильева. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. –80 с. – Текст: непосредственный.
4. RDF-топливо. Зарубежный опыт и перспективы использования в России: [сайт]. – URL: https://7greenline.ru/novosti/news_post/ (дата обращения: 07.04.2024). – Текст: электронный.
5. Померанцев, В. В. Топки скоростного горения для древесного топлива / В. В. Померанцев; М-во тяжелого машиностроения СССР. Главкотлотурбобром. Центр. науч.-исслед. ин-т им. И. И. Ползунова. – Москва; Ленинград: [Ленингр. отд-ние] Машгиза, 1948 (Л.: тип. «Профинтерн»). – 74 с. – Текст: непосредственный.

© Федорук С. С., Рыжиков В. А., 2025

МАТЕРИАЛЫ
VIII Всероссийской научно-практической конференции
обучающихся и преподавателей
«ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ»

2025

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Технический редактор М. Д. Баранова

Научное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 09.06.2025. Изд. № 5072/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4