

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 11 № 3

**Севастополь
2025**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2025. – Т. 11. - № 3. – 141 с.: ил.**

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из следующих тематических рубрик: Энергетические системы и комплексы, Электротехнические комплексы и системы, Теоретическая и прикладная теплотехника; Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность; Техносферная безопасность (в энергетике); Процессы и аппараты химических технологий.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Состав редколлегии:

Главный редактор – *Якимович Борис Анатольевич*, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Заместитель главного редактора – *Губарев Федор Александрович*, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Ответственный секретарь – *Черкашина Наталья Игоревна*, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Технический редактор – *Нестерова Елена Александровна*, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Члены международного редакционного совета:

Абу Исса Никола Наджиб, профессор Дамасского университета, Сирийская Арабская Республика.

Божек Павел, к.т.н., профессор, почетный доктор (Doctor Honoris Causa), Трнава Словачкий технологический университет, Словакия.

Ли Линь, к.т.н., ассоциированный профессор Ляонинского технологического университета, КНР.

Червинский Вячеслав Леонидович, к.т.н., доцент, БНТУ, Республика Беларусь.

Редакционный совет:

Аллаяров Садулла Реймович, д.х.н., главный научный сотрудник, Отдел строения вещества, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка.

Богомолов Александр Романович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики Института энергетики, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Вологдин Сергей Валентинович, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск.

Заворин Александр Сергеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой руководитель НОЦ И. Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Комишин Александр Сергеевич, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Лидер Андрей Маркович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры; профессор отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Митрофанова Ольга Викторовна, д.т.н., профессор кафедры теплофизики ИЯФит, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Пестряков Алексей Николаевич, д.х.н., профессор, профессора Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Семёнов Владимир Константинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры атомных электрических станций, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Чудинова Юлия Валерьевна, д.б.н., доцент, заведующий кафедрой «Охраны труда и окружающей среды» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск.

Щеклеин Сергей Евгеньевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральского Федерального университета, Уральского энергетического института.

Дмитриев Сергей Михайлович, д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, заведующий кафедрой атомных и тепловых станций Образовательно-научного Института ядерной энергии и технической физики.

Члены редколлегии:

Высоцкий Виталий Евгеньевич, д.т.н., профессор кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Глазырин Александр Савельевич, д.т.н., доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Горбунов Владимир Александрович, д.т.н. доцент, профессор кафедры атомных электрических станций, ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Завьялов Валерий Михайлович, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Мостовицков Андрей Владимирович, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск. г. Томск.

Назаренко Ольга Брониславовна, д.т.н., доцент, профессор отделения контроля и диагностики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Пак Александр Яковлевич, д.т.н., заведующий лабораторией ЛПМЭО ИШЭ, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Романенко Сергей Владимирович, д.х.н., профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Семыкина Ирина Юрьевна, д.т.н., доцент, директор учебно-научного центра информационных технологий обучения ИЯЭиП ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Харламов Виктор Васильевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственного университета путей сообщения», г. Омск.

Яковилин Леонид Александрович, д.х.н., доцент, профессор кафедры Химия и химические технологии, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Браславский Юрий Валентинович, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Губин Владимир Евгеньевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Козырь Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент кафедры, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Кучерик Галина Валентиновна, к.х.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Магдыч Екатерина Александровна, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Матузаев Кирилл Борисович, к.т.н., зав. кафедрой ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Ожиганова Марина Ивановна, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Омельчук Юлия Аркадьевна, к.х.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Скидан Александр Антонович, к.т.н., доцент, профессор ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2025

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



Уважаемые читатели научного журнала «Энергетические установки и технологии»!

Уважаемые авторы, научно-технический журнал «Энергетические установки и технологии» рад приветствовать Вас на страницах третьего номера за 2025 год. В этом сборнике представлены статьи по различным направлениям энергетики, такими как ядерные технологии, энергетические комплексы, экологическая безопасность, электроэнергетика и др. Журнал продолжает освещать актуальные научно-технические достижения, способствующие развитию технических отраслей и внедрению инноваций.

В сентябре 2025 года в Институте ядерной энергии и промышленности была успешно проведена Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2025», в которой участвовало большое количество учёных из Российской Федерации и других стран мира. На конференции были представлены доклады в 7 секциях по различным направлениям. Наш журнал стремится стать платформой для обмена передовыми научными идеями и практическими решениями, способствующими переходу к более экологически чистой и экономически эффективной энергетике.

Традиционные и возобновляемые источники энергии играют все большую значимость в мировой экономике. Их интеграция в комплексные энергосистемы требует разработки новых методов управления, накопления и распределения энергии, а также адаптации инфраструктуры под современные требования устойчивого функционирования энергетических комплексов.

Надеемся, что статьи, представленные в третьем номере журнала, вызовут интерес у научного сообщества, а журнал станет дискуссионной площадкой в выборе пути развития современной энергетики. Мы поддерживаем диалог между учёными, инженерами и практиками, который ускоряет развитие эффективных решений для устойчивого и безопасного энергетического будущего. Уверен, что совместные усилия позволят нам успешно ответить на вызовы времени и обеспечить надёжное развитие энергетики с минимальным воздействием на окружающую среду

*С уважением, главный редактор журнала «Энергетические установки и технологии»
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации
Б.А. Якимович*

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетические системы и комплексы	10
<i>Артеменко И.Д., Фролова А.Н., Борисов Б.Е., Гусева Е.В., Малюк Е.Г.</i> Автономная комбинированная система электроснабжения на основе электрохимических генераторов	10
<i>Бордан Д.Ф., Меджитов М.Р., Фролова А.Н., Скидан А.А., Конева С.А.</i> Исследование выработки фотоэлектрических систем генерации	15
<i>Губарев Ф.А., Гончаров Р.Д., Чимирус Д.С., Давыдова Л.Ю.</i> Фотоэлектронный модуль с охлаждаемым сенсором для контроля интенсивности теплового излучения	20
<i>Егорова А.О., Якимович Б.А., Нашев Р.А., Шевчук А.А., Артёменко И.Д.</i> Системы экологического мониторинга как инструмент повышения эффективности энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии	29
<i>Жильцов А.С., Юферев Л.Ю., Кувишинов В.В., Касницкий А.Д., Владимиров А.С.</i> Морская энергетическая установка на водородных топливных элементах	34
<i>Шевчук А.А., Кувишинов В.В., Рыбонька А.И., Цалоев В.М., Смирнов В.В.</i> Повышение эффективности систем возобновляемой энергетики на основе интеллектуальных методов прогнозирования и оптимизационного управления режимами	39
<i>Штепа К.В., Владимиров А.С., Ивантеев И.С., Касницкий А.Д., Бордан Д.Ф.</i> Диагностика оборудования солнечных электрических станций	44
<i>Янковский С.А., Губин В.Е., Цибульский С.А., Кан В.В., Янковская Н.С.</i> Исследование тепловой схемы модуля геотермальной установки с органическим циклом Ренкина и конденсатором воздушного охлаждения	49
Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды	53
<i>Довгаленко В.В., Матузаева О.В., Мирошниченко Е.В., Рипп А.Г., Хоружий А.С.</i> Теоретическое моделирование интенсивности поляризованного излучения для волоконных Брэгговских решеток в условиях радиационного воздействия	53
<i>Коренькова А.А., Рачицкая А.А., Нурзай В.А., Мостовицков А.В., Губарев Ф.А.</i> Измерение параметров вибрации систем промышленной вентиляции	61
<i>Кузнецова Н.И., Серова-Нашева Н.В., Губина Е.Д.</i> Анализ работоспособности и метод расчета эксплуатационной надежности систем диагностирования СКУ на базе платформы ТПТС	68
Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность	74
<i>Зацаринная Т.Г., Аникевич К.П., Чефранов А.С., Шахова Н.В., Груздева А.В.</i> Оптимизация процедуры внесения изменений в автоматизированные системы управления технологическим процессом на энергоблоках	74
<i>Матузаев К.Б., Матузаева О.В., Чернявская С.А.</i> Моделирование химической реакции с диффузией в трубчатом реакторе	90

Электротехнические комплексы и системы	95
<i>Абдурахманов Р.Н., Асанов М.М., Бекиров Э.А., Кувшинов В.В., Коломийченко В.П.</i> Оптимизация энергоснабжения удаленных сельских потребителей в Республике Крым при использовании ветроэнергетических установок	95
<i>Какушина Е.Г.</i> Сравнительный анализ по применению тригенерационных установок на основе ВИЭ в Крыму и Ростовской области	100
<i>Смирнов В.В., Какушин А.Д.</i> Комплексный подход к снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях Крымской энергосистемы	106
Техносферная безопасность (в энергетике)	110
<i>Сытников Д.М.</i> Актуальные проблемы экологии и природопользования: хроника конференции	110
Процессы и аппараты химических технологий	114
<i>Ворник О.В., Магдыч Е.А., Котельникова С.А., Романова Н.А.</i> Определению оптимального времени экспозиции при проведении радиометрического исследования дефектов стального кольцевого сварного трубопровода	114
<i>Горшков А.С. , Ивлев П.Н., Калтаев А.Ж. , Губин А.В. , Ларионов К.Б.</i> Получение древесного полукокса в пиролизной установки роторного типа непрерывного действия	124
<i>Королькова Н.М., Гавриш О.П., Черкашина Н.И., Дербасова Д.М.</i> Оценка влияния наночастиц карбида вольфрама на температурную стойкость цементных композитов	132
<i>Королькова Н.М., Гавриш О.П., Черкашина Н.И., Дербасова Д.М.</i> Изучение влияния наночастиц оксида вольфрама на ударопрочность керамических изделий, изготовленных из каолиновой глины	136

CONTENTS

Energy systems and complexes	10
<i>Artemenko I.D., Frolova A.N., Borisov B.E., Guseva E.V., Malyuk E.G.</i> Autonomous combined power supply system based on electrochemical generators	10
<i>Bordan D.F., Medzhitov M.R., Frolova A.N., Skidan A.A., Koneva S.A.</i> Study on the output of photovoltaic generation systems	15
<i>Gubarev F.A., Goncharov R.D., Chimiris D.S., Davydova L.Y.</i> Photoelectronic module with a cooled sensor for monitoring the intensity of thermal radiation	20
<i>Egorova A.O., Yakimovich B.A., Nashev R.A., Shevchuk A.A., Artemenko I.D.</i> Environmental monitoring systems as a tool for improving the efficiency of energy supply based on renewable energy sources	29
<i>Zhiltsov A.S., Yuferev L.Y., Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D., Vladimirov A.S.</i> Hydrogen fuel cell marine propulsion system	34
<i>Shevchuk A.A., Kuvshinov V.V., Rybonka A.I., Tsaloiev V.M., Smirnov V.V.</i> Increasing the efficiency of renewable energy systems based on intelligent forecasting methods and optimization control of modes	39
<i>Shtepa K.V., Vladimirov A.S., Ivanteev I.S., Kasnitsky A.D., Bordan D.F.</i> Diagnostics of solar power plant equipment	44
<i>Yankovsky S.A., Gubin V.E., Tsibulsky S.A., Kan V.V., Yankovskay N.S.</i> Study of the thermal diagram of a geothermal plant module with an organic Rankine cycle and an air-cooled condenser	49
Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment	53
<i>Dovgalenko V.V., Matuzaeva O.V., Miroshnichenko E.V., Ripp A.G., Kho- ruzhiy A.S.</i> Theoretical modeling of the intensity of polarized radiation in fiber Bragg gratings under radiation exposure	53
<i>Koren'kova A.A., Rachickaya A.A., Nurzai V.A., Mostovshchikov A.V., Gubarev F.A.</i> Measurement of vibration parameters of industrial ventilation systems	61
<i>Kuznetsova N.I., Serova-Nasheva N.V., Gubina E.D.</i> Performance analysis and method for calculating the operational reliability of control and monitoring system diagnostic systems based on the TPTS platform	68
Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety	74
<i>Zatsarinnaya T.G., Anikevich K.P., Chefranov A.S., Shahova N.V., Gruzdeva A.V.</i> The procedure optimization for making changes to the automated systems control used for technological process at the power units	74
<i>Matuzaev K.B., Matuzaeva O.V., Chernyavskaya S.A.</i> Modeling of a chemical reaction with diffusion in a tube reactor	90
Electrical engineering complexes and system	95
<i>Abdurakhmanov R.N., Asanov M.M., Bekirov E.A., Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P.</i> Optimization of energy supply for remote rural areas in the Republic of Crimea through the use of wind energy systems	95
<i>Kakushina E.G.</i> Comparative analysis of the use of renewable energy-based trigeneration plants in the Crimea and the Rostov region	100
<i>Smirnov V.V., Kakushin A.D.</i> An integrated approach to reducing electricity losses in the distribution networks of the Crimean energy system	106

Technosphere safety (in the energy sector)	110
<i>Sytnikov D.M.</i> Current issues of ecology and nature management: conference chronicle	110
Processes and devices of chemical technologies	114
<i>Vornik O.V., Magdych E.A., Kotelnikova S.A., Romanova N.A.</i> Determination of the optimal exposure time for radiometric examination of defects in a steel ring-welded pipeline	114
<i>Gorshkov A.S., Ivlev P.N., Kaltaev A.Zh., Gubin A.V., Larionov K.B.</i> Obtaining wood semi-coke in a continuous rotary pyrolysis plant	124
<i>Korolkova N.M., Gavrish O.P., Cherkashina N.I., Derbasova D.M.</i> Evaluation of the influence of nanoparticles of tungsten carbide nanoparticles on temperature resistance of cement composites	132
<i>Korolkova N.M., Gavrish O.P., Cherkashina N.I., Derbasova D.M.</i> Study of the effect of tungsten oxide nanoparticles on the impact resistance of ceramic products made of kaolin clay	136

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.92, 621.352.6

**Автономная комбинированная система электроснабжения на
основе электрохимических генераторов**

И.Д. Артеменко¹, А.Н. Фролова¹, Б.Е. Борисов¹, Е.В. Гусева¹, Е.Г. Малюк¹
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053,
Россия, leftysingle@gmail.com

Статья поступила 06.10.2025 г.; после доработки 10.10.2025 г.

Аннотация

Предлагаемая комбинированная автономная система электроснабжения, подключенная к потребителю электроэнергии, содержит внешний источник электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии, накопитель энергии, состоящий из электрохимического генератора на основе топливных элементов, электролизёра и водородного баллона. Разработанная децентрализованная система электроснабжения расширяет область применения низкотемпературных щелочных накопителей энергии для обеспечения потребителей электроэнергией заданного параметра и направлена на снижение стоимости технологии изготовления типовых систем.

Ключевые слова: электролизёр, система электроснабжения, топливный элемент, водородная энергетика, электрохимический генератор.

**Autonomous combined power supply system based on
electrochemical generators**

I.D. Artemenko¹, A.N. Frolova¹, B.E. Borisov¹, E.V. Guseva¹, E.G. Malyuk¹
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, leftysingle@gmail.com

Received 06.10.2025 y.; received in final form 10.10.2025 y

Abstract

The proposed combined autonomous power supply system, connected to the consumer of electricity, contains an external source of electricity based on renewable energy sources (solar or wind installations), an energy storage device consisting of an electrochemical generator based on fuel cells, an electrolyzed and a hydrogen cylinder. The developed decentralized power supply system expands the scope of application of low-temperature alkaline storage devices to provide consumers with electricity of a given parameter and is aimed at reducing the cost of manufacturing technology for standard systems.

Key words: electrolyzer, power supply system, fuel cell, hydrogen energy, electrochemical generator.

Введение

В современных условиях развития энергоемких производств наблюдается перекося потребления электрической энергии в разное время суток. Такой неравномерный режим потребления

негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках генерирующего оборудования традиционных электростанций, что в итоге приводит к его быстрому износу.

Для выравнивания перекося электропотребления и снижения износа оборудования на объ-

ектах традиционной генерации, в практику внедряются различные системы аккумулирования электроэнергии.

Наиболее актуальным аккумулирование становится в системах децентрализованного электроснабжения на базе возобновляемой энергетики (ВИЭ) [1-3].

Учитывая интенсивное развитие ВИЭ в большинстве стран мира все большее внимание уделяется системам хранения излишков выработанной электроэнергии, связанной с непостоянством ее производства и потребления.

Одним из направлений хранения таких излишков электроэнергии являются аккумуляторные батареи (АКБ), но технологии изготовления и эксплуатации современных АКБ не всегда отвечает повышенным требованиям, предъявляемым к источникам энергии такого типа.

В качестве альтернативы современным АКБ можно рассмотреть электрохимические генераторы (ЭХГ). Основным отличием АКБ от ЭХГ для получения электроэнергии является использование неметаллов и их соединений, а неэлектропроводных вещества, например водорода и кислорода в качестве реагентов.

Проводимые исследования в этой области позволили выделить различные направления повышения эффективности электрохимического преобразования энергии и определить пути улучшения энергетических показателей оборудования, направленные на эффективность аккумулирования энергии [4-6].

Сегодня на рынке представлено большое разнообразие различных моделей ЭХГ, которые различающихся по габаритам, конструкции и электрическим показателям.

Градации ЭХГ идет в зависимости от рабочих температурных показателей и типа используемого электролита. По температурным показателям ЭХГ делятся на низкотемпературные (с рабочей температурой ниже 100 °С), среднетемпературные - до 300 °С и высокотемпературные - выше 500 °С. По типу применяемого электролита делятся на щелочные топливные элементы (ТЭ), ТЭ с ионно-обменной мембраной и твердооксидные ТЭ.

Электролитом в низкотемпературных щелочных ЭХГ является водный раствор КОН. Его концентрация может изменяться в зависимости от рабочей температуры цикла. Преимуществом ЭХГ со щелочными топливными элементами являются его низкие эксплуатационные расходы, отсутствие нагнетателя, улучшенная кинетика электродных процессов.

Постановка задачи

Авторами на основании проведенного анализа конструкции и режимов эксплуатации низкотемпературных щелочных ЭХГ была разработана система децентрализованного электроснабжения и на нее получен патент на изобретение RU 2811560 С1. В составе спроектированной системы децентрализованного электроснабжения в качестве основной электрогенерирующей установки рассмотрена установка на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в качестве вторичного источника – щелочной низкотемпературный ЭХГ, в качестве накопителя энергии (НЭ) - электролизёр и емкости для хранения водорода и кислорода (рис. 1) [5].

Результаты исследований

Технической задачей являлось совершенствование конструкции системы децентрализованного электроснабжения в составе энергоустановки на базе ВИЭ и щелочного ЭХГ с электролизёром и емкостями для хранения водорода и кислорода в качестве НЭ, удешевление технологии изготовления системы, расширение эксплуатационных возможностей и повышение надежности.

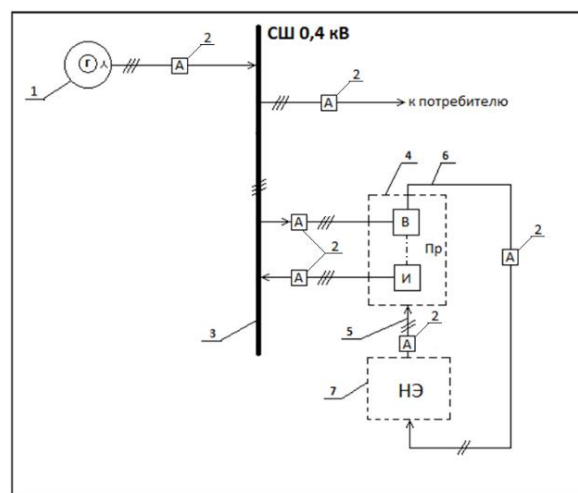


Рис. 1. Разработанная схема децентрализованного электроснабжения на базе преобразователя ВИЭ и ЭХГ: Г – асинхронный, трехфазный генератор, А – автоматический выключатель, Пр – полный управляемый полупроводниковый 3-х фазный преобразователь в составе выпрямителя (В) и инвертора (И), НЭ – накопитель энергии

Техническая задача решалась тем, что спроектированная система децентрализованного энергоснабжения, подключенная к потребителю

электроэнергии, содержит внешний источник генерации электроэнергии на базе ВИЭ с асинхронным, трехфазным генератором, НЭ (рис. 2) в составе ЭХГ на основе щелочного низкотемпературного ТЭ, электролизёра, водородного и кислородного баллонов, соединенных посредством трубопроводов и клапанов с соответствующими газовыми полостями ТЭ ЭХГ и электролизёра, имеющих общий контур циркуляции электролита.

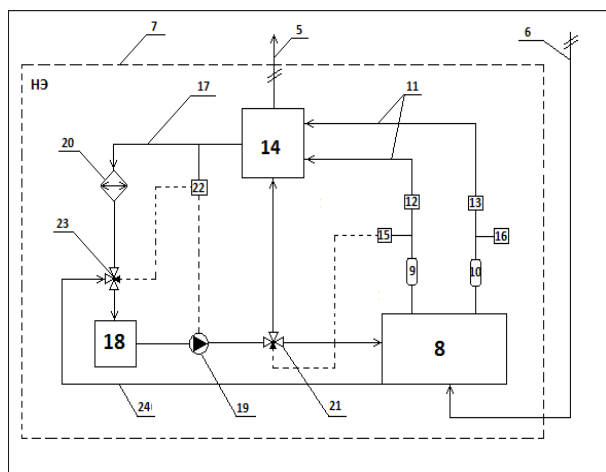


Рис. 2. Схемное решение НЭ в составе децентрализованной энергосистемы: 8 – электролизёр; 9, 10 – баллоны с H_2 и O_2 ; 14 – щелочной низкотемпературный ТЭ; 18 – емкость сбора реакционной воды; 21, 23 – управляемые трехходовые клапана

В разработанной авторами децентрализованной энергосистеме предусмотрено как автономное электроснабжение объекта, так и возможность присоединения к центральной сети. Разработанная энергосистема (рис. 1) содержит внешний источник электроэнергии 1, например мини-ГЭС, ветро- или солнечную энергоустановку, присоединенные через автоматические выключатели 2 к сборной шине 3, полностью управляемого полупроводникового трехфазного преобразователя 4, подключенного через шины питания 5, 6 к НЭ 7 (рис. 2) в составе электролизёра 8, водородного 9 и кислородного 10 баллонов, трубопроводов 11 и клапанов 12, 13 для соединения с соответствующими газовыми полостями щелочного низкотемпературного ТЭ ЭХГ 14 и электролизёра 8, датчиков верхнего и нижнего предельно допустимых значений давлений водорода 15 и кислорода 16, контура циркуляции электролита 17 с емкостью 18, циркуляционным насосом 19, теплообменником 20, регулирующим трехходовым клапаном 21 для подключения контура циркуляции электролита к ТЭ ЭХГ

14 либо к электролизёру 8. Для контроля рабочей температуры ЭХГ 14 и электролизёра 8 на трубопроводе с теплоносителем 17 до теплообменника 20 установлен датчик температуры 22, включенный в цепь управления насосом 19 и регулирующим трехходовым клапаном 23. НЭ 7 подключен к преобразователю 4 шинами питания 5, 6 через автоматические выключатели 2, что повышает надежность системы [3]. В разработанной энергосистеме предусмотрено два режима работы: 1 - й режим - выработка электроэнергии на энергоустановке на базе ВИЭ превышает мощность потребителя, избыток энергии направляется на заряд НЭ в составе ЭХ, 2 - й режим - выработка электроэнергии на энергоустановке на базе ВИЭ меньше потребляемой мощности потребителя, недостающая величина покрывается за счет разряда НЭ ЭХГ.

Разработанное авторами схемное решение системы децентрализованного электроснабжения в составе энергоустановки на базе ВИЭ и низкотемпературного щелочного ЭХГ в качестве НЭ направлено на выравнивание режима электропотребления объектом и снижение нагрузки на центральные сети.

Разработанная система децентрализованного электроснабжения расширяет область применения низкотемпературных щелочных ЭХГ по обеспечению потребителей электроэнергией заданного параметра, направлена на удешевление технологии изготовления типовых систем, а также ведет к снижению энергозатрат и улучшению эксплуатационных характеристик. Комбинированная автономная система электроснабжения содержит внешний источник генерации электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (различных типов и видов). Подразумевается, что под типом источника ВИЭ может быть использование энергии ветрового потока, солнечной радиации (под видом фотоэлектрическая, гелиотепловых, комбинированная термофотоэлектрическая системы) и др. Следовательно для данной установки источником генерации на базе ВИЭ может являться, например ветроэлектрическая, фотоэлектрическая, термофотоэлектрическая установки, топливные элементы или др. Особенно предложенная конструкция подходит для термофотоэлектрической установки [7] представленной на рисунке 3.

В представленной конструкции необходим накопитель энергии, который дополнительно содержит два управляемых трехходовых клапана, что значительно повышает эффективность работы всей системы.

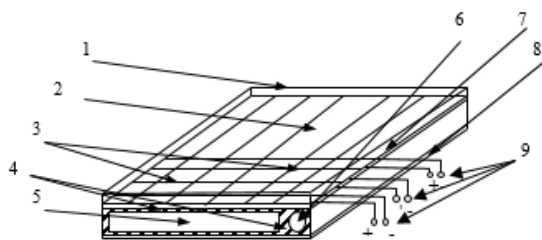


Рис. 3. Комбинированный термофотопреобразователь: 1 – падающая солнечная радиация; 2 – теплопоглощающая поверхность; 3 – солнечные элементы; 4 – стенки поглощающей поверхности гелиопрофиля; 5 – воздушный канал; 6 – канал для воды; 7 – верхнее защитное остекление; 8 – задняя стенка каркаса с тепловой изоляцией; 9 – выходные электрические контакты солнечных элементов.

Также это дополнение необходимо для эффективной работы установки с учетом использования топливных элементов электрохимического генератора и электролизёра, имеющих общий контур циркуляции электролита. Следовательно, предложенная комбинированная автономная система улучшает модель предложенную термофотоэлектрическую систему и позволяет значительно улучшить её энергетические характеристики. Комбинированная автономная система имеет значительно более высокую эффективность работы.

Выводы

В представленной работе решена важная научная задача повышения мощностных характеристик комбинированных систем энергоснабжения за счет использования топливных элементов, систем накопления энергии и внешних источников генерации электрической энергии. В процессе работы были получены результаты, по которым можно сделать следующие основные выводы:

- предложенная комбинированная система позволяет значительно повысить энергетические характеристики генерирующих систем за счёт специальной комбинации расположения основного и вспомогательного оборудования;
- значительно увеличить время работы подключенных к системе потребителей при использовании предложенных систем накопления энергии;
- повысить качество обслуживания потребителей и увеличить надёжность всей системы за счёт использования высокоэффективных

схемных решений в конструкции установки.

Список литературы

1. Муровский С.П. Внедрение ресурсосберегающих технологий в систему электроснабжения промышленных предприятий/ С.П. Муровский, В.О. Куплений, Б.И. Тараненко // Строительство и техногенная безопасность. - 2017. - № 60. - С. 97-103.
2. Изучение оптимизации режимов работы солнечных электростанций в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя с возможностью регулирования частоты // Чернышов А.С., Гурьев В.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Олейников А.М. / Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 2. С. 138-147.
3. Воропай Н.И., Клер А.М., Кононов Ю.Д., Санеев Б.Г., Сендеров С.М., Стенников В.А. Методические основы стратегического планирования развития энергетики // Энергетическая политика. №3. 2018. С.35-44.
4. Проблемы развития электроэнергетики, методы и механизмы их решения в рыночных условиях / Н.И. Воропай, Е. Ю. Иванова, В. В. Труфанов [и др.] // Экономические проблемы энергетического комплекса: материалы семинара (Москва, 28 февр. 2006 г.) / Ин-т народнохозяйственного прогнозирования. – Москва, 2007. – 114 с.
5. Патент на изобретение RU 2811560 С1. Комбинированная автономная система электроснабжения // Муровский С.П., Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Якимович Б.Ф., Штепа К.В./ Заявка от 22.02.2023; Опубл.15.01.2024.- 5 с.
6. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы // Гурьев В.В., Кувшинов В.В., Якимович Б.А., Аль Баирмани А.Г., Какушина Е.Г. / Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 1. С. 108-117.
7. Фототермопреобразователь солнечной энергии / Патент на полезную модель RU 150121 U1, 27.01.2015, Башта А.И., Кувшинов В.В., Сафонов В.А., Заявка № 2014149414/93 от 17.10.2014.

References

1. Murovsky S.P. Implementation of resource-saving technologies in the power supply system of industrial enterprises / S.P. Murovsky, V.O. Kupleny, B.I. Taranenko // Construction and technological safety. - 2017. - No. 60. - P. 97-103.
2. Study of optimization of operating modes of solar power plants in the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol with the possibility of frequency regulation // Chernyshov A.S., Guryev V.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Oleynikov A.M. / Intelligent systems in production. 2022. Vol. 20. No. 2. P. 138-147.
3. Voropai N.I., Kler A.M., Kononov Yu.D., Saneev

- B.G., Senderov S.M., Stennikov V.A. Methodological foundations of strategic planning of energy development // Energy Policy. No. 3. 2018. P.35-44.
4. Problems of development of electric power industry, methods and mechanisms of their solution in market conditions / N. I. Voropai, E. Yu. Ivanova, V. V. Trufanov [et al.] // Economic problems of the energy complex: materials of the seminar (Moscow, February 28, 2006) / Institute of Economic Forecasting. - Moscow, 2007. - 114 p.
 5. Patent for invention RU 2811560 C1. Combined autonomous power supply system // Murovsky S.P., Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Yakimovich B.F., Shtepa K.V. / Application dated 02/22/2023; Published 01/15/2024. - 5 p.
 6. Study of steady-state modes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system // Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Al Bairmani A.G., Kakushina E.G. / Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. 2022. Vol. 25. No. 1. P. 108-117.
 7. Solar energy photothermal converter / Utility model patent RU 150121 U1, 01/27/2015, Bashta A.I., Kuvshinov V.V., Safonov V.A., Application No. 2014149414/93 dated 10/17/2014.

УДК 620.92, 621.352.6

Исследование выработки фотоэлектрических систем генерации

Д.Ф. Бордан¹, М.Р. Меджитов¹, А.Н. Фролова¹, А.А. Скидан¹, С.А. Конева¹
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053,
Россия, mevludmedzhitov@mail.ru

Статья поступила 06.10.2025 г.; после доработки 09.10.2025 г.

Аннотация

Использование фотоэлектрических систем генерации энергии позволяет значительно сократить использование органических топлив и не зависеть от их внешних поставок. Однако для повышения эффективности краткосрочного планирования режимов в части выработки мощности солнечными электростанциями и обеспечения резервов активной мощности требуется создание новых инструментов прогнозирования генерации фотоэлектрических станций.

Ключевые слова: солнечная генерация, фотоэлектрические системы, инсоляция потока солнечной радиации, возобновляемая энергетика, системы прогнозирования.

Study on the output of photovoltaic generation systems

D.F. Bordan¹, M.R. Medzhitov¹, A.N. Frolova¹, A.A. Skidan¹, S.A. Koneva¹
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, mevludmedzhitov@mail.ru

Received 06.10.2025 y.; received in final form 09.10.2025 y

Abstract

The use of photovoltaic energy generation systems allows for a significant reduction in the use of fossil fuels and independence from external supplies. However, to improve the efficiency of short-term planning of solar power plant power generation modes and to ensure active power reserves, it is necessary to create new tools for forecasting the generation of photovoltaic plants.

Key words: solar generation, photovoltaic systems, solar radiation flux insolation, renewable energy, forecasting systems.

Введение

Ископаемое топливо по-прежнему доминирует в мировой выработке энергии, особенно в транспортной отрасли и электроэнергетике, что способствует истощению ресурсов и загрязнению окружающей среды. В отличие от него, солнечная энергия представляет собой многообещающую альтернативу благодаря своей доступности, низкому воздействию на окружающую среду, бесшумной работе и экономической эффективности в долгосрочной перспективе [1]. Южные регионы Российской Федерации, территории Причерноморья, а также Крымский полуостров, обладают высокой солнечной инсоля-

цией в среднем около 2000 кВт·ч/м² в год и преимущественно ясной погодой. Поэтому для них предоставляют идеальные условия для инвестиций в солнечную энергетику и строительства солнечных электрических станций (СЭС).

Для повышения эффективности использования солнечной энергии при строительстве и работе фотоэлектрических генерирующих систем применяются различные методики прогнозирования освещенности территорий расположения СЭС, которые обеспечивают наиболее эффективное расположение фотоэлектрических (ФЭ) панелей по отношению к солнечным лучам в течение всего дня, что значительно увеличивает

выработку электрической энергии. С ростом мирового спроса на альтернативные источники энергии солнечные фотоэлектрические (ФЭ) системы стали ключевым элементом активов возобновляемой энергетики. Недавние инновации в области солнечной энергетики позволяют строить различные фотоэлектрические системы во многих регионах России. Известно, что точность прогноза СЭС напрямую влияют на объемы резервов активной мощности, определяемые при краткосрочном и долгосрочном планировании режима работы энергосистемы. В соответствии с требованиями, указанных в СТО 59012820.27.010.001–2018 «Определение объемов резервов активной мощности при краткосрочном планировании режима работы единой энергетической системы России» нормативный объем резервов вторичной корректировки нагрузки равен наибольшему из следующих значений. Расчетный небаланс мощности, связанный с отключением генерирующего блока с наибольшей рабочей мощностью в зоне регулирования. Нерегулярные отклонения активной мощности (на практике – ошибки прогноза нагрузки) и динамические ошибки корректировок балансировки мощности (инерционность в работе AFCM). Анализируя метод расчета резерва вторичного регулирования нагрузки, можно сделать вывод, что резерва вторичного регулирования недостаточно для компенсации общего дисбаланса в случае отключения генерации при неизбежных на практике ошибках прогноза нагрузки. Часть дисбаланса будет покрыта за счет третичного резерва. Анализируя метод расчета третичного резерва регулирования нагрузки, можно сделать вывод, что все ошибки прогноза нагрузки компенсируются третичным резервом регулирования. В этом случае величина статистической ошибки прогноза потребления эффективной мощности может также косвенно объяснить ошибку прогноза генерации солнечных электрических станций (СЭС), работающих параллельно с общей энергосистемой [1].

Постановка задачи

Для того чтобы более точно и точно оценить резерв третичной корректировки (возникает вопрос, почему вторичная корректировка не учитывает ошибки прогноза нагрузки), можно предложить следующую модель. Без учета ограничений мощности элементов сети, потерь мощности в сети и перетоков мощности с соседними энергосистемами, уравнение баланса мощности для

энергосистемы с ПЭС может быть выражено следующим уравнением:

$$P_H(t) = P_{ТГ}(t) + P_{СЭС}(t), \quad (1)$$

где $P_H(t)$ – мощность нагрузки энергосистемы в момент времени t ; $P_{ТГ}(t)$ – мощность электростанций на базе традиционных источников топлива в момент времени t ; $P_{СЭС}(t)$ – мощность ФЭС в момент времени t .

Все компоненты уравнения в момент времени t могут характеризоваться истинным значением величины, прогнозируемым значением величины и ошибкой прогнозируемого значения относительно истинного значения величины.

Проблема прогноза производства генерирующей мощности станций, функционирующих с использованием различных видов возобновляемой энергии связаны с проблемой ее характера ее нестабильности. Решение данной задачи является многофакторным, с большим числом нормализуемых данных и большого числа переменных, таких, как схемно-режимная ситуация в энергосистеме, метеофакторы, производство ремонтных работ, ограничения по режиму работы тепловых электростанций, что в совокупности оказывает сильное влияние на прогнозирование вырабатываемой мощности электростанциями при краткосрочном и оперативном прогнозировании [2].

Поэтому для повышения эффективности краткосрочного планирования режимов в части выработки мощности солнечными электростанциями и обеспечения резервов активной мощности требуется создание новых инструментов прогнозирования генерации фотоэлектрических станций для краткосрочного (процедуре выбора состава включенного генерирующего оборудования, далее – ВСВГО), планирования на сутки вперед и оперативного планирования (обеспечение прогнозирования внутри суток с актуализацией прогноза и режимов работы каждый час). Краткосрочный прогноз выработки электрической энергии солнечными электростанциями обусловлен необходимостью актуализации состояния генерирующего оборудования и его выбора в процедуре ВСВГО, при этом оперативный прогноз служит не только для управления перетоками но и для управления объемами генерации с учетом режимно-балансовой ситуации в энергосистеме, а также своевременной корректировки диспетчерских графиков электростанций в том числе солнечных [3].

При расчетах в процедуре определения ВСВГО генерирующая мощность солнечных

электростанций приравнивается к расчетной минимально-обеспеченной нагрузке, которая должна актуализироваться ежемесячно для каждого объекта солнечной генерации. Собственники объектов солнечной генерации работающих, как на оптовом, так и на розничном рынке заинтересованы в развитии методов прогнозирования и повышении качества прогноза на сутки вперед и оперативном планировании.

Данная задача краткосрочного и оперативного прогнозирования является актуальной не только для собственников объектов солнечной генерации, но и для диспетчерских центров, которые обеспечивают планирование электроэнергетического режима и надежность и бесперебойное электроснабжение потребителей, как с технической, так и с экономической точки зрения, для оптимизации работы тепловых и атомных электростанций, которые благодаря оптимальному режиму работают с более высоким КПД, минимизируют расход топлива, снижают степень загрязнения экологии [4].

Одной из непростых задач, реализуемых в рамках краткосрочного планирования и оперативного планирования энергосистемы, является прогнозирование выработки электростанций, которые работают на возобновляемых источниках энергии. По мере увеличения их доли генерации от общей установленной мощности энергосистемы влияние их на плановый баланс энергосистемы, частоту, качество электроэнергии, статическую и динамическую устойчивость, уровни напряжения и потери мощности также становятся более существенными. В большей мере влияние их заключается в метеорологических факторах (МФ), влияющих на выдаваемую мощность солнечными модулями СЭС [5].

Результаты исследований

В ходе выполнения работы произведены исследования по выявлению зависимости генерируемой мощности солнечными панелями, расположенными на СЭС в Республике Крым. Одной из целей исследований являлось фиксирование вырабатываемой мощности СЭС Перово, за сутки в течение недели. Конечной задачей исследований было выявление зависимости генерируемой мощности от освещенности, облачности и продолжительности светового дня. В рамках исследований влияние влажности, температуры, скорости ветра не рассматривались, а следовательно, данные факторы не учитывались при общем прогнозировании вырабатываемой мощности. Зависимость вырабатываемой мощности от

освещенности имеет существенно более определенный характер. На рис. 1 и 2 изображены примеры полученных зависимостей за сутки при различных погодных условиях, которые напрямую влияли на освещенность СЭС Перово.

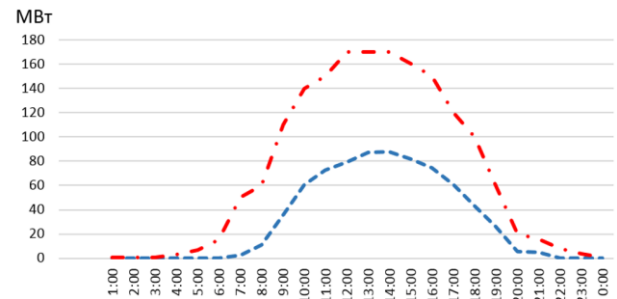


Рис. 1. Зависимость влияния освещенности на вырабатываемую мощность солнечной батареи в ясный день (·—· — показана освещенность СЭС Перово; --- — показана выдаваемая мощность СЭС Перово).

Был изучен ряд факторов, которые имели более определенный характер влияния на выдаваемую мощность СЭС Перово такие как естественная освещенность, облачность, осадки (дождь, туман, снег).

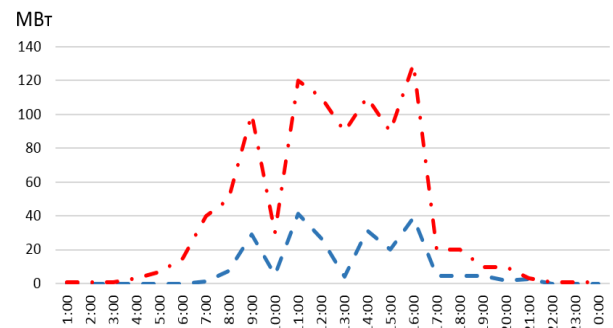


Рис. 2. Зависимость влияния освещенности на вырабатываемую мощность солнечной батареи в пасмурный день (·—· — показана освещенность СЭС Перово; --- — показана выдаваемая мощность СЭС Перово).

В ходе исследования установлено, что связь между вырабатываемой мощностью и естественной освещенностью имеет нелинейный характер, что указывает на необходимость использования специфических математических методов и моделей прогнозирования генерируемой мощности, что позволит учитывать нелинейный характер взаимосвязей генерируемой мощности с влияющими на него факторами. Взаимосвязь между генерацией и освещенностью также зависит от

сезонности (времени года), что обусловлено длительностью светового дня.

Мощность, генерируемая солнечной батареей, зависит от уровня освещенности, которая, в свою очередь, зависит от метеорологических условий. Взаимосвязь между производимой мощностью и уровнем естественной освещенности значительно выражена при интенсивном изменении уровня освещенности и практически незаметна при её равномерных и низких уровнях.

Для прогнозирования генерируемой мощности и проведения будущих испытаний необходимо было использовать метеорологический прогноз погоды, используя данные которого составлялся график освещенности на сутки вперед. Для этого применялся специализированный комплекс, назначение которого прогноз электропотребления. При помощи комплекса АС «Метео» была выполнена оценка качества прогнозирования путем составления плана-графика освещенности на сутки вперед, используя значения которого так же была рассчитана мощность, которую СЭС Перово будет генерировать на этот промежуток времени (рис. 3).

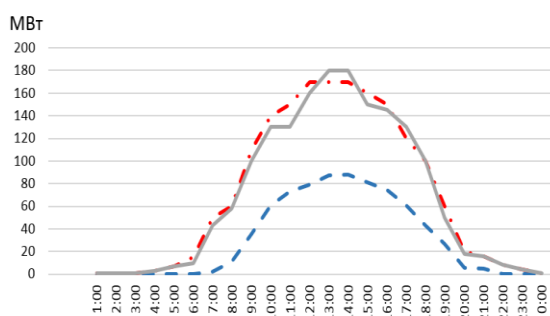


Рис. 3. Зависимость вырабатываемой мощности от спрогнозированной освещенности на сутки вперед (— — показана освещенность СЭС Перово; --- — показана выдаваемая мощность СЭС Перово, сплошной линией показана прогнозируемая освещенность СЭС Перово).

Данная проверка прогнозирования генерируемой мощности солнечной электростанцией на сутки вперед на примере модели солнечной батареи показала, что наиболее точного прогнозирования можно добиться при условии получения более точной зависимости выдаваемой мощности от освещенности. Соответственно наиболее сложным является прогнозирование на сутки вперед именно в межсезонье, когда преобладает неустойчивая погода с кратковременными осадками. Более тривиальным является прогнозирование

уровня освещенности на сутки вперед в ясный безоблачный день.

Выводы

Спрогнозировать уровень освещенности на сутки вперед позволяет комплекс АС «Метео», благодаря которому можно получить необходимые метеоданные для составления прогнозируемой освещенности на сутки вперед. Проанализировав зависимость между вырабатываемой мощностью и метеоусловиями на основе ортогонально дискретного вейвлет-преобразования временных рядов, удалось визуально установить взаимосвязь между составляющими вейвлет-разложения для временных рядов вырабатываемой мощности и основных метеофакторов, что позволит получить высокую точность на этапах краткосрочного прогнозирования.

Список литературы

1. Методы устранения негативного влияния на энергетические сети работы фотоэлектрических станций // Меджитов М.Р., Фролова А.Н., Кувшинов В.В., Касницкий А.Д., Жильцов А.С. / Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 1. С. 63-67.
2. Изучение оптимизации режимов работы солнечных электростанций в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя с возможностью регулирования частоты // Чернышов А.С., Гурьев В.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Олейников А.М. / Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 2. С. 138-147.
3. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы // Гурьев В.В., Кувшинов В.В., Якимович Б.А., Аль Баирмани А.Г., Какушина Е.Г. / Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 1. С. 108-117.
4. Влияние выработки генерации СЭС на выбор состава включенного генерирующего оборудования // Плетнева Е.В., Гурьев В.В., Кувшинов В.В., Косий А.Г., Коломийченко В.П. / Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 70-75.
5. Использование генерирующих установок на основе солнечных электростанций для обеспечения потребителей Крыма // Скрипник Е.М., Кувшинов В.В., Борисов Б.Е., Меджитов М.Р. / Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 4. С. 31-35.

References

1. Methods for eliminating the negative impact of photovoltaic power plants on energy networks //

- Medzhitov M.R., Frolova A.N., Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D., Zhiltsov A.S. / Power plants and technologies. 2023. Vol. 9. No. 1. P. 63-67.
2. Study of optimization of operating modes of solar power plants in the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol with the possibility of frequency regulation // Chernyshov A.S., Guryev V.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Oleynikov A.M. / Intelligent systems in production. 2022. Vol. 20. No. 2. P. 138-147.
 3. Study of steady-state modes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system // Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Al Bairmani A.G., Kakushina E.G. / Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. 2022. Vol. 25. No. 1. P. 108-117.
 4. The influence of solar power plant generation on the choice of the composition of the included generating equipment // Pletneva E.V., Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Kosiy A.G., Kolomiychenko V.P. / Power plants and technologies. 2024. Vol. 10. No. 2. Pp. 70-75.
 5. Use of generating units based on solar power plants to provide consumers in Crimea // Skripnik E.M., Kuvshinov V.V., Borisov B.E., Medzhitov M.R. / Power plants and technologies. 2023. Vol. 9. No. 4. P. 31-35.

УДК 681.78

Фотоэлектронный модуль с охлаждаемым сенсором для контроля интенсивности теплового излучения

Губарев Ф.А., Гончаров Р.Д., Чимириис Д.С., Давыдова Л.Ю.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299053, Россия, fagubarev@mail.sevsu.ru

Статья поступила 18.09.2025 г.; после доработки 19.09.2025г.

Аннотация

В статье рассматривается разработка и применение фотоэлектронного модуля с охлаждаемым сенсором, предназначенного для точного контроля интенсивности теплового излучения. В условиях современных технологий и растущих требований к мониторингу тепловых процессов, данный модуль представляет собой инновационное решение, обеспечивающее высокую чувствительность и стабильность измерений. Описание конструкции модуля включает в себя особенности охлаждения сенсора, что позволяет минимизировать шумовые помехи и повысить точность данных. Также в статье представлены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие эффективность работы устройства в различных температурных диапазонах и условиях. Обсуждаются потенциальные области применения модуля, включая промышленность, экологический мониторинг и медицинские технологии. Результаты работы подчеркивают значимость разработки для повышения качества и надежности измерений теплового излучения в научных и практических задачах.

Ключевые слова: фотоэлектронный модуль, интенсивность излучения, тепловые процессы, высокоэнергетические материалы

Photoelectronic module with a cooled sensor for monitoring the intensity of thermal radiation

Gubarev F.A., Goncharov R.D., Chimiris D.S., Davydova L.Y.

Sevastopol state university, Kurchatov st., Sevastopol, 299053, Russia, fagubarev@mail.sevsu.ru

Received 18.09.2025 y.; received in final form 19.09.2025 y.

Abstract

The article discusses the development and application of a photoelectronic module with a cooled sensor designed to accurately control the intensity of thermal radiation. In the context of modern technologies and growing requirements for monitoring thermal processes, this module is an innovative solution that ensures high sensitivity and stability of measurements. The module design description includes sensor cooling features, which minimizes noise interference and improves data accuracy. The article also presents the results of experimental studies demonstrating the effectiveness of the device in various temperature ranges and conditions. Potential applications of the module are discussed, including industry, environmental monitoring, and medical technology. The results of the work emphasize the importance of the development for improving the quality and reliability of measurements of thermal radiation in scientific and practical tasks.

Key words: photoelectric module, radiation intensity, thermal processes, high-energy materials

Введение

Процессы тепло- и массообмена являются сложными по характеру и динамике и представляют значительный интерес для исследований на основе комплексного сочетания различных методов их изучения. Одним из значимых параметров является тепловой эффект, соответствующий конкретной стадии или этапу теплового процесса [1].

Для его оценки используют различные методы, в том числе основанные на измерении яркости излучения. Этот метод относится к бесконтактным и позволяет определять тепловой эффект, а также оценивать температуру, в широком диапазоне. Исследование теплового эффекта является важным при исследовании высокотемпературных явлений, таких как горение высокоэнергетических материалов (ВЭМ). Их горение сопровождается значительным выделением теплоты и высокой яркостью излучения [2]. Процесс горения ВЭМ часто разделяется на этапы, протекание которых имеет свои особенности, в том числе различную интенсивность излучения [3].

Температура является величиной, которая характеризует уровень кинетической энергии движения атомов и молекул, из которых состоит тело. Тепловое движение в твердых телах порождает широкий спектр электромагнитных волн. Тепловое излучение нагретого тела содержит информацию о температуре данного тела и находится в оптическом диапазоне длин волн [4]. Температуры горения высокоэнергетических материалов на основе нано- и микропорошков алюминия достигают 3000 °C [2, 3]. Согласно закону Рэлея-Джинса, наибольшая спектральная яркость соответствует инфракрасному (ИК) диапазону длин волн. В связи с этим, для исследования яркости горения с использованием фотодиодов предпочтительно использовать фотодиоды ИК-диапазона.

Для регистрации фотонного излучения, такого как видимый свет, инфракрасное или ультрафиолетовое излучение, используются фотодиоды. Принцип работы фотодиода инфракрасного диапазона основан на внутреннем фотоэффекте в полупроводниковом р-п переходе. Этот эффект заключается в генерации пар «электрон-дырка» при поглощении фотонов света, в данном случае – фотонов ИК-излучения [5].

Исследование яркости свечения, как правило, применяется в сочетании с другими методами исследования. Например, в [6] изучались

спектры излучения горящих образцов нанопорошка алюминия, необлученного и облученного СВЧ-излучением, а также результаты визуализации поверхности образцов с использованием регистрации в собственном свете и скоростной регистрации с использованием лазерной системы с усилением яркости и скоростной видеокамеры. Исследование яркости являлось дополнительным методом, применение которого позволило расширить объем полученных данных в ходе эксперимента.

Данная статья посвящена конструированию фотоэлектронного модуля на основе фотодиода инфракрасного диапазона и его применению для исследования яркости тепловых процессов при горении ВЭМ.

Лабораторная установка

Основные задачи работы состояли в проведении экспериментальных испытаний лабораторной установки для фиксации инфракрасного излучения при горении ВЭМ, при подготовке которых необходимо было выполнить компоновку фотоэлектронного модуля на основе фотодетектора PD24-05-AMP-TEC с фотодиодом серии PD24, электрические подключения и обеспечение частоты прерывания сигнала в соответствии с техническими характеристиками фотодиода. В данной работе в качестве горючего вещества использовался нанопорошок алюминия, имеющий высокое тепловыделение и интенсивное излучение в инфракрасном диапазоне [7, 8]. Образцы массой 150 мг формовались в форме параллелепипеда размером 20×5×3 мм³.

Целью работы являлась разработка фотоэлектрического ИК-модуля и проверка его работы для оценки изменения яркости горения в режиме реального времени при исследовании горения тестовых объектов.

Лабораторная установка, представленная на рис.1, состоит из двух основных функциональных составляющих: лазер, инициирующий горение, и измерительная часть на основе разработанного фотоэлектрического модуля и осциллографа. В работе используется твердотельный лазер Oxlasers 1W 635 nm (модель OX-MD6351F) 1 для инициирования процесса горения образца 4. Световой поток лазера фокусируется линзой 3. Для ограничения воздействия лазера на объект (при необходимости) используется затвор 2. Подобные лазеры широко применяются в задачах лазерного инициирования горения [9].

Оценка характера изменения яркости свечения горящих образцов осуществляется разработанным фотодиодным модулем 6. Фотодетектор PD24-05-AMP-TEC предназначен для работы с модулированным сигналом с частотой более 150 Гц. Поэтому для корректной работы был сконструирован и изготовлен методом 3D-печати прерыватель 5, вращающийся с частотой 266 Гц, аналогичный описанному в работе [10].

На рисунке 2 показана фотография экспериментальной установки во время регистрации яркости излучения при горении восковой свечи и нанопорошка алюминия, размещенного на предметном столике, фотоэлектронный модуль и прерыватель закреплены на штативах.

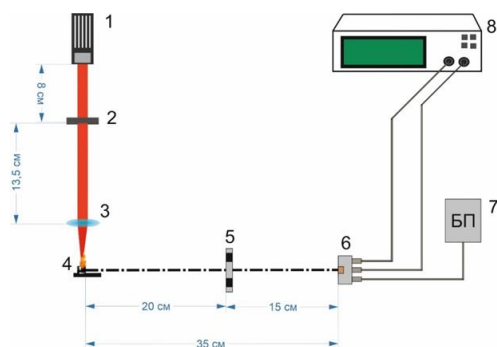


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования яркости горения: 1 – лазер (Oxlasers 1W 635 nm (модель OX-MD6351F)); 2 – механический затвор; 3 – линза; 4 – объект на предметном столике; 5 – прерыватель; 6 – фотодиодный модуль; 7 – блок питания (Delux ATX-350W P4, мощность: 350 Вт); 8 – цифровой осциллограф (OWON SDS7102V)

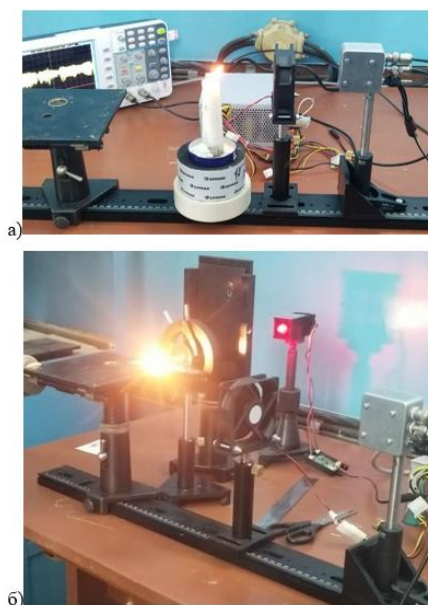


Рис. 2. Фото экспериментальной установки при горении восковой свечи (а) и образца ВЭМ (б)

Фотоэлектронный модуль

На рис. 3 приведена фотография внутреннего устройства разработанного нами фотоэлектронного модуля. В качестве корпуса использовалась стандартная алюминиевая коробка. Корпус имеет отверстие в области фотодетектора для прохождения света, разъем питания, разъемы выходных сигналов. Отвод тепла от фотодиода осуществлялся от теплоотводящего винта с помощью алюминиевой пластины на корпус. Отвод тепла от микросхем питания (линейные стабилизаторы напряжения LM7805 и AMS1084CM-3.3) также осуществлялся на корпус [11].



Рис. 3 . Фотография фотоэлектронного модуля

Основным конструктивным элементом модуля является фотодетектор PD24-05-AMP-TEC с охлаждаемым кристаллом фотодиода. Внешний вид фотодетектора представлен на рис. 4.



Рис. 4. Фотография фотодетектора PD24-05-AMP-TEC

Фотодетектор, кроме фотодиода, содержит предусилитель, термоэлектрический охладитель (ТЭМ) и термистор для контроля температуры. Для корректной работы фотоэлектрического модуля необходимо корректное подключение фотодетектора PD24-05-AMP-TEC в соответствии с функциональной схемой, представленной на

рис. 5. Диаметр светочувствительной области составляет 500 мкм. Быстрый отклик делает возможным не только исследовать относительно медленные процессы, но и принимать модулированное излучение лазерных диодов и светоизлучающих диодов.

Характеристики фотодиода с усилителем ТЕС 1МС06-018-08 приведены в таблице 1. Одной из важных характеристик приемников излучения является спектральная чувствительность [12]. Спектральный отклик в зависимости от температуры показан на рис. 6, максимум чувствительности приходится на длину волны 2,2 мкм.

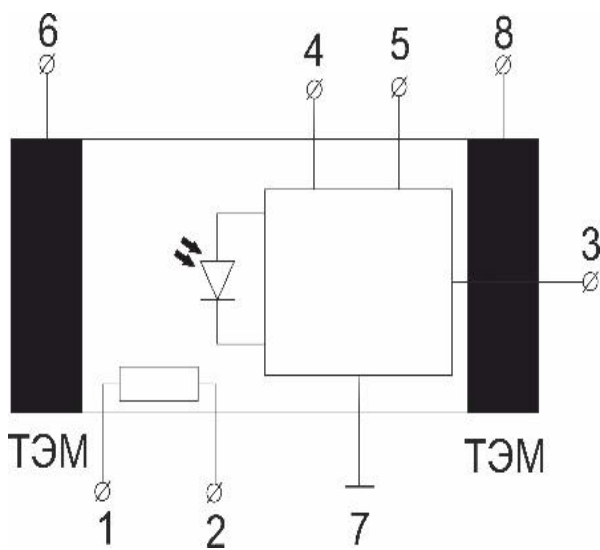


Рис. 5 Фотодетектор PD24-05-AMP-ТЕС. 1,2 – выводы термистора, 3 – выходной сигнал, 4 – питание (+5 В), 5 – питание (0 В), 6,8 – выводы термоэлектрического модуля (ТЭМ), 7 – общий вывод

Таблица 1. Характеристики фотодиода

Тип	Параметр	Значение	Ед. изм.
ТО – 8 ТЕС	Диаметр чувствительной зоны	0,5	мм
	Вес	4,0	г
	Рабочая температура	0... +30	°C
	Материал чувствительной зоны	Сапфировое стекло	
	Охлаждение	Одноступенчатое	
	Температура пайки	230	°C
	Температура хранения	– 20... +40	°C
	Размер	15,2	мм
		16	мм

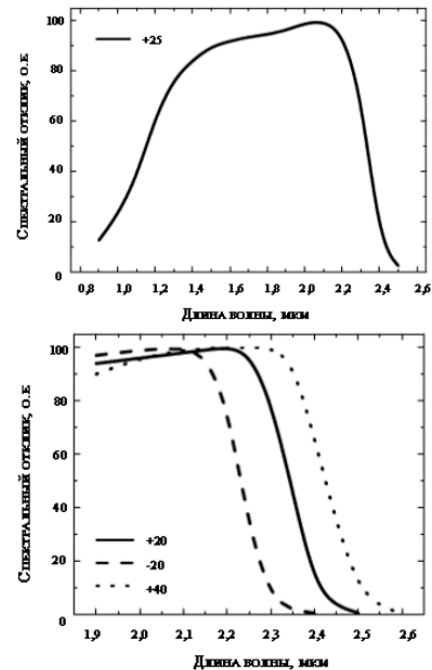


Рис. 6 . Спектральный отклик фотодиода усилителя ТЕС 1МС06-018-08

Температурный режим

В рамках данной работы была осуществлена сборка фотоэлектрического модуля на основе фотодиода с элементом Пельтье. Важным параметром работы установки является оптимальный температурный режим электронных устройств, в частности, фотоэлектрического модуля [13]. В данном случае контроль температурного нагрева фотодиодного элемента осуществлялся тепловизором модели Fluke TiS20+ согласно методическим рекомендациям [14]. На рис. 7 представлены изображения температурного поля фотодиодного модуля.

Из представленных данных следует, что в установившемся режиме средняя температура корпуса в области крепления фотодиода (выделена прямоугольником) повышается на 7,3°C после включения и составляет 31°C. При этом максимум температуры корпуса устанавливается в области микросхем питания (красная область HI на рис. 7(б)). Это означает, что температура задней стенки, на которую выведены радиаторы фотодиода и линейных стабилизаторов напряжения повышается не из-за фотодиода, а из-за нагрева элементов питания.

Следовательно, параметры температурного режима работы фотоэлектронного модуля и элементы устройства не подвергаются критическому перегреву.

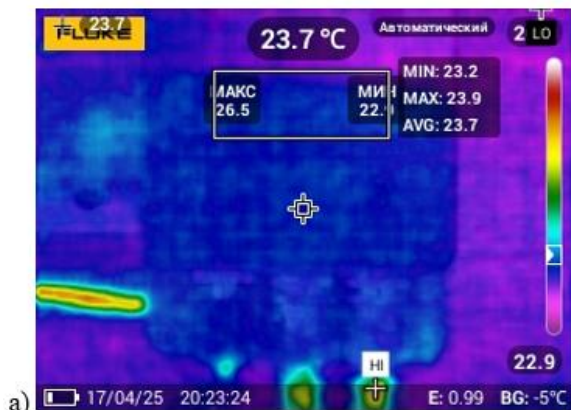


Рис. 7. Данные теплового контроля работы. а – распределение температуры корпуса сразу после включения, б – распределение температуры корпуса в установившемся режиме

Для регистрации выходного сигнала фотодетектора PD24-05-AMP-TEC в работе применялся цифровой осциллограф OWON SDS7102V с полосой пропускания 100 МГц и частотой дискретизации 1 Гвыб/с, оснащённый 7-дюймовым TFT-дисплеем с разрешением 800×480 пикселей [15]. Прибор предлагает широкий набор функций: FFT-анализ, математические операции с сигналами, курсорные измерения и автоматическую настройку. Точность данных показаний осциллографа зависит от прерываемого источника. На графике, представленном на рис. 8, изображено напряжение на термисторе.

По напряжению термистора (кривая 1 на рис. 8) рассчитана температура кристалла фотодиода, которая составляет +10°C, что соответствует требуемому режиму работы (от 0 до +30 °C). Таким образом, за счет отвода тепла термоэлектрическим модулем (элемент Пельтье) температура понижается примерно на 21°C. Исходя из этого, можно сделать вывод, что элемент Пельтье работает должным образом, обеспечивая оптимальный тепловой режим фотоэлектрического модуля.

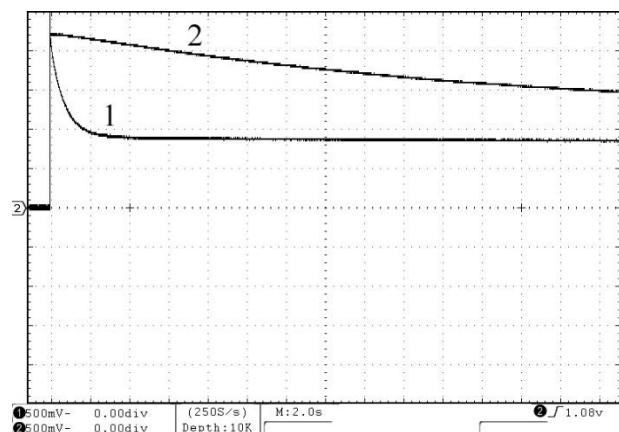


Рис. 8. Изменение значение напряжения термистора

Результаты эксперимента

Тестовые эксперименты по проверке работоспособности изготовленного модуля, т.е. его применимости для оценки изменения яркости горения в режиме реального времени, проводились с восковой свечей, поджигаемой открытым огнем, и образцами нанопорошка алюминия, поджигаемыми лазерным излучением. По результатам экспериментов были получены данные с осциллографа, представленные на рис. 9 и 10.

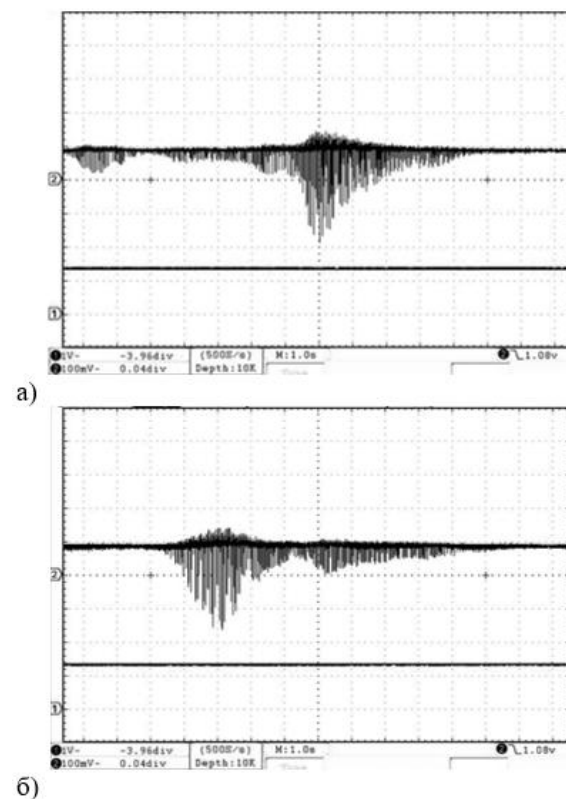


Рис. 9. Осциллограммы яркости горения восковой свечи в различных случаях.

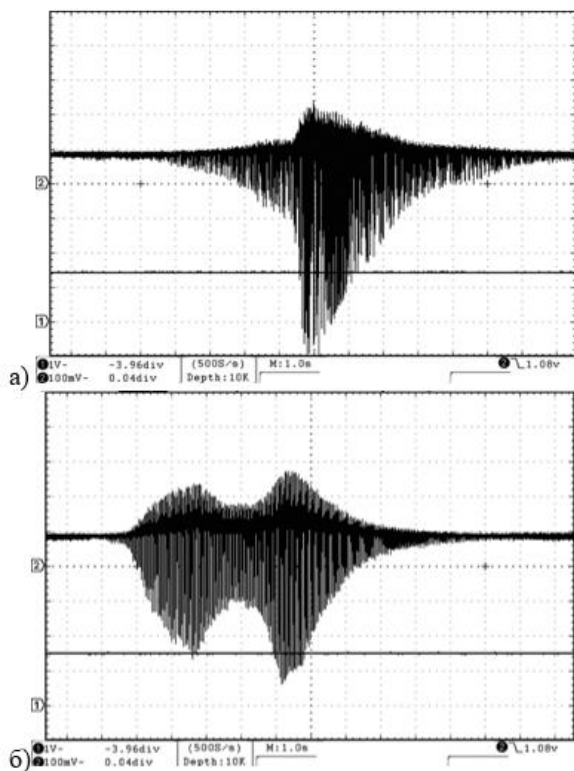


Рис. 10. Осциллограммы яркости горения различных образцов нанопорошка алюминия

Обсуждение результатов

Результаты экспериментальной части показали, что данная лабораторная установка демонстрирует динамику изменения яркости горения, как восковой свечи, так и ВЭМ (нанопорошка алюминия). Но для более точных значений экспериментов необходимо учесть несколько факторов. Во-первых, необходимо подобрать интервал между прорезями в пластине прерывателя и их ширину. В конструкции прерывателя в настоящий момент 8 отверстий с шириной 2 мм. Интервал можно увеличить путём увеличения геометрических параметров прорезей прерывателя. Определение оптимальной скорости вращения диска прерывателя является не менее актуальным вопросом для работы модуля. Также необходимо выбрать оптимальное расстояние, на котором установлен фотоэлектронный модуль для обеспечения максимальной эффективности преобразования. Это требует проведения дополнительных экспериментов с вариативностью расположения модуля и прерывателя относительно источника излучения.

Необходимо отметить, что согласно технической документации, фотодиод формирует инверсный сигнал, поэтому при анализе осциллограмм следует принимать во внимание нижнюю

огнивающую. Нижняя огнивающая осциллограммы соответствует изменению яркости свечения образцов. Как ожидалось, осциллограммы показывают различный характер горения образцов, что соответствует визуальному наблюдению. Значительный разброс в горении нанопорошка алюминия является нормальным, что отмечалось ранее в работе [6]. Такой вид графиков объясняется тем, что при горении одного и того же вещества каждый раз выделяется разное количество энергии и яркость излучения прямо пропорциональна тепловой энергии процесса горения.

Точность измерения зависит от протекания этапа инициирования горения. Направленное излучение иницирующего лазера нагревает только часть образца наноматериала (очаг воспламенения), увеличивая энергию реагентов. Экзотермическая реакция начинается во время окисления [16]. Энергия, высвобождаемая во время этой окислительной реакции, нагревает нанопорошок в составе образца, соседствующий с очагом воспламенения. Таким образом, реакция распространяется в пламени. Это развитие реакции проявляется как быстро движущийся фронт пламени с высокой интенсивностью излучения, который можно наблюдать визуально.

Значительное влияние на процесс воспламенения оказывает и структура самого образца. При формировании образцов возможно образование зон с различной плотностью и пористостью. В этом случае процесс горения может развиваться скачкообразно. В этом случае в процессе горения можно четко выделить фазы с разной скоростью изменения яркости. Первая медленная стадия представляет собой комбинацию двух видов распространения волны горения: по боковой поверхности с образованием горящего кольца и перемещением фронта горения вглубь образца. Постепенное разогревание нанопорошка внутри пробы приводит быстрому воспламенению, которое сопровождается резким увеличением яркости, которое соответствует осциллограммам на рис. 10. Это подтверждает, что горение переходит во вторую стадию, сопровождающуюся резким увеличением интенсивности свечения.

Для образцов с минимальной пористостью после прохождения первой стадии горения возникает состояние «депрессии» [17]. Медленное распространение фронта первой стадии горения вглубь образца, уменьшение интенсивности свечения образца (вплоть до полного затухания) свидетельствуют о торможении окисления алюминия. Это обусловлено затруднением доступа

воздуха. По мере накопления тепла за счет реакции окисления в локальной области начинается вторая стадия горения. При выходе системы из «депрессии» на поверхности образца появляется светящийся очаг, имеющий значительную яркость свечения.

Выводы

Входе опытно-конструкторской деятельности был разработан фотоэлектронный модуль с охлаждаемым сенсором для контроля интенсивности теплового излучения ИК-диапазона. С разработанным модулем были проведены испытания с тестовыми объектами, получены осциллограммы процессов, характеризующие яркость горения. Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанной схемы на основе фотодиода для контроля интенсивности теплового излучения.

Перспективным представляется реализация комплексного исследования яркости горения различных по своему химическому составу и свойствам горючих веществ для получения более полной картины статистических данных для последующего использования в расчетах и анализе физики процессов горения.

Список литературы

1. Долгачева, Л.О. Анализ методов исследования температурного поля и процесса теплообмена / Л. О. Долгачева, В. А. Глушков // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства : сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции, Ижевск, 22–24 ноября 2017 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2018. – С. 63–68. – EDN YVDHNR.
2. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П., Попенко Е.М., Коротких А.Г., Архипов В.А., Дитц А.А., Строкова Ю.И., Толбанова Л.О. Горение нанопорошков металлов – Томск.: Дельтаплан, 2008. – 382 с.
3. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Коршунов А.В., Роот Л.О. Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. Учебное пособие. – Томск, ТПУ, 2012. – 196 с.
4. Зинин, П. В. Мультиспектральные изображения при измерении распределения температуры / П. В. Зинин, И. В. Малыхина // Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем : Труды Международной научно-технической конференции, Москва, 23 июня 2023 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. – С. 144–145. – EDN UXRF0B.
5. Стафеев, В.И. Инжекционные фотодиоды / В. И. Стафеев // Прикладная физика. – 2007. – № 2. – С. 82–86. – EDN KVWLCX.
6. Губарев Ф.А., Мостовщиков А.В., Ли Л., Ильин А.П. Применение оптических систем скоростной визуализации для исследования СВЧ-активированных и облученных рентгеновским излучением нанопорошков алюминия // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2019) : Тезисы докладов 29-ой Международной Крымской конференции, Севастополь, Крым, 08–14 сентября 2019 года. – Севастополь, Крым: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2019. – С. 155–156. – EDN PQWRJX.
7. Салимгареева, К.Р. Способ модификации нанопорошков алюминия / К. Р. Салимгареева // Яковлевские чтения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Лениногорск, 31 марта 2023 года / Под редакцией Р.А. Шамсутдинова, А.В. Гумерова, О.Л. Даниловой. – Сакнт-Петербург: ООО "Скифия-принт", 2023. – С. 77–81. – EDN MEGOWM.
8. Крушенко, Г.Г. Нанопорошковый алюминий – высокоэнергетическое топливо для двигательных установок / Г. Г. Крушенко // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы VIII Всероссийской научной конференции, посвященной памяти главного конструктора ПО "Полёт" А.С. Клинышкова, Омск, 03–04 октября 2013 года / редколлегия: В.Н. Блинов, О.И. Бабенко, И.М. Чумаченко. – Омск: Омский государственный технический университет, 2013. – С. 96–100. – EDN RWJBIR.
9. Акинин Н.И. Воспламенение пиротехнических составов непрерывными лазерами ближнего ИК диапазона / Н. И. Акинин, В. И. Колесов, Н. В. Юдин [и др.] // Взрывное дело. – 2017. – № 118–75. – С. 81–90. – EDN YNWUHK.
10. Kenji Ito, Francis Penent, Yasumasa Hikosaka, Eiji Shigemasa, Isao H. Suzuki, John H. D.

Eland, Pascal Lablanquie; Application of a simple asynchronous mechanical light chopper to multielectron coincidence spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.* 1 December 2009; 80 (12): 123101. <https://doi.org/10.1063/1.3258200>

11. Мухамадиев, А.А. Методика проектирования узла фотоприемника акустооптического пирометра / А. А. Мухамадиев, Л. С. Тарасенко // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 79-84. – EDN ZHLGKZ.
12. Бакуменко В.П. Методика измерений относительной спектральной чувствительности образцового приемника излучения / В. П. Бакуменко, В. П. Бегучев, А. С. Брюхов [и др.] // *Прикладная физика*. – 2006. – № 5. – С. 90-92. – EDN KVVWKDD.
13. Фам, В.Т. Исследование теплового режима фотоэлектрического модуля с охлаждением щелевым радиатором / В. Т. Фам, В. В. Сускин // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. – 2018. – № 66-1. – С. 124-129. – DOI 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-124-129. – EDN YQOAJN.
14. Губарев Ф.А. Приборы и методы исследования теплофизических процессов. Учебное пособие. – Севастополь: СевГУ, 2025. – 183 с.
15. OWON SDS7102V Digital Oscilloscope <https://www.owon.com.hk>
16. Гришин Л.И. Характеристики лазерного инициирования и горения нанотермитов на основе алюминия / Л. И. Гришин, А. Ю. Долгобородов, В. Г. Кириленко, М. А. Бражников // *Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛАПЛАЗ-2020: Сборник научных трудов VI Международной конференции, Москва, 11–14 февраля 2020 года. Том Часть 1*. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2020. – С. 392-393. – EDN KLUJXV.
17. Попенко Е.М. Горение пористых образцов нанопорошка алюминия в воздухе при атмосферном давлении / Е. М. Попенко, А. А. Громов, К. А. Моногаров [и др.] // *Горение и взрыв*. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 270-275. – EDN VQZWWN.

References

1. Dolgacheva, L.O. Analysis of methods for studying the temperature field and the heat exchange process / L. O. Dolgacheva, V. A. Glushkov // *Instrument Engineering in the 21st Century – 2017. Integration of Science, Education, and Production : Collection of Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference, Izhevsk, November 22–24, 2017*. – Izhevsk: Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, 2018. – Pp. 63-68. – EDN YVDHNR.
2. Gromov A.A., Khabas T.A., Ilyin A.P., Popenko E.M., Korotkikh A.G., Arkhipov V.A., Ditz A.A., Strokova Yu.I., Tolbanova L.O. *Combustion of Metal Nanopowders*. Tomsk: Deltplan, 2008. 382 p.
3. Ilyin A.P., Nazarenko O.B., Korshunov A.V., Root L.O. *Features of the physical and chemical properties of nanopowders and nanomaterials. Textbook*. – Tomsk, TPU, 2012. – 196 p.
4. Zinin, P. V. Multispectral images in measuring the distribution of temperature / P. V. Zinin, I. V. Malykhina // *Modern technologies of scientific instrumentation and information and measurement systems : Proceedings of the International Conference*.
5. Stafeev, V.I. *Injection Photodiodes* / V. I. Stafeev // *Applied Physics*. – 2007. – No. 2. – Pp. 82-86. – EDN KVVLCX.
6. Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Li L., and Ilyin A.P. Application of Optical Systems for High-Speed Imaging to Study Microwave-Activated and X-Ray-Irradiated Aluminum Nanopowders. In: *Proceedings of the 29th International Crimean Conference on Microwave Engineering and Telecommunications (KryMiKo'2019), Sevastopol, Crimea, September 8-14, 2019*. – Sevastopol, Crimea: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 2019. – Pp. 155-156. – EDN PQWRJX.
7. Salimgareeva, K.R. The method of modification of aluminum nanopowders / K. R. Salimgareeva // *Yakovlevskie chteniya: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Leninogorsk, March 31, 2023* / Edited by R.A. Shamsutdinov, A.V. Gumerov, and O.L. Danilova. – Saint Petersburg: Skifia-Print LLC, 2023. – Pp. 77-81. – EDN MEGOWM.
8. Krushenko, G.G. Nanopowder Aluminum – Highly Energetic Fuel for Propulsion Systems / G.G. Krushenko // *Problems of Development, Manufacture and Operation of Rocket and Space Technology and Training of Engineering Personnel for the Aerospace Industry: Materials of the VIII All-Russian Scientific Conference Dedicated to the Memory of the Chief Designer of the Flight Production Association, A.S. Klinyshkov, Omsk, October 3–4, 2013* / Editorial Board: V.N. Blinov, O.I. Babenko, I.M. Chumachenko. – Omsk: Omsk State Technical University, 2013. – Pp. 96-100. – EDN RWJBIR.
9. Akinin, N. I. Ignition of pyrotechnic compositions by continuous near-infrared lasers / N. I. Akinin, V. I. Kolesov, N. V. Yudin [et al.] // *Explosives*. – 2017. – No. 118-75. – Pp. 81-90. – EDN YNWUHK.
10. Kenji Ito, Francis Penent, Yasumasa Hikosaka, Eiji Shigemasa, Isao H. Suzuki, John H. D. Eland, Pascal

- Lablanquie; Application of a simple asynchronous mechanical light chopper to multielectron coincidence spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.* 1 December 2009; 80 (12): 123101. <https://doi.org/10.1063/1.3258200>
11. Mukhamadiev, A.A. Methodology for Designing an Acoustic-Optical Pyrometer Photodetector Unit / A. A. Mukhamadiev, L. S. Tarasenko // *Electrical and Information Complexes and Systems*. – 2017. – Vol. 13, No. 2. – Pp. 79-84. – EDN ZHLGKZ.
 12. Bakumenko V.P. Method of measuring the relative spectral sensitivity of an exemplary radiation receiver / V. P. Bakumenko, V. P. Beguchev, A. S. Bryukhov [et al.] // *Applied Physics*. – 2006. – No. 5. – pp. 90-92. – EDN KVKWDD.
 13. Fam, V.T. Investigation of the Thermal Mode of a Photovoltaic Module with Cooling by a Slotted Radiator / V. T. Fam, V. V. Suskin // *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. – 2018. – No. 66-1. – Pp. 124-129. – DOI 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-124-129. – EDN YQOAJN.
 14. Gubarev F.A. *Devices and Methods of Researching Thermophysical Processes. Study Guide*. – Sevastopol: SevGU, 2025. – 183 p.
 15. OWON SDS7102V Digital Oscilloscope <https://www.owon.com.hk>
 16. Grishin, L. I. Characteristics of Laser Initiation and Combustion of Aluminum-Based Nanothermites / L. I. Grishin, A. Yu. Dolgorodov, V. G. Kirilenko, and M. A. Brazhnikov // *Laser, Plasma Research, and Technology - LAPLAZ-2020: Proceedings of the 6th International Conference, Moscow, February 11-14, 2020. Volume Part 1*. – Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2020. – Pp. 392-393. – EDN KLUJXV.
 17. Popenko, E. M. Combustion of Porous Samples of Aluminum Nanopowder in Air at Atmospheric Pressure / E. M. Popenko, A. A. Gromov, K. A. Monogarov [et al.] // *Combustion and Explosion*. – 2015. – Vol. 8, No. 2. – Pp. 270-275. – EDN VQZWWN.

УДК 621.311.26 504.064.36 681.518.5

Системы экологического мониторинга как инструмент повышения эффективности энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии

А.О. Егорова¹, Б.А. Якимович², Р.А. Нашев², А.А. Шевчук², И.Д. Артёменко²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, aokalita@sevsu.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 30.09.2025 г.; после доработки 02.10.2025 г.

Аннотация

В статье рассматривается концепция распределённой энергетики и роль систем мониторинга окружающей среды в оптимизации работы возобновляемых источников энергии. Описаны основные компоненты системы мониторинга: датчики, алгоритмы анализа и программное обеспечение. Подчёркивается важность интеграции систем экологического мониторинга для повышения эффективности и надёжности функционирования ВИЭ, а также снижения экологического воздействия. Отмечается роль искусственного интеллекта и компьютерного зрения в предиктивном обслуживании оборудования и точном прогнозировании выработки энергии.

Ключевые слова: энергообеспечение, распределённая энергетика, возобновляемые источники энергии, мониторинг окружающей среды, интеллектуальная обработка данных, экологическая безопасность.

Environmental monitoring systems as a tool for improving the efficiency of energy supply based on renewable energy sources

А.О. Egorova¹, B.A. Yakimovich², R.A. Nashev², A.A. Shevchuk², I.D. Artemenko²¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia, aokalita@sevsu.ru² Sevastopol State University", 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia

Received 30.09.2025 y.; received in final form 02.10.2025 y.

Abstract

This article examines the concept of distributed energy and the role of environmental monitoring systems in optimizing the operation of renewable energy sources. The main components of a monitoring system are described: sensors, analysis algorithms, and software. The importance of integrating environmental monitoring systems to improve the efficiency and reliability of renewable energy sources and reduce environmental impact is emphasized. The role of artificial intelligence and computer vision in predictive equipment maintenance and accurate energy generation forecasting is highlighted.

Keywords: energy supply, distributed energy, renewable energy sources, environmental monitoring, intelligent data processing, environmental safety.

Введение

Процесс управления техническими системами должен отвечать критериям оптимальности и эффективности [1]. Такие же принципы применяются и в энергетике, где это приводит к

развитию распределённой энергетики. Она представляет собой концепцию, при которой производство электроэнергии осуществляется исходя из потребностей локальных потребителей вблизи от них с целью повышения эффективности и надёжности системы [2].

Распределенная энергетика основана на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечная, ветровая, гидроэнергия и биомасса. Эти источники энергии имеют ряд преимуществ, включая экологическую чистоту, возобновляемость и возможность локального использования. Однако для эффективного функционирования таких систем необходимо иметь достоверные данные о состоянии окружающей среды, в которой они будут работать. Именно здесь на первый план выходят системы экологического мониторинга, которые играют ключевую роль в поддержании оптимальных условий для работы энергоустановок и повышении общей эффективности системы энергообеспечения.

Для эффективных распределенных систем электроснабжения необходимы точные данные об окружающей среде. Экологический мониторинг оптимизирует работу возобновляемых источников энергии. Современные технологии управляют энергосистемами на основе анализа окружающей среды и состояния оборудования.

Основные компоненты и принцип функционирования системы мониторинга

Для сбора, анализа и систематизации данных о состоянии окружающей среды необходима система мониторинга (рис. 1). Система мониторинга должна удовлетворять параметрам, предложенным в универсальной онтологической системе мониторинга [3].

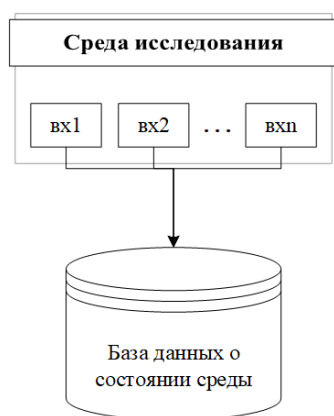


Рис. 1. Общая схема мониторинга окружающей среды

Размещённые в среде исследования датчики состояния среды (вх1, вх2, ..., вхп) формируют картину исходных данных для принятия решения о составе и содержании энергетических

установок, размещаемых в среде исследования (рис. 2).

На основании полученных данных создаётся система энергообеспечения, в которой для каждого объекта подобрана оптимальная комбинация энергоустановок, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [4-6]. Такая схема применения позволяет повысить эффективность использования энергоустановок на основе ВИЭ с учётом особенностей местности (климатических, экологических, географических, инфраструктурных и т. д.).

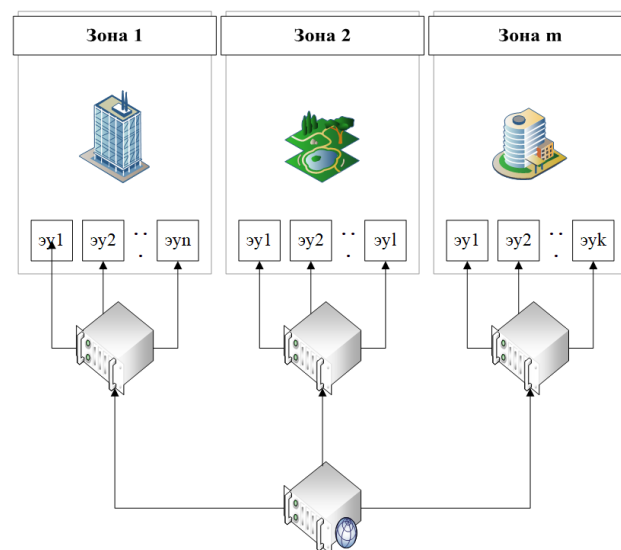


Рис. 2. Общая схема распределённой энергетической системы

При интеграции системы мониторинга окружающей среды и системы управления энергообеспечением (рис. 3), используя технологию интеллектуальной обработки данных с прогнозированием состояния подсистем (зона, среда исследования), формируется эффективная распределённая система энергоснабжения. На рисунке 3 предлагается рассматривать каждую зону как отдельную подсистему с уникальными характеристиками, но взаимосвязанных с другими подсистемами. Информация о состоянии среды из каждой зоны исследования направляется на сервер баз данных для сбора, хранения, обработки и систематизации данных, которые затем используются для сервера интеллектуальной обработки. Обмен данными между этими серверами происходит непрерывно в режиме реального времени. Сервер интеллектуальной обработки анализирует данные и формирует прогностическую модель состояния зон.

Система мониторинга окружающей среды для распределенных энергетических систем

включает в себя несколько ключевых компонентов:

1. Датчики – устанавливаются на оборудование для измерения параметров окружающей среды, таких как температура, влажность, скорость ветра, уровень освещенности и другие. Датчики обеспечивают сбор исходных данных, которые затем используются для анализа и принятия решений.
2. Алгоритмы анализа – обрабатывают собранные данные, выявляют закономерности и прогнозируют поведение системы. Алгоритмы анализа могут быть основаны на методах машинного обучения, статистического анализа и других современных подходах.
3. Программное обеспечение – позволяет визуализировать результаты мониторинга, управлять системой и принимать оперативные решения. Программное обеспечение также обеспечивает интеграцию с другими системами, такими как серверы баз данных и системы интеллектуальной обработки данных.

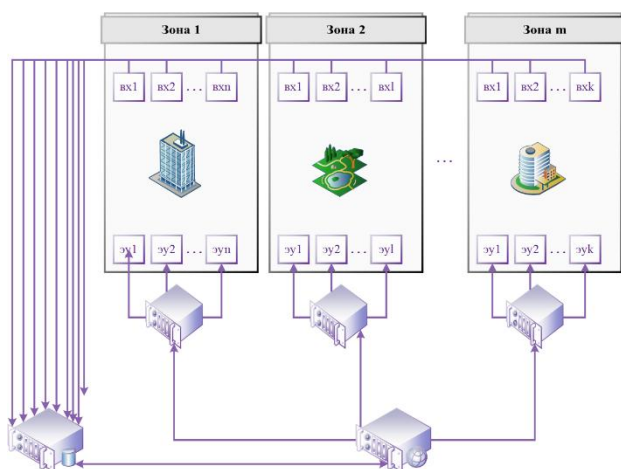


Рис. 3. Общая схема распределённой энергетической системы, функционирующей на основе системы мониторинга

Процесс работы системы мониторинга можно разделить на несколько этапов:

1. Сбор данных. На данном этапе датчики, размещенные в различных зонах исследования, непрерывно собирают данные о состоянии окружающей среды. Эти данные могут включать как параметры, непосредственно влияющие на работу энергоустановок (например, температура и влажность), так и более общие характеристики (например,

уровень загрязнения воздуха).

2. На этапе анализа полученные данные передаются на сервер баз данных, где они хранятся и обрабатываются. На основе этих данных алгоритмы анализа выявляют закономерности и тренды, которые могут быть использованы для прогнозирования работы системы.
3. На этапе прогнозирования и принятия решений сервер интеллектуальной обработки данных на основе собранных и проанализированных данных формирует прогностические модели, которые позволяют предсказать состояние системы в будущем. Эти модели используются для принятия решений о составе и параметрах энергоустановок, а также для оптимизации работы системы в целом.
4. Визуализация и управление. На этом этапе результаты мониторинга и анализа визуализируются с помощью программного обеспечения, что позволяет операторам системы в реальном времени отслеживать состояние системы и принимать оперативные решения.

Системы экологического мониторинга играют важную роль в устойчивом и эффективном функционировании распределенных энергетических систем. Они позволяют повысить эффективность работы энергоустановок за счет достоверных данных о состоянии окружающей среды, что способствует оптимизации всей системы энергообеспечения. Предиктивное обслуживание, основанное на этих данных, снижает вероятность аварийных ситуаций и затраты на ремонт и обслуживание оборудования. Минимизация негативного воздействия на окружающую среду также является важным аспектом, который обеспечивается системами экологического мониторинга, что соответствует принципам устойчивого развития. Кроме того, непрерывный контроль за параметрами окружающей среды гарантирует соответствие производственной деятельности нормативным требованиям и стандартам экологической безопасности.

Современные тенденции в области технологического развития открывают новые горизонты для повышения эффективности и надежности функционирования распределенных энергетических систем. Среди таких технологий можно выделить:

1. Искусственный интеллект (ИИ) позволяет осуществлять более точный анализ данных, выявлять скрытые закономерности и прогно-

зировать поведение системы с высокой точностью. Это способствует оптимизации работы энергоустановок и снижению эксплуатационных затрат.

2. Технологии компьютерного зрения используются для мониторинга состояния оборудования и окружающей среды, что позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы и предотвращать аварийные ситуации.
3. Интернет вещей (IoT-устройства) позволяют собирать данные с различных источников и интегрировать их в единую систему мониторинга, что обеспечивает более полное и точное представление о состоянии окружающей среды.

Системы экологического мониторинга играют важную роль в распределенных энергетических системах, оптимизируя их работу и повышая эффективность. В солнечных электростанциях они отслеживают состояние панелей, уровень инсоляции и другие параметры, что позволяет оптимизировать выработку энергии. Ветровые электростанции используют мониторинг для оптимизации работы турбин в зависимости от погоды, снижая затраты и увеличивая выработку. Гидроэлектростанции контролируют уровень воды, температуру и другие параметры, предотвращая аварии и оптимизируя работу.

Заключение

Системы экологического мониторинга играют важную роль в современных энергетических инфраструктурах, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Их интеграция в производственные процессы позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики, но и снизить экологическое воздействие, что является ключевым элементом устойчивого развития энергетического сектора. Эти системы обеспечивают постоянный контроль за параметрами окружающей среды, гарантируя соответствие производственной деятельности действующим нормативным требованиям и стандартам экологической безопасности.

Достижения в области технологий, такие как искусственный интеллект (ИИ) и компьютерное зрение, открывают новые возможности для повышения эффективности и надежности работы ВИЭ. Внедрение этих инноваций позволяет осуществлять предиктивное обслуживание оборудования, что снижает риск аварийных ситуаций и оптимизирует эксплуатационные расходы. Кроме того, технологии ИИ и компьютерного

зрения обеспечивают более точное прогнозирование выработки энергии, что способствует повышению общей эффективности энергетических систем.

Таким образом, интеграция систем экологического мониторинга с передовыми технологиями на основе ИИ и компьютерного зрения является важным шагом к созданию устойчивых и экологически чистых энергетических систем, отвечающих современным требованиям к эффективности и надежности.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2021 г. № 3496-р «О стратегическом направлении цифровой трансформации отрасли экологии и природопользования».
2. Распределённая энергетика. Характеристики, особенности, преимущества. URL: <https://aggreko-eurasia.ru/about/news/raspredelyennaya-energetika/>
3. Егоркин, А. А. Универсальная онтологическая модель системы мониторинга окружающей среды / А. А. Егоркин, С. Ю. Самойлов, В. П. Евстигнеев // Системы контроля окружающей среды. – 2024. – № 3(57). – С. 33-46.
4. Дзюба, А. П. Совершенствование управления энергоснабжением промышленных предприятий в условиях развития систем распределенной генерации / А. П. Дзюба, А. В. Семиколенов // Экономический вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2022. – № 2(14). – С. 49-63.
5. Ибраева, Л. К. Разработка и исследование распределенной системы энергоснабжения на базе возобновляемых источников энергии / Л. К. Ибраева, Е. О. Карташов // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2020. – № 2(49). – С. 48-56.
6. Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электро-технического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated 08.12.2021 No. 3496-r "On the strategic direction of digital transformation of the ecology and nature management industry".
2. Distributed energy. Characteristics, features, advantages. URL: <https://aggreko-eurasia.ru/about/news/raspredelyennaya-energetika/>
3. Egorkin, A. A. Universal ontological model of the environmental monitoring system / A. A. Egorkin,

- S. Y. Samoilov, V. P. Evstigneev // Environmental control systems. – 2024. – № 3(57). – Pp. 33-46.
4. Dzyuba, A. P. Improvement of energy supply management of industrial enterprises in the context of the development of distributed generation systems / A. P. Dzyuba, A.V. Semikolenov // Economic Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management. – 2022. – № 2(14). – Pp. 49-63.
 5. Ibraeva, L. K. Development and research of a distributed energy supply system based on renewable energy sources / L. K. Ibraeva, E. O. Kartashov // Bulletin of the Almaty University of Energy and Communications. – 2020. – № 2(49). – Pp. 48-56.
 6. Shpenst V.A., Belsky A.A., Orel E.A. Improving the energy efficiency of an autonomous electrical complex with renewable energy sources based on adaptive adjustment of operating modes // Notes of the Mining Institute. 2023. Vol. 261. pp. 479-492.

УДК 629.12, 620.92

Морская энергетическая установка на водородных топливных элементах

А.С. Жильцов¹, Л.Ю. Юферов¹, В.В. Кувшинов¹,
А.Д. Касницкий¹, А.С. Владимиров¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь,
299053, Россия, 29novel@gmail.com

Статья поступила 08.10.2025 г.; после доработки 10.10.2025 г.

Аннотация

Автономная морская платформа, использует для питания двигателей энергетическую установку на водородном топливе. Разработанная автономная система электроснабжения, предназначенная для резервного питания судового оборудования, позволяет увеличить эффективность использования энергии и повысить экономическую составляющую представленной системы.

Ключевые слова: водородная энергетика, роботизированная морская платформа, топливный элемент, система автоматического управления, возобновляемая энергетика.

Hydrogen fuel cell marine propulsion system

A.S. Zhiltsov, L.Y. Yuferev, V.V. Kuvshinov, A.D. Kasnitsky, A.S. Vladimirov
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, 29novel@gmail.com

Received 08.10.2025 y.; received in final form 10.10.2025 y

Abstract

An autonomous offshore platform uses a hydrogen-fueled power plant to power its engines. The developed autonomous power supply system, designed to provide backup power for the ship's equipment, improves energy efficiency and enhances the economics of the system.

Key words: hydrogen energy, robotic marine platform, fuel cell, automatic control system, renewable energy.

Введение

Использование экологически чистой энергии для морского транспорта позволяет увеличить привлекательность для туристов и увеличивать мощностные характеристики энергосистемы без использования органических топлив, которые необходимо запастись на судах в значительных количествах. Для повышения генерации энергии и мощностных характеристик установки в данной работе была предложена система водородных топливных элементов и система накопления энергии [1]. Судовые системы потребляют значительную электрическую нагрузку, превышающую возможности ёмкостных накопителей

энергии малой и средней мощности [2], в случае, если система нагрузки рассчитана на большое количество электроприборов, необходимо создание большого количества накопителей энергии. Для сокращения количества ёмкостных аккумуляторных батарей и была предложена система водородной генерации, где основной запас энергии создаётся за счёт более эффективного источника – водорода.

Принципиальной особенностью создания энергоустановок с топливными элементами является их модульность - набор мощности осуществляется из большого числа однотипных элементов. Элементарной ячейкой являются еди-

ничные топливные элементы небольшой мощности, которые собираются в батареи. Последние объединяются в модули, из которых собираются энергоустановки и затем, если нужно, электростанции любой мощности.

Технологическая схема энергоустановки с топливными элементами очень простая в анодное пространство батареи топливных элементов подается топливо (водородосодержащее сырье), в катодное – воздух (кислород). Применение топливных элементов в сочетании с аккумуляторами помогает оптимизировать энергосистему, обеспечивая при этом оптимальный срок эксплуатации и производительность топливных элементов [3]. Таким образом, батареи и топливные элементы прекрасно дополняют друг друга.

Постановка задачи и цели исследования

Для качественной работы основного и вспомогательного судового оборудования при различных условиях и длительных промежутках времени без захода в порты, авторами предложены системы энергогенерации с водородными накопителями энергии. Такие системы можно назвать резервными источниками энергии, которые могут использоваться для обеспечения различных нужд морского транспорта [4]. Комбинированные системы питания и накопления энергии, предложенные авторами в работе, используются в комбинации с энергоустановками на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Задача реализовывалась на примере обеспечения электроэнергией судовой электросистемы малой мощности с помощью автономной комбинированной станции. Для расчета количества используемых генерирующих систем учитывались такие факторы, как средний объем электропотребления, вид используемых батарей и т. д. Выбираемая мощность генератора полностью зависит от размера и качества используемого топлива [5], преимущество такого устройства в его полной безопасности для внешней среды. Чтобы произвести расчет оборудования для энергосистемы нужно вычислить все источники потребления электроэнергии, время их работы и общую мощность.

Использование таких установок может быть эффективно как для судового электрооборудования, так и для припортовых сооружений. Целью работы было использование предложенных систем в судовых энергокомплексах.

Результаты исследований

Предложенная комбинированная автономная система электроснабжения, подключенная к потребителю электроэнергии на судне, содержит водородный источник генерации электроэнергии (топливный элемент), накопитель энергии в составе электрохимического генератора на основе топливных элементов и баллон с метилциклогексаном [6]. В работе была разработана гибридная установка с топливными элементами и накопителем энергии в виде метилциклогексана (МЦД), проведены в натурных условиях экспериментальные исследования энергетических характеристик всей гибридной системы [1-4]. Ёмкость с МЦД используется для извлечения водорода с последующей генерацией электрической энергии топливными элементами. На рисунке 1 представлен внешний вид энергетической установки. В ней используются литий-ионные аккумуляторы, реактор-дегидратор и непосредственно топливные элементы. Для хранения топлива применяется ёмкость с метилциклогексаном, объём которой составляет 60 л.

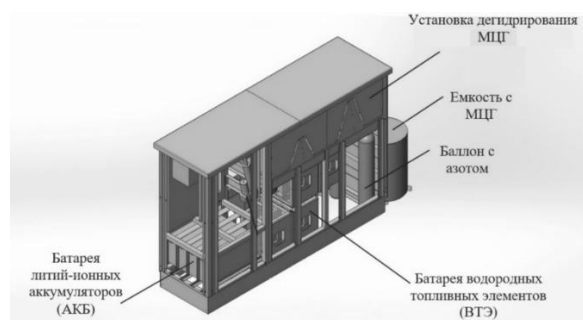


Рис. 1. Энергетическая установка на топливных элементах

Предложенная судовая энергетическая установка была размещена на морской автономной платформе (рис. 2). Беспилотная роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных топливных элементах является экспериментальным водным транспортным средством с экологически чистой безопасной энергетической установкой нового поколения на водородных топливных элементах. В отличие от других энергетических установок, работающих на водородных топливных элементах её принцип работы, основывается на преобразовании химической энергии водорода в топливном элементе, полученным в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода непосредственно на борту

судна.

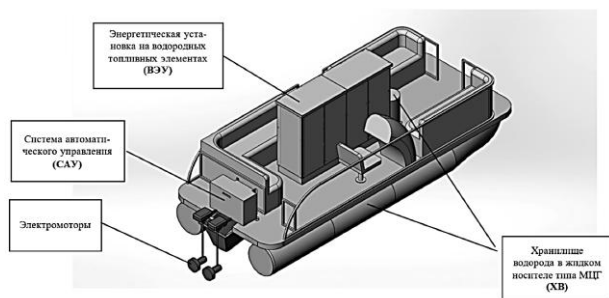


Рис. 2. Морская автоматизированная платформа на водородном топливе

В ходе испытаний протестирован режим беспилотного (дистанционного) управления по каналам спутниковой навигации мобильных каналов связи и видеоконтроля в реальных водных условиях. Беспилотная морская платформа с дистанционным управлением может использо-

ваться для мониторинга окружающей обстановки в прибрежных зонах озёр и морей, а также может использоваться как рабочий или туристический катер.

Электрическая схема энергетической судовой системы представлена на рисунке 3. Электропитание оборудования осуществляется от буферной литий-ионной аккумуляторной батареи (АКБ) непосредственно или через инвертор (И2). Автоматическая подзарядка аккумуляторов осуществляется через зарядное устройство (ЗУ) и инвертор (И1) от водородной энергетической установки (ЭУ), состоящей из батареи водородных топливных элементов (ВТЭ) и дегидрататора (ДГ). Весь газообразный водород, который образуется в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода, находящегося в хранилище (ХВ), полностью перерабатывается в водородной энергетической установке без промежуточного хранения.

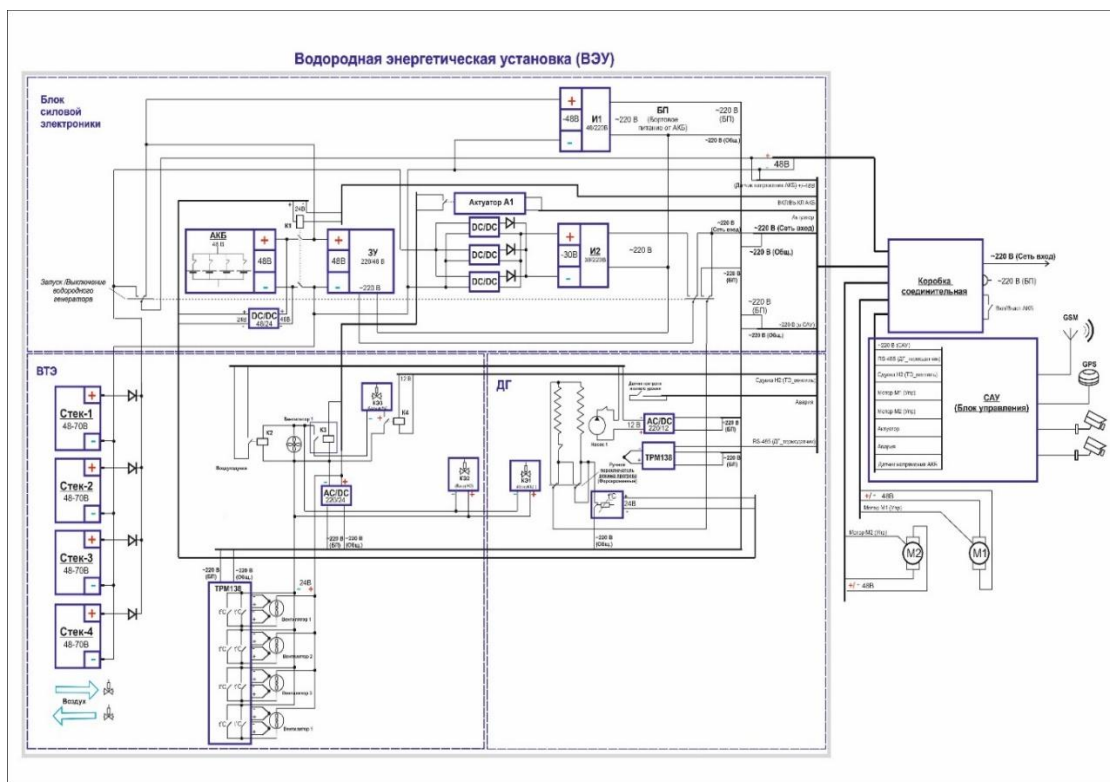


Рис. 3. Электрическая схема энергетической системы морской платформы

Электропитание оборудования осуществляется от буферной литий-ионной АКБ непосредственно или через инвертор И2. Автоматическая подзарядка АКБ осуществляется через ЗУ и инвертор И1 от водородной ЭУ, состоящей из батареи ВТЭ и дегидрататора (ДГ). Весь газообразный

водород, который образуется в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода, находящегося в хранилище (ХВ), полностью перерабатывается в водородной энергетической установке без промежуточного хранения.

На рисунке 4 представлена блок-схема электрических соединений энергетической системы.

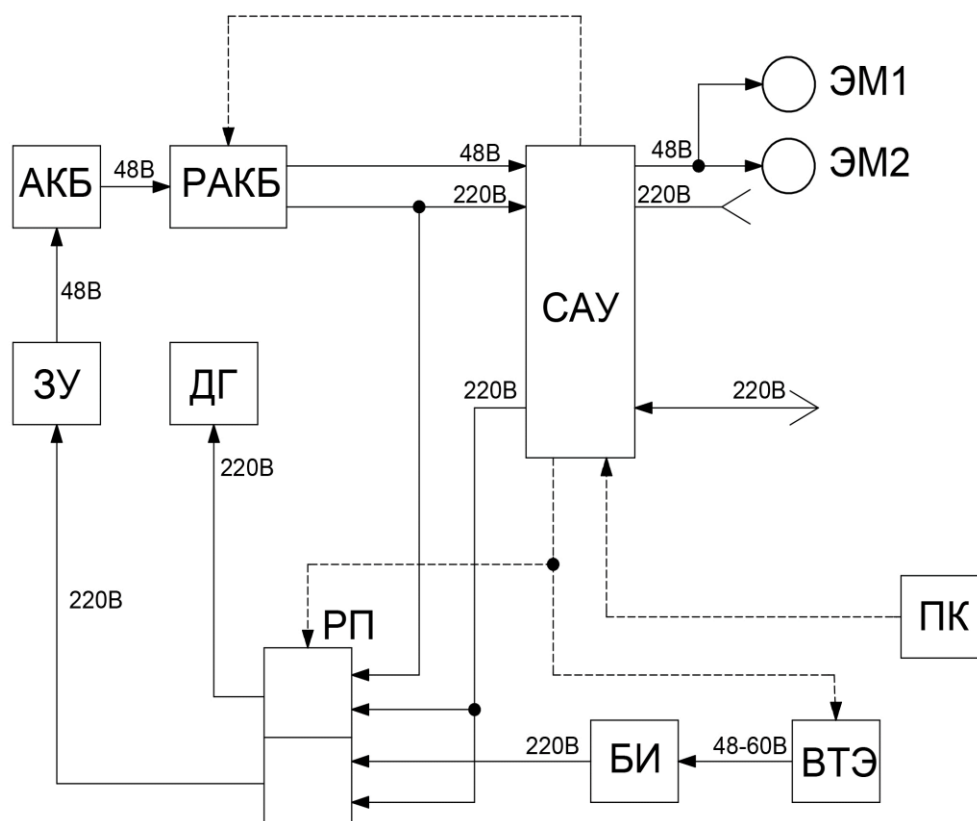


Рис. 4. Блок-схема электрических соединений РМП-ВЭУ: АКБ – литий-ионная аккумуляторная батарея, ЗАУ – зарядное устройство, РАКБ – блок системы силового размыкателя АКБ, ЭМ – электромоторы, ДГ – дегидратор, РП – блок системы силового размыкателя РМП-ВЭУ, БИ – блок инверторов, ВТЭ – батарея водородных топливных элементов, ПК – мобильный ПК с выносным пультом управления системы автоматического регулирования

Проведенные испытания беспилотной роботизированной морской платформы с энергетической установкой на водородных топливных элементах (рис. 5) подтвердили работоспособность энергетической установки нового поколения на ВЭУ в реальных условиях с непосредственным извлечением водорода на борту путем дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода – гидрогенизированного ароматического соединения метилциклогексан в качестве источника водорода.



Рис. 5. Универсальный функциональный модуль морской энергетической установки на водородном топливе

Выводы

В ходе исследования были проведенные испытания беспилотной роботизированной морской платформы с энергетической установкой на водородных топливных элементах, которые подтвердили работоспособность энергетической установки нового поколения в реальных условиях с непосредственным извлечением водорода на борту путем дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода – гидрогенизированного ароматического соединения метилциклогексана в качестве источника водорода.

Список литературы

1. Устройство для извлечения водорода из жидкого органического носителя // Жильцов А.С., Кочетов В.А., Сверлов Д.А., Смирнов С.А. / Патент на изобретение RU 2823698 C1, 29.07.2024. Заявка № 2023123076 от 05.09.2023.
2. Третьяков, И. А. Краткий аналитический обзор водородной промышленности и видов топливных элементов / И. А. Третьяков. Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. — №

- 14 (409). — С. 25-28.
3. Автономная гибридная энергетическая система на основе солнечных преобразователей и водородных топливных элементов / Аль-Руфай Ф.М.М., Якимович Б.А., Муровский С. П., Кувшинов В.В., Касницкий А.Д. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2025. – № 1(38). – С. 5-12.
 4. Технологии получения водорода для энергетических судовых установок // Бордан Д.Ф., Кувшинов В.В., Власов Н.А., Жильцов А.С., Березняк В.А. / В сборнике: Перспективные технологии и материалы. Материалы Международной научно-практической конференции. Севастополь, 2022. С. 361-364.
 5. Декарбонизация энергетического сектора: эксперты об экологических аспектах развития энергетики // Червинский В.Л., Якимович Б.А., Любчик О.А., Жильцов А.С., Косий А.Г. / Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 76-82.
 6. Тарасов Б.П., Бурнашева В.В., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов // Альтернативная энергетика и экология.

References

1. Device for extracting hydrogen from a liquid organic carrier // Zhiltsov A.S., Kochetov V.A., Sverlov D.A., Smirnov S.A. / Patent for invention RU 2823698 C1, July 29, 2024. Application No. 2023123076 dated September 5, 2023.
2. Tretyakov, I.A. Brief analytical review of the hydrogen industry and types of fuel cells / I.A. Tretyakov. Text: direct // Young scientist. - 2022. - No. 14 (409). - P. 25-28.
3. Autonomous hybrid energy system based on hydrocarbon converters and hydrogen fuel cells / Al-Rufai F.M.M., Yakimovich B.A., Murovsky S.P., Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D. // Transport of the Asia-Pacific region. - 2025. - No. 1 (38). - P. 5-12.
4. Technologies for producing hydrogen for marine power plants // Bordan D.F., Kuvshinov V.V., Vlasov N.A., Zhiltsov A.S., Berezhnyak V.A. / In the collection: Advanced technologies and materials. Materials
5. Decarbonization of the energy sector: experts on environmental aspects of energy development // Chervinsky V.L., Yakimovich B.A., Lyubchik O.A., Zhiltsov A.S., Kosiy A.G. / Power plants and technologies. 2024. Vol. 10. No. 2. P. 76-82.
6. Tarasov B.P., Burnasheva V.V., Lototsky M.V., Yartys V.A. Methods of hydrogen storage and possibilities of using metal hydrides // Alternative energy and ecology.

УДК 620.92

Повышение эффективности систем возобновляемой энергетики на основе интеллектуальных методов прогнозирования и оптимизационного управления режимами

Шевчук А.А.¹, Кувшинов В.В.¹, Рыбонька А.И.², Цалоев В.М.¹, Смирнов В.В.¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия² АО "Центр судоремонта "Звездочка", г. Северодвинск
AndreiLuck11@yandex.ru

Статья поступила 03.10.2025 г.; после доработки 06.10.2025 г.

Аннотация

Рассматривается вопрос применения цифровых технологий в энергетике. Показано, что внедрение цифровизации в энергетических секторах позволяет значительно снизить экономические потери и способствует повышению эффективности использования традиционных и возобновляемых источников энергии. Процесс декарбонизации позволяет сдерживать темпы роста температуры окружающей среды и способствует повышению экологической составляющей.

Ключевые слова: декарбонизация, искусственный интеллект, машинное обучение, возобновляемые источники энергии, автономное энергоснабжение, энергия ветрового потока, цифровые технологии, солнечная энергетика.

Increasing the efficiency of renewable energy systems based on intelligent forecasting methods and optimization control of modes

Shevchuk A.A.¹, Kuvshinov V.V.¹, Rybonka A.I.², Tsaloiev V.M.¹, Smirnov V.V.¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, 299053² Ship Repair Center "Zvezdochka", Severodvinsk

Received 03.10.2025 y.; Received in final form 06.10.2025 y.

Abstract

The issue of applying digital technologies in the energy sector is considered. It is shown that the introduction of digitalization in the energy sectors can significantly reduce economic losses and contributes to increasing the efficiency of using traditional and renewable energy sources. The decarbonization process helps to curb the rate of ambient temperature growth and contributes to the enhancement of the environmental component.

Keywords: decarbonization, artificial intelligence, machine learning, renewable energy sources, autonomous power supply, wind flow energy, digital technologies, solar energy.

Введение

Современная энергетика сталкивается с двойным вызовом: необходимостью декарбонизации и ростом мирового спроса на энергию. Возобновляемые источники, прежде всего солнечная и ветровая генерация, становятся ключевым решением благодаря экологичности и снижению стоимости [1]. Однако их интеграция в системы, из-

начально ориентированные на стабильную выработку ископаемого топлива, осложнена прерывистым и стохастическим характером ВИЭ, что создаёт волатильность и трудности в балансировке спроса и предложения в реальном времени.

Одной из основных задач энергетики в настоящее время является сокращение вредных выбросов в окружающую среду. Процесс сокращения

выбросов углекислого газа называется декарбонизация. Она ведет к достижению нулевого уровня выбросов, углеродной нейтральности и низкоуглеродной энергетике.

Постановка задачи

Глобальные инвестиции в энергетический переход в 2024 году достигли рекордных 2,08 трлн долларов (рис. 1), что отражает ускоренное развитие ключевых секторов: возобновляемой энергии, накопителей, электросетей и транспорта с электрификацией [2].

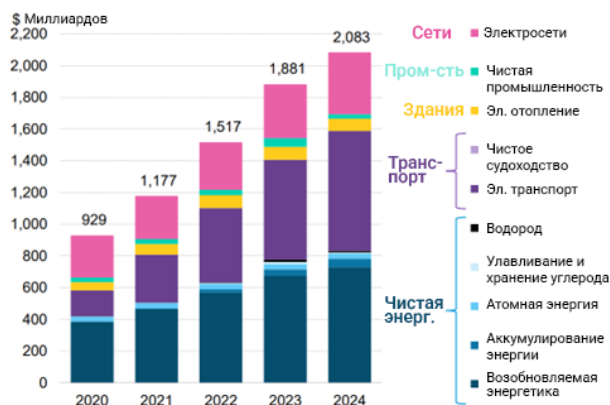


Рис. 1. Глобальные инвестиции в энергетический переход по секторам, 2020–2024, млрд долларов [3].

Основной импульс для роста вложений дала динамика в крупнейших экономиках, особенно Китае, где наблюдается активное расширение солнечных, ветровых и накопительных мощностей, тогда как новые технологии — водород и улавливание углерода — все еще занимают небольшую долю и развиваются медленными темпами.

Прогнозы Международного энергетического агентства указывают на устойчивый рост глобального спроса на электроэнергию со среднегодовым приростом около 3,5% — это вызвано бурным развитием цифровизации, дата-центров, ИИ, а также постепенной электрификацией транспорта и промышленности [4].

На рисунке 2 показан мировой спрос на электроэнергию по промышленным секторам.

В этих условиях особенно важно расширение энергетической инфраструктуры и увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что наглядно подтверждают данные первых шести месяцев 2025 года: инвестиции в новые проекты возобновляемой энергетики достигли 386 млрд долларов, рост обеспечили мелкокомасштабная солнечная генерация и офшорная

ветроэнергетика, тогда как инвестиционная активность в утилитарных солнечных и наземных ветровых электростанциях снизилась в связи с переоценкой рисков и доходности. На рисунке 3 представлены вложения инвесторов в проекты возобновляемой энергетики.

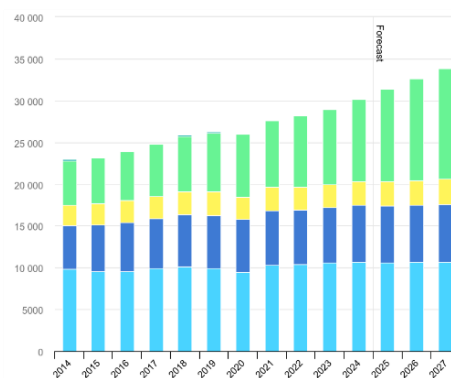


Рис. 2. Прогноз мирового спроса на электроэнергию по секторам, 2014–2027, тераватт-часы [4].



Рис. 3. Инвестиции в возобновляемую энергетику по типам проектов, 1-е полугодие 2015–2025, млрд долларов [2].

Эти тенденции демонстрируют как общую позитивную динамику энергетического перехода, так и изменения в структуре финансирования, связанного с экономической эффективностью и технологическими рисками в разных сегментах энергорынка.

Для решения проблемы нестабильности и непредсказуемости ВИЭ ключевой технологией становится машинное обучение (ML), как подраздел искусственного интеллекта (ИИ). Алгоритмы ML способны анализировать огромные массивы данных, выявлять сложные закономерности и делать точные прогнозы, что позволяет эффективно управлять изменчивостью возобновляемых источников энергии. От предсказания выработки энергии до оптимизации работы

сетей и систем хранения ML предлагает инструменты для повышения эффективности, надёжности и экономической жизнеспособности возобновляемой энергетики.

Эта технология позволяет создавать интеллектуальные энергосистемы (Smart Grids), которые проактивно управляют потоками энергии между производителями и потребителями (рис. 4).

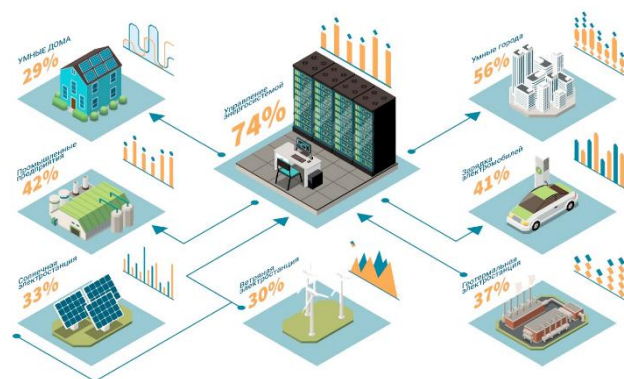


Рис.4.

Практические внедрения этих технологий ведущими мировыми компаниями уже демонстрируют значительные экономические и операционные выгоды. В таблице 4 представлены типы моделей оптимизации для отраслей возобновляемой энергетики, в частности для солнечной и ветровой.

При этом возникает уникальная ситуация: ИИ выступает не только как технологический инструмент для интеграции ВИЭ, но и как мощный экономический драйвер, формирующий новый спрос на энергию. Стремительное развитие ИИ требует колоссальных вычислительных мощностей, сосредоточенных в энергоёмких центрах обработки данных (ЦОД). На рисунке 5 представлены энергозатраты необходимые на работу цифровых центров обработки информации.

Как показывают последние прогнозы ведущих агентств, этот спрос будет расти экспоненциально, создавая вызовы для энергосистем:

международное энергетическое агентство (МЭА) прогнозирует, что глобальное потребление электроэнергии ЦОД вырастет более чем вдвое, с 460 ТВт·ч в 2024 году до более чем 1,000 ТВт·ч к 2030 году [11];

McKinsey & Company оценивает, что спрос ЦОД только в США может утроиться к 2030 году, достигнув 11-12% от общего потребления в стране [12];

Deloitte даёт ещё более драматичный прогноз, согласно которому спрос на энергию от ЦОД,

специализирующихся на ИИ, только в США может вырасти более чем в 30 раз к 2035 году [13].

Таблица1. Ключевые промышленные кейсы применения ML в ВИЭ.

Модель /Архитектура	Тип ВИЭ	Результат (Метрика)	% Улучшения (vs. Baseline)	Источник (Кейс/Исследование)
CNN-LSTM-SA (оптимизированная)	Ветер	RMSE=9.65, MAE=6.70, R2=97.06%	RMSE: -30.07%, MAE: -34.51%	Реальные данные ветропарка [5]
Deep Learning (LSTM)	Солнце	Снижение ошибки	до 30%	Кейс в Калифорнии [6]
SVM + Random Forest	Ветер	Снижение ошибки	20%	Кейс в Дании [6]
Улучшенный Random Forest	Солнце	RMSE=8.36 кВт, MAE=5.21 кВт	-	Реальные данные PV-системы [7]
GRU	Солнце	MAE=1.6180, R2=98.36%	Превосходит LSTM	Сравнительное исследование [8]
Bi-LSTM	Солнце	Test RMSE=0.1186, Test MAE=0.0680	Превосходит LSTM и XGBoost	Сравнительное исследование [9]

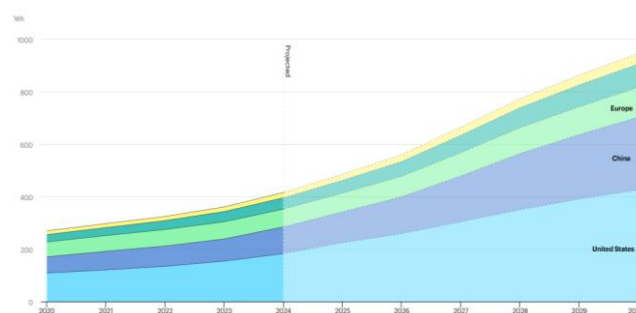


Рис. 5. Потребление электроэнергии дата-центрами по регионам: США, Китай и Европа, 2020–2030 (факт и прогноз [4]).



Рис. 6. Потребление электроэнергии дата-центрами по типам компаний и прогноз, 2014–2030, гигаватты и % [10]

Таким образом, формируется мощный самоподдерживающийся экономический цикл:

бум ИИ создаёт огромный спрос на электроэнергию. Этот спрос является концентрированным и платёжеспособным, что делает его привлекательным рынком для новой генерации;

технологические компании удовлетворяют этот спрос за счёт ВИЭ. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, технологические гиганты (Microsoft, Google, Amazon) взяли на себя обязательства по углеродной нейтральности и являются крупнейшими корпоративными покупателями чистой энергии в мире, заключая долгосрочные контракты (PPA), которые финансируют строительство новых электростанций. Во-вторых, ВИЭ экономически конкурентоспособны: сегодня они являются;

самым дешёвым источником новой энергии. По данным IRENA, в 2024 году 91% новых проектов ВИЭ были выгоднее строительства новых станций на ископаемом топливе [14];

массовое внедрение ВИЭ требует интеллектуальных решений для управления сетями. Здесь на помощь снова приходит ИИ, технологические решения на основе которого обеспечивают техническую возможность надёжной интеграции нестабильных источников в энергосистему.

Эта синергия между машинным обучением и возобновляемой энергетикой становится одним из самых мощных факторов, определяющих скорость и успешность глобального энергетического перехода. Дальнейшее развитие этой взаимосвязи будет иметь решающее значение для построения устойчивого, надёжного и экономически эффективного энергетического будущего.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

Машинное обучение уменьшает ошибки

прогноза на ~20–35%, даёт +10–20% к эффективности BESS, также оно радикально оптимизирует O&M.

Реальные ROI подтверждены кейсами (DeepMind, Siemens Gamesa, GE, AES).

Искусственный интеллект ускоряет развертывание ВИЭ через спрос ЦОД и корпоративные PPA.

Список литературы

1. Возобновляемая энергия – обеспечение более безопасного будущего / Организация Объединённых Наций. б.д. <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>.
2. Глобальные инвестиции в возобновляемую энергию по-прежнему достигают нового рекорда, поскольку инвесторы переоценивают риски / BloombergNEF. 2025. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-renewable-energy-investment-reaches-new-record-as-investors-reassess-risks/>.
3. Тенденции инвестиций в энергетический переход 2025 / Ченг А., Чжан Ю., Аннекс М. и др. / BloombergNEF. 2025. <https://jtia.biz/wp-content/uploads/2025/03/1739627414265.pdf>.
4. Электричество 2025: Анализ и прогноз до 2027 года / Чам Э., Казановас М., Молони Дж. / МЭА. 2025. <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>.
5. Повышение точности прогнозирования ветровой энергии на основе модели CNN-BiLSTM-SA, оптимизированной OPESC // Ванг Л., Чжан Д. / Математика. 2025. Т. 13. № 13. С. 2174.
6. Кейс-стади: Успешное применение машинного обучения в прогнозировании возобновляемой энергии // Олабийи В. 2023. https://www.researchgate.net/publication/384260901_Case_Studies_Successful_Applications_of_Machine_Learning_in_Renewable_Energy_Forecasting.
7. Улучшенная модель случайного леса для надёжного краткосрочного прогнозирования мощности фотогальванических систем с использованием метеорологических измерений // Массоуди М., Чихи И., Сидхом Л., Трабельси М., Рефаат Ш.С., Уэслати Ф.С. / Энергии. 2021. Т. 14. № 13. С. 3992.
8. Сравнение GRU и LSTM в приложении для прогнозирования производства солнечной энергии // Хуйн А.Д., Нгuyen Т.К. / International Journal of Scientific Research and Analysis. 2024. Т. 13. № 1. <https://ijsra.net/sites/default/files/IJSRA-2024-1831.pdf>.
9. Прогнозирование производства солнечной энергии: Сравнительное исследование моделей Bi-LSTM, LSTM, XGBoost с анализом функций активации // Ализадеган Х., Радмехр А., Карими Х., Асгари Илани М. / Preprints.org. 2024. https://www.researchgate.net/publication/380672880_Solar_Energy_Production_Forecasting_A_Comp

arative_Study_of_Bi-LSTM_LSTM_XGBoost_Models_with_Activation_Function_Analysis

10. Инвестирование в растущую экономику центров обработки данных / Бангалор С., Бхан А., Дель Миглио А., Сачдева П., Сарма В., Шарма Р., Шриватсан Б. и др. / McKinsey. 2023. https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/investing%20in%20the%20rising%20data%20center%20economy/investing-in-the-rising-data-center-economy_final.pdf.
 11. Энергоснабжение для ИИ // Энергия и ИИ – Анализ / Международное энергетическое агентство. 2025. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-supply-for-ai>.
 12. Масштабирование больших, быстрых, дешевых центров обработки данных с умными дизайнами / Бангалор С., Бхан А., Дель Миглио А., Сачдева П., Сарма В., Шарма Р., Шриватсан Б. / McKinsey. 2025. <https://www.mckinsey.com/industries/private-capital/our-insights/scaling-bigger-faster-cheaper-data-centers-with-smarter-designs>.
 13. Пробелы в инфраструктуре ИИ / Стэнсбери М., Маркезе К., Хардин К., Амон К. / Deloitte Insights. 2025. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/data-center-infrastructure-artificial-intelligence.html>.
 14. Стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников в 2024 году / Международное агентство по возобновляемым источникам энергии. Абу-Даби, 2025. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>.
- ## References
1. Renewable energy – powering a safer future / United Nations. n.d. <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>.
 2. Global renewable energy investment still reaches new record as investors reassess risks / Annex M. / BloombergNEF. 2025. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-renewable-energy-investment-reaches-new-record-as-investors-reassess-risks/>.
 3. Energy Transition Investment Trends 2025 / Cheung A., Zhang Y., Annex M. et al. / BloombergNEF. 2025. <https://jtia.biz/wp-content/uploads/2025/03/1739627414265.pdf>.
 4. Electricity 2025: Analysis and Forecast to 2027 / Çam E., Casanovas M., Moloney J. / IEA. 2025. <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>.
 5. Enhancing Wind Power Forecasting Accuracy Based on OPESC-Optimized CNN-BiLSTM-SA Model // Wang L., Zhang D. / Mathematics. 2025. Vol. 13. No. 13. P. 2174.
 6. Case Studies: Successful Applications of Machine Learning in Renewable Energy Forecasting // Olabiyi W. 2023. https://www.researchgate.net/publication/384260901_Case_Studies_Successful_Applications_of_Machine_Learning_in_Renewable_Energy_Forecasting.
 7. Enhanced Random Forest Model for Robust Short-Term Photovoltaic Power Forecasting Using Weather Measurements // Massaoudi M., Chihi I., Sidhom L., Trabelsi M., Refaat S.S., Oueslati F.S. / Energies. 2021. Vol. 14. No. 13. P. 3992.
 8. The Comparison of GRU and LSTM in Solar Power Generation Forecasting Application // Huynh A.D., Nguyen T.K. / International Journal of Scientific Research and Analysis. 2024. Vol. 13. No. 1. <https://ijsra.net/sites/default/files/IJSRA-2024-1831.pdf>.
 9. Solar Energy Production Forecasting: A Comparative Study of Bi-LSTM, LSTM, XGBoost Models with Activation Function Analysis // Alizadegan H., Radmehr A., Karimi H., Asghari Ilani M. / Preprints.org. 2024. https://www.researchgate.net/publication/380672880_Solar_Energy_Production_Forecasting_A_Comparative_Study_of_Bi-LSTM_LSTM_XGBoost_Models_with_Activation_Function_Analysis.
 10. Investing in the rising data center economy / Bangalore S., Bhan A., Del Miglio A., Sachdeva P., Sarma V., Sharma R., Srivathsan B. et al. / McKinsey. 2023. https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/investing%20in%20the%20rising%20data%20center%20economy/investing-in-the-rising-data-center-economy_final.pdf.
 11. Energy supply for AI // Energy and AI – Analysis / International Energy Agency. 2025. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-supply-for-ai>.
 12. Scaling bigger, faster, cheaper data centers with smarter designs / Bangalore S., Bhan A., Del Miglio A., Sachdeva P., Sarma V., Sharma R., Srivathsan B. / McKinsey. 2025. <https://www.mckinsey.com/industries/private-capital/our-insights/scaling-bigger-faster-cheaper-data-centers-with-smarter-designs>.
 13. AI infrastructure gaps / Stansbury M., Marchese K., Hardin K., Amon C. / Deloitte Insights. 2025. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/data-center-infrastructure-artificial-intelligence.html>.
 14. Renewable Power Generation Costs in 2024 / International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2025. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>.

УДК 621.317.799

Диагностика оборудования солнечных электрических станций

К.В. Штепа¹, А.С. Владимиров², И.С. Ивантеев², А.Д. Касницкий², Д.Ф. Бордан²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, stillen75@mail.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 02.10.2025 г.; после доработки 03.10.2025 г.

Аннотация

В последние десятилетия солнечные электрические станции стали важным компонентом глобальной энергетической системы. С увеличением объемов производства и внедрения технологий на основе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) возникает необходимость в эффективных методах диагностики и оценки состояния оборудования. Деградация солнечных панелей, инверторов и других элементов системы может существенно повлиять на производительность и экономическую эффективность солнечных электрических станций.

Ключевые слова: солнечная электростанция, инфракрасная термография, электролюминесцентная проверка, фотоэлектрическая панель, деградация кремниевых преобразователей.

Diagnostics of solar power plant equipment

K.V. Shtepa¹, A.S. Vladimirov², I.S. Ivanteev², A.D. Kasnitsky², D.F. Bordan²¹Sevastopol State University, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, 299053, Russia, stillen75@mail.ru²Sevastopol State University, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, 299053, Russia

Received 02.10.2025 y.; received in final form 03.10.2025 y.

Abstract

In recent decades, solar power plants have become an important component of the global energy system. With the increasing production and adoption of photovoltaic (PV)-based technologies, the need for effective diagnostic and condition assessment methods has arisen. Degradation of solar panels, inverters and other system components can significantly impact the performance and economic efficiency of solar power plants.

Keywords: solar power plant, infrared thermography, electroluminescence testing, photovoltaic panel, degradation of silicon converters.

Введение

Кремниевые фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии подвержены различным видам повреждений и дефектов, которые могут возникать как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации. К таким повреждениям относятся дефекты, вызванные заводским браком, некачественной транспортировкой, перегревом рабочих поверхностей солнечных панелей, а также воздействием других неблагоприятных факторов. Эти неисправности приводят к

снижению эффективности работы генерирующего оборудования солнечных электростанций и уменьшению выработки электроэнергии. В некоторых случаях может произойти полная остановка работы отдельных блоков электростанций. Поэтому своевременное выявление и устранение дефектов является критически важным для обеспечения надежной и эффективной работы солнечных электростанций.

Деградация солнечных панелей, инверторов и других компонентов системы может существенно снизить производительность и экономи-

ческую эффективность солнечных электростанций. Факторы, способствующие деградации оборудования, разнообразны и включают климатические условия, механические повреждения, электрические нагрузки и естественный износ материалов. В данной работе рассматриваются различные методы диагностики дефектов солнечных панелей, возникающих в процессе длительной эксплуатации [1-8].

Постановка задачи

Деградация оборудования на солнечных электростанциях может быть вызвана различными факторами, включая:

- Климатические условия. Ультрафиолетовое излучение, высокая температура, влажность и загрязнение воздуха могут негативно влиять на характеристики солнечных панелей;
- Механические повреждения. Воздействие града, сильных ветров и других экстремальных погодных условий может привести к физическим повреждениям панелей и других компонентов системы;
- Электрические нагрузки. Неправильная эксплуатация, включая резкие скачки напряжения, может вызвать повреждение инверторов и другого электрического оборудования;
- Возраст оборудования. Со временем даже высококачественные материалы могут терять свои эксплуатационные свойства, что приводит к деградации оборудования.

Результаты исследования

Существует несколько методов диагностики, которые позволяют оценить состояние оборудования и выявить его деградацию [1].

Наиболее простой и доступный метод диагностики — визуальный осмотр оборудования (рис. 1).

С помощью этого метода можно выявить загрязнение и физические повреждения, такие как трещины, изгибы или другие признаки на поверхности солнечных панелей (СП)

Также стоит обращать внимание на состояние соединений и проводки. Пример представлен на рисунке 1.

Инфракрасная термография позволяет выявлять перегревы в системе, что может быть признаком неисправностей [9]. С помощью тепловых камер можно визуализировать температуру поверхности солнечных панелей и других элементов. Обнаружение горячих точек помогает предсказать возможные сбои и принять меры до

того, как произойдет серьезное повреждение (рис 2).



Рис. 1. Повреждение и загрязнение солнечных панелей



Рис. 2. Инфракрасная термография и результат перегрева СП

ЭлектрOLUMИнесцентная проверка солнечной панели позволяет выявлять скрытые дефекты и оценивать состояние солнечных элементов [10]. Данный метод помогает выявить проблемы, способные повлиять на эффективность

панели, такие как микротрещины, неравномерное распределение материала. Результаты электролюминесцентной проверки представлены на рисунке 3.

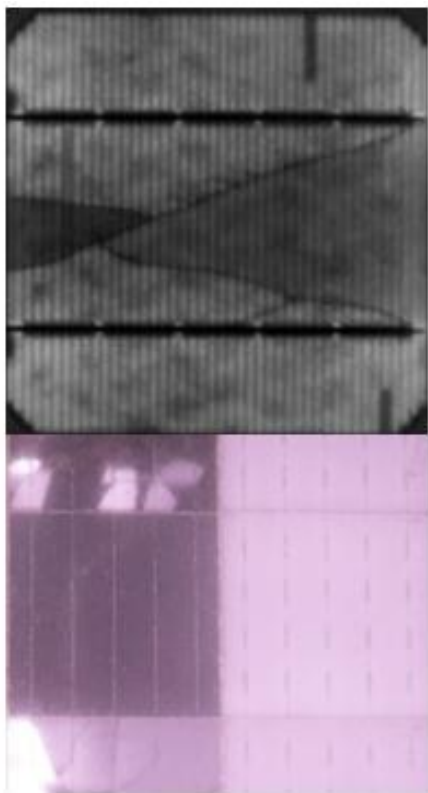


Рис. 3. Электролюминесцентная проверка СП

Компьютерные модели (рисунок 4) позволяют симулировать работу солнечной станции и прогнозировать её производительность в зависимости от различных условий. Это может помочь в определении возможных точек деградации и выявлении потенциальных проблем еще до их возникновения.

Электрические тесты включают в себя различные методы, такие как измерение напряжения, тока и сопротивления. Они позволяют определить эффективность работы солнечных панелей и инверторов. Например, результаты измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) позволяют выявлять дефектные солнечные панели (рис.5).

В последние годы применение дронов для инспекции солнечных панелей становится все более популярным [11]. Это позволяет быстро и эффективно проводить диагностику больших объемов оборудования и выявлять проблемы, которые трудно заметить при обычном осмотре. На рисунке 6 приведены примеры обнаружения

дроном скрытых дефектов, которые не видны невооружённым глазом и поэтому не видны при визуальном осмотре.

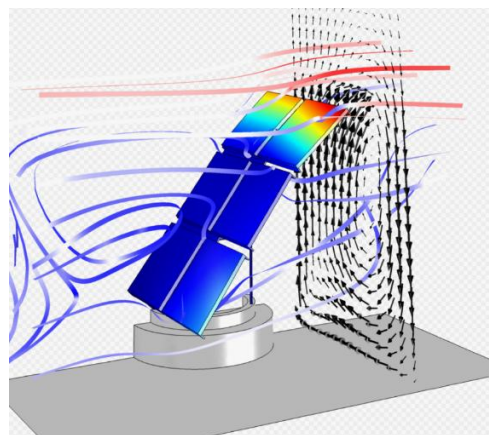


Рис. 4. Компьютерное моделирование СП

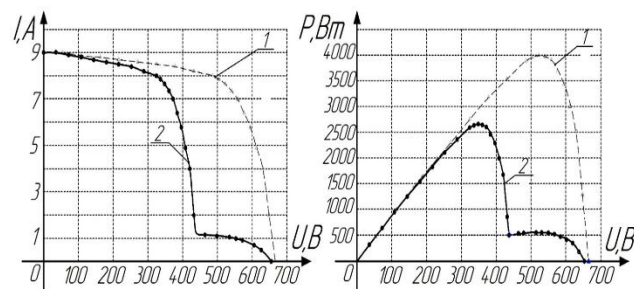


Рис. 5. Измерение ВАХ СП

(1 – солнечная панель без дефекта; 2 – солнечная панель с дефектом)

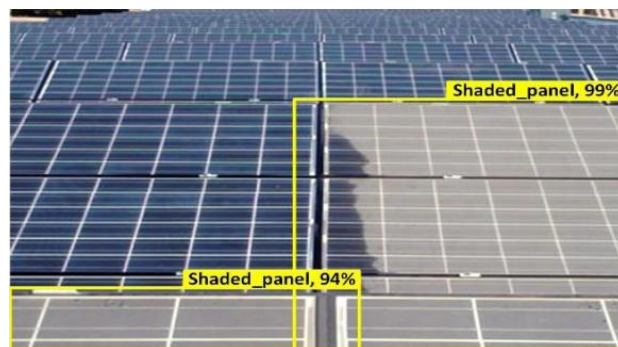


Рис. 6. Обнаружение дроном загрязненных СП

Современные солнечные электрические станции часто оснащены системами мониторинга, которые позволяют отслеживать производительность оборудования в режиме реального времени. В совокупности с другими методами, которые можно автоматизировать и внедрению системы поддержки принятия решений, можнократно увеличить эффективность использования

солнечных электростанций, своевременно выявляя и устраняя дефекты оборудования.

Методы диагностики включают:

1. Визуальный осмотр для выявления загрязнений и повреждений.
2. Инфракрасную термографию для обнаружения перегревов.
3. Электролюминесцентную проверку для выявления скрытых дефектов.
4. Компьютерное моделирование для прогнозирования производительности.
5. Электрические тесты для оценки ВАХ.
6. Использование дронов для быстрой инспекции больших объемов оборудования.

Заключение

Кремниевые фотоэлектрические преобразователи подвержены повреждениям из-за брака, транспортировки, перегрева и других факторов, что снижает выработку электроэнергии или прекращает работу блоков электростанции. Важно своевременно выявлять и устранять дефекты. Деграция оборудования влияет на производительность и эффективность солнечных станций. В работе рассмотрены методы обнаружения дефектов солнечных панелей в процессе эксплуатации.

Методы диагностики деградации оборудования на солнечных электрических станциях продолжают развиваться. Эффективное использование современных технологий может существенно повысить надежность и производительность солнечных систем, что в свою очередь способствует более эффективному использованию возобновляемых источников энергии. Важно помнить, что регулярная диагностика не только увеличивает срок службы оборудования, но и оптимизирует его работу, что делает использование солнечной энергии более экономически привлекательным и устойчивым.

Регулярная диагностика повышает надежность и эффективность солнечных станций, продлевая срок службы оборудования и оптимизируя его работу.

Список литературы

1. Мониторинг параметров фотоэлектрической установки // Кузнецов П.Н., Губин В.Е., Котельников Д.Ю., Янковский С.А., Лавриненко С.В. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024613544, 14.02.2024. Заявка № 2024612687 от 14.02.2024.
2. Делия, А. Н. Альтернативные источники энергии: учебное пособие / А. Н. Делия, В. П. Делия.

— Москва: Изд-во Делия, 2017. — 345 с.

3. Сизов, А. А. Системы альтернативной энергетики. Основы технологий и примеры реализации: учебное пособие / А. А. Сизов, И. Е. Лысенко, Э. В. Сысоев. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. — 150 с.
4. Солнечная энергетика: учебное пособие / В. В. Баталов, А. А. Игнатьев, В. Н. Козлов [и др.]; под ред. В. В. Баталова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 456 с.
5. Физика и техника солнечного излучения: учебное пособие / А. В. Козлов, В. П. Метельков, А. А. Онучин [и др.]; под общ. ред. В. М. Борисова. — Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. — 321 с.
6. Уланов, М. В. Оценка технического состояния и диагностика оборудования: учебное пособие / М. В. Уланов, М. В. Кузьмина. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 210 с.
7. Оладышкина, А. Ю. Методы и средства диагностики фотоэлектрических модулей / А. Ю. Оладышкина, В. Н. Мальцев // Альтернативная энергетика и экология. — 2010. — № 2 (80). — С. 56-63.
8. Пешков, И. Б. Моделирование процессов деградации и определение ресурса работы солнечных элементов и батарей / И. Б. Пешков, В. Н. Федянин, Г. П. Грабовецкая [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. — 2014. — № 17 (193). — С. 78-85.
9. Combined energy systems based on renewable energy sources // Kuvshinov V.V., Abdali L.M., Almaliki M.N., Hejeejo R.H., Issa H.A., Yakimovich B.A., Shcheklein S.E., Velkin V.I. / MM Science Journal. 2023. T. 2023. № 5.
10. Методы устранения негативного влияния на энергетические сети работы фотоэлектрических станций / Меджитов М.Р., Фролова А.Н., Кувшинов В.В., Касницкий А.Д., Жильцов А.С. / Энергетические установки и технологии. 2023. Т.9. № 1. С.63-67.
11. Мониторинг состояния поверхности фотоэлектрических модулей при использовании беспилотных летательных аппаратов / Котельников Д.Ю., Кузнецов П.Н., Якимович Б.А., Бани Мардже М. // В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2023. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь, 2023. С. 494-497.

References

1. Monitoring the parameters of a photovoltaic installation // Kuznetsov P.N., Gubin V.E., Kotelnikov D.Yu., Yankovsky S.A., Lavrinenko S.V. / Certificate of registration of a computer program RU 2024613544, 02/14/2024. Application No. 2024612687 dated 02/14/2024.
2. Delia, A. N. Alternative energy sources: a textbook / A. N. Delia, V. P. Delia. — Moscow: Publishing

- House of Delia, 2017. — 345 p.
3. Sizov, A. A. Alternative energy systems. Fundamentals of technology and examples of implementation: a textbook / A. A. Sizov, I. E. Lysenko, E. V. Sysoev. — Tambov: Publishing house of FSBEI HPE "TSTU", 2012. — 150 p.
 4. Solar energy: a textbook / V. V. Batalov, A. A. Ignatiev, V. N. Kozlov [et al.]; edited by V. V. Batalov. Yekaterinburg: Ural Publishing House. University, 2015. — 456 p.
 5. Physics and technology of solar radiation: a textbook / A.V. Kozlov, V. P. Metelkov, A. A. Onuchin [et al.]; under the general editorship of V. M. Borisov. — Saint Petersburg: Publishing house of SPbSETU "LETI", 2018. — 321 p.
 6. Ulanov, M. V. Assessment of the technical condition and diagnostics of equipment: a textbook / M. V. Ulanov, M. V. Kuzmina. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2016. 210 p.
 7. Oladyshkina, A. Y. Methods and diagnostic tools for photovoltaic modules / A. Y. Oladyshkina, V. N. Maltsev // Alternative energy and Ecology. — 2010. — № 2 (80). — Pp. 56-63.
 8. Peshkov, I. B. Modeling of degradation processes and determination of the service life of solar cells and batteries / I. B. Peshkov, V. N. Fedyanin, G. P. Grabovetskaya [et al.] // Alternative energy and ecology. — 2014. — № 17 (193). — Pp. 78-85.
 9. Combined energy systems based on renewable energy sources // Kuvshinov V.V., Abdali L.M., Almaliki M.N., Hejeejo R.H., Issa H.A., Yakimovich B.A., Shcheklein S.E., Velkin V.I. / MM Science Journal. 2023. Vol. 2023. No. 5.
 10. Methods of eliminating the negative impact of photovoltaic plants on energy networks / Medzhitov M.R., Frolova A.N., Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D., Zhiltsov A.S. /Power plants and technologies. 2023. Vol. 9. No. 1. pp.63-67.
 11. Monitoring of the surface condition of photovoltaic modules when using unmanned aerial vehicles / Kotelnikov D.Yu., Kuznetsov P.N., Yakimovich B.A., Bani Marje M.// In the collection: Environmental, industrial and energy security - 2023. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. Sevastopol, 2023. pp. 494-497.

УДК: 621.311.25

Исследование тепловой схемы модуля геотермальной установки с органическим циклом Ренкина и конденсатором воздушного охлаждения

Янковский С.А.¹, Губин В.Е.², Цибульский С.А.¹, Кан В.В.¹, Янковская Н.С.¹¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: vegubin@mail.sevsu.ru

Статья поступила 13.10.2025 г.; после доработки 14.10.2025 г.

Аннотация

В статье рассматривается вариант схемы бинарной геотермальной электростанции (ГеоЭС). Схема включает в себя основные элементы: винтовой детандер, теплообменники, электрогенератор, конденсатор с воздушным охлаждением и насосы. Рассмотрена эффективность работы ГеоЭС в зависимости от следующих параметров: типа рабочего тела, массового расхода, температуры воздуха. Установлено, что наибольшие электрический КПД и мощность достигаются при работе геотермальной станции с конденсатором с воздушным охлаждением, состоящим из 30 трубных пучков, при скорости нагнетания охлаждающего воздуха 3 м/с дутьевыми вентиляторами.

Ключевые слова: Геотермальная электростанция, детандер, конденсатор, электрогенератор.
Для цитирования

Study of the thermal diagram of a geothermal plant module with an organic Rankine cycle and an air-cooled condenser

Yankovsky S.A.¹, Gubin V.E.², Tsibulsky S.A.¹, Kan V.V.¹, Yankovskay N.S.¹¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30² Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: vegubin@mail.sevsu.ru

Received 13.10.2025 y.; received in final form 14.10.2025 y.

Abstract

The paper considers a variant of the diagram of a binary geothermal power plant (GeoPP). This diagram includes the main elements, such as a screw expander, heat ex-changers, an electric generator, an air-cooled condenser and pumps. The efficiency of the GeoPP operation is considered depending on the following pa-rameters: type of working fluid, mass flow rate, air temperature. It was found that the highest electrical efficiency and power are achieved by a geo-thermal plant operating with an air-cooled condenser, which consists of 30 tube bundles, at a cooling air injection rate of 3 m/s by blower fans.

Keywords: Geothermal power plant, expander, condenser, electric generator.

Одной из важнейших проблем современного общества считается глобальное потепление, при этом возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) отводят ключевую роль в снижении выбросов парниковых газов и других вредных веществ [1]. Согласно прогнозам, для снижения

последствий глобального потепления потребуется увеличить долю ВИЭ до 65% в 2050 году [2]. По данным Eurostat за 2020 год, в некоторых странах Европы доля ВИЭ уже превысила 50%, а лидерами стали такие страны как Исландия (83,7%), Норвегия (77,4%) и Швеция (60,1%).

Использование геотермальной энергии стало основной причиной лидерства Исландии в этом направлении.

Геотермальная энергия – тепловая энергия, которая находится и генерируется в недрах Земли. Теоретически эта энергия доступна в любой точке планеты, она неисчерпаема при правильной эксплуатации благодаря непрерывному переносу тепла от горячего ядра планеты, а также энерговыделению за счет радиоактивного распада долгоживущих изотопов в земной коре [3, 4].

Использование геотермальных ресурсов для обеспечения тепловой энергией потребителей в основном осуществляется за счет применения тепловых насосов, которые с высокой эффективностью преобразуют низкопотенциальную энергию Земли в теплоту.

Однако, для полноценного обеспечения потребителей необходима не только тепловая, но и электрическая энергия, которую можно получать на ГеоЭС разного типа.

В данной работе рассматривается исследуется геотермальная установка с бинарным органическим циклом Ренкина, которая работает на насыщенном газообразном фреоне, тепловая схема которой приведена на рисунке 1.

Эта установка может стать экологически чистым источником энергии для обеспечения потребителей для труднодоступных и отдаленных регионов.

В данной геотермальной установке нагретый теплоноситель замкнут в отдельный контур и представляет собой горячую геотермальную воду, добываемый из недр Земли. Эта вода передает свою тепловую энергию в теплообменниках фреону, тем самым нагревая и испаряя его внутри трубок, и, затем, закачиваемый обратно в специально разработанную скважину.

Оборудование для выработки механической энергии представлено винтовым блоком детандера, для генерации электрической энергии – электрогенератором.

Для отвода тепловой энергии из бинарного цикла и для конденсации рабочего тела (фреона) в данной схеме используется конденсатор с воздушным охлаждением. Этот конденсатор представляет собой теплообменник, состоящий из некоторого количества секций труб, в которые подается холодный воздух с помощью дутьевых вентиляторов.

Подробное и развернутое описание работы, а также особенности геотермальной системы приведено в опубликованной авторами работе

[5].

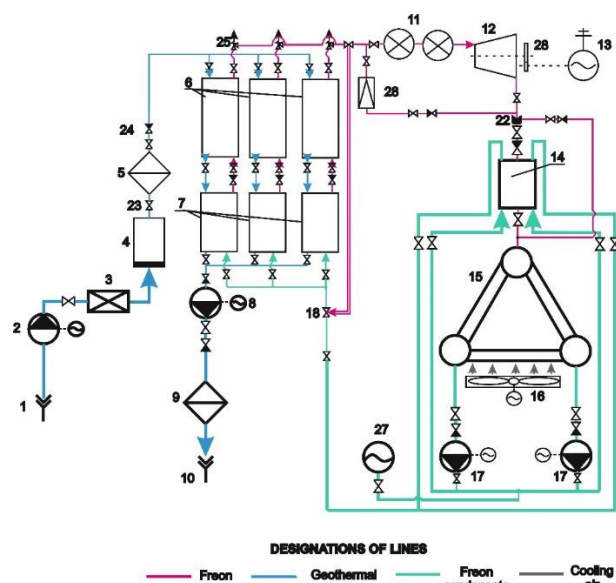


Рис. 1. Тепловая схема бинарного модуля геотермальной установки с органическим циклом Ренкина и конденсатором воздушного охлаждения: 1 – скважина №1 для забора геотермальной воды; 2 – насос для подъема геотермальной воды; 3 – регулирующие задвижки для скважины; 4, 5 – фильтрующие и сепарирующие устройства скважины; 6, 7 – теплообменные аппараты вода-фреон; 8 – насос закачки охлажденной геотермальной воды в скважину; 9 – сепаратор-фильтр флюида перед подачей в скважину; 10 – скважина №2 для закачки охлажденной воды; 11 – регулирующие вентили для управления винтовым детандером; 12 – винтовой детандер; 13 – электрический генератор переменного тока; 14 – теплообменник-регенератор; 15 – конденсатор воздушного охлаждения; 16 – дутьевые вентиляторы для конденсатора; 17 – питательный насос с частотным регулятором; 18 – терморегулирующий вентиль; 22 – трехходовой клапан; 23 – запорный вентиль; 24 – обратный клапан; 25 – предохранительный клапан; 26 – дросселирующее устройство; 27 – бак-накопитель фреона; 28 – планетарная передача связи детандер-электрогенератор.

Математическая модель для исследований построена на базе теплового расчета принципиальной схемы (рисунок 1) и поверочного расчета конденсатора воздушного охлаждения, который модифицирован под конденсацию фреона [6]. Для расчета процессов конденсации низкокипящего рабочего тела в трубах конденсатора принята методика Бойко–Кружилина [7].

Рассмотрены озонобезопасные современные фреоны: R245ca, R245fa, R365mfc, изобутан, изопентан.

На рис. 2 приведены графические зависимости, характеризующие температуру конденсации

в конденсаторе, который входит в состав ГеоЭС, от разных видов конденсирующихся фреонов при различных скоростях подачи воздуха.

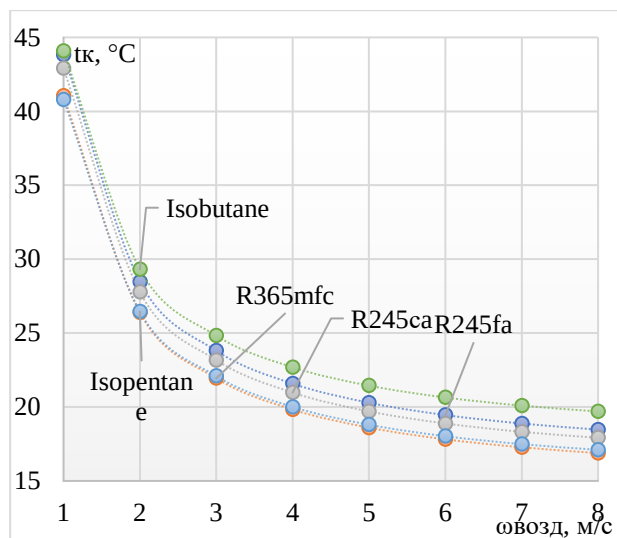


Рис. 2. Графическая зависимость температуры конденсации фреона в конденсаторе фреона и от скорости воздуха на входе в конденсатор

Воздух, подаваемый дутьевыми вентиляторами, предназначен для охлаждения и конденсации фреона. Он направляется в секцию, в которой располагается трубный пучок оребренных труб. Внутри труб движется, охлаждается и конденсируется фреон.

При повышении скорости нагнетания воздуха усиливается обдув пучка оребренных труб, в результате чего возрастает коэффициент теплоотдачи от трубок к воздуху. Это приводит к улучшению теплообмена.

При скорости нагнетаемого воздуха от 1 до 3 м/с тратится относительно небольшое количество электрической энергии на привод дутьевых вентиляторов: при скорости $\omega_{\text{возд}} = 3 \text{ м/с}$ $N_{\text{дв}} = 48,7 \text{ кВт}$.

На рис. 3 приведены графические зависимости, характеризующие температуру конденсации в конденсаторе, который входит в состав ГеоЭС, от модели конденсирующихся фреонов при разных количествах секций.

Наибольшее снижение температуры конденсации наблюдается в диапазоне от 10 до 30 трубных секций для конденсатора воздушного охлаждения. Резкое падение температуры конденсации фреона в диапазоне от 10 до 30 секций в конденсаторе объясняется снижением температурного напора. Это приводит к резкому уменьшению массового расхода фреона и его скорости

прохождения.

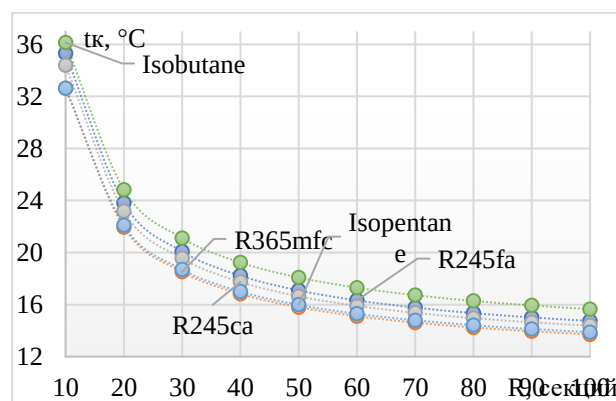


Рис. 3. Графическая зависимость температуры конденсации фреона в конденсаторе фреона и от количества секций трубных пучков в конденсаторе

Наибольшей эффективностью обладают ГеоЭС, работающие на ОЦР совместно с конденсатором воздушного охлаждения на следующих фреонах (от большей к меньшей): R245ca, R365mfc, изопентан, R245fa, изобутан.

При количестве от 30 до 40 секций эффективность работы бинарной станции достигает наибольшего значения и примерно одинаковая ($\pm 0.1\%$ отн. разница). Однако, конденсатор с 40 секциями имеет большую массу (на $\sim 33\%$), чем конденсатор с 30 секциями.

Выводы

В работе была рассмотрено влияние конструктивных особенностей конденсатора воздушного охлаждения, работающего в составе тепловой схемы бинарной геотермальной установки, а также вида фреона на температуры конденсации.

Ранее было выявлено, что температура окружающего воздуха оказывает прямое влияние на работу ОЦР – при ее понижении уменьшается температура конденсации, растет теплотерепад в детандере и происходит линейное увеличение электрической мощности и абсолютного электрического КПД.

В данной работе была определена оптимальная скорость подачи охлаждающего воздуха на секции конденсатора воздушного охлаждения, при данных условиях она равна 3 м/с. Данная скорость не зависит от температуры окружающего воздуха и оказывает прямое влияние на температуру конденсации, т.е. при увеличении скорости температура падает. При данной скорости затраты на привод дутьевых вентиляторов

оптимальные.

Так же в данном исследовании было найдено оптимальное количество секций, из которых состоит конденсатор воздушного охлаждения, $R=30$. При этом значении соблюдается баланс между капитальными и эксплуатационными затратами на конденсатор и его тепловой эффективностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № ЭЭ3Ц-018-198-2025).

Список литературы

1. Solaun K. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections / K. Solaun and E. Cerda // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019.
2. Borawski P. Development of Renewable Energy Sources in the European Union in the Context of Sustainable Development Policy / P. Borawski // Energies. – 2022.
3. Alekseenko S.V. Geothermal energy technology / S. V. Alekseenko // Break-through ideas in energy for the next 10 years, Association on development of the international research and projects in the field of energy «GLOBAL ENERGY». – 2022. – P. 135 – 155.
4. Alekseenko S.V. Problems and outlooks for petrothermal power engineering (re-view) / S.V. Alekseenko, V.Y. Borodulin, N.A. Gnatus, M.I. Nizovtsev, N.N. Smirnov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Vol. 23. – No. 1. Maik Nauka-Interperiodica Publishing.
5. Alekseenko S.V. Analysis of the cycle arrangement of a binary geothermal power plant using a low- and medium-temperature source / S.V. Alekseenko, A.S. Zavorin, V.E. Gubin, S.A. Lavrinenko, S.A. Tsibulskiy, S.A. Yankovsky // Thermal Science and Engineering Progress. – 2024. – V. 48. – P. 102400.
6. Tsibulskii S.A. Improvement air condensers evaluation model / S.A. Tsibulskii, N.N. Galashov // Heat Mass Transf. Therm. Control Syst. Tech. Technol. Energy Equip. – 2018. – V. 194. – P. 01017.
7. Минко К.Б. Моделирование процессов конденсации хладонов в вертикальных трубах методом VOF / К.Б. Минко, Яньков Г.Г. // Теплоэнергетика. – 2023. – № 7. – С. 70–87.

References

1. Solaun K. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections / K. Solaun and E. Cerda // Renewable and Sustainable Energy

- Reviews. – 2019.
2. Borawski P. Development of Renewable Energy Sources in the European Union in the Context of Sustainable Development Policy / P. Borawski // Energies. – 2022.
3. Alekseenko S.V. Geothermal energy technology / S. V. Alekseenko // Break-through ideas in energy for the next 10 years, Association on development of the international research and projects in the field of energy «GLOBAL ENERGY». – 2022. – P. 135 – 155.
4. Alekseenko S.V. Problems and outlooks for petrothermal power engineering (re-view) / S.V. Alekseenko, V.Y. Borodulin, N.A. Gnatus, M.I. Nizovtsev, N.N. Smirnov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Vol. 23. – No. 1. Maik Nauka-Interperiodica Publishing.
5. Alekseenko S.V. Analysis of the cycle arrangement of a binary geothermal power plant using a low- and medium-temperature source / S.V. Alekseenko, A.S. Zavorin, V.E. Gubin, S.A. Lavrinenko, S.A. Tsibulskiy, S.A. Yankovsky // Thermal Science and Engineering Progress. – 2024. – V. 48. – P. 102400.
6. Tsibulskii S.A. Improvement air condensers evaluation model / S.A. Tsibulskii, N.N. Galashov // Heat Mass Transf. Therm. Control Syst. Tech. Technol. Energy Equip. – 2018. – V. 194. – P. 01017.
7. Minko K.B. Modeling of refrigerant condensation processes in vertical pipes using the VOF method / K.B. Minko, Yankov G.G. // Thermal Power Engineering. - 2023. - No. 7. - P. 70–87.

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

УДК 681.586.5

**Теоретическое моделирование интенсивности поляризованного
излучения для волоконных Брэгговских решеток в условиях
радиационного воздействия**

В.В. Довгаленко, О.В. Матузаева, Е.В. Мирошниченко, А.Г. Рипп, А.С. Хоружий
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299015, Россия, artmhrzh@mail.ru

Статья поступила 15.10.2025 г.; после доработки 16.10.2025 г.

Аннотация

В работе проведена разработка теоретической модели интенсивности света в оптоволоконных датчиках с Брэгговской решёткой под воздействием ионизирующего излучения. Предложено компактное уравнение, учитывающее спектральное распределение источника и фазовые сдвиги, вызванные поляризационными эффектами. Описаны связи физических коэффициентов модели с эффектами радиационного воздействия. Показана возможность использования модели для оценки характеристик датчиков. Произведена оценка работоспособности выведенной формулы через верификационную модель.

Ключевые слова: Оптоволоконный датчик, Брэгговская решётка, интенсивность света, закон Малюса, поляризация, фазовый сдвиг, спектральное распределение, радиационное воздействие, ядерная энергетика.

**Theoretical modeling of the intensity of polarized radiation in fiber
Bragg gratings under radiation exposure**

V.V. Dovgalenko, O.V. Matuzaeva, E.V. Miroshnichenko, A.G. Ripp, A.S. Khoruzhiy
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 2990 15, Russia, artmhrzh@mail.ru
² Second author affiliation

Received 15.10.2025 y.; received in final form 16.10.2025 y.

Abstract

In the work, the development of a theoretical model of the intensity of light in fiber-optic sensors with a Bragg grating under the influence of ionizing radiation was conducted. A compact equation, taking into account the spectral distribution of the source and phase shifts caused by polarization effects, is proposed. The connections of the physical coefficients of the model with the effects of radiation exposure are described, the possibility of using the model for evaluating the characteristics of sensors is shown. Derived formula performance verified.

Keywords: Fiber-optic sensor, Bragg grating, light intensity, Malus's law, polarization, phase shift, spectral distribution, radiation exposure, nuclear power engineering.

Введение

В условиях развития ядерной энергетики критически важной задачей выступает обеспече-

ние надёжного контроля физических показателей систем АЭС. Одной из перспективных разработок в решении данной задачи являются оптоволоконные датчики, основанные на эффектах

волоконной Брэгговской решётки (ВБР), позволяющие точно измерять температуру, деформацию и напряжение, обеспечивая непрерывный мониторинг и повышая безопасность эксплуатации.

Однако, эффективность использования ВБР-датчиков в условиях АЭС ограничивается воздействием ионизирующего излучения. Под воздействием радиации поляризационные свойства света, проходящего через волокно, подвергаются изменениям, что вызывает фазовые сдвиги и деградацию интерференционных характеристик.

Эти эффекты снижают точность измерений и долговечность датчиков, что обуславливает актуальность исследования способов минимизации радиационного влияния для проектирования надёжных сенсорных систем.

Несмотря на значительный объем исследований радиационной стойкости оптоволоконна и разработок моделей для отдельных эффектов, анализ существующих работ и публикаций указывает на отсутствие какой-либо комплексной теоретической модели, которая бы описывала интенсивность полихроматического света после анализатора в условиях воздействия ионизирующего излучения, которая бы учитывала спектральное распределение источника и радиационно-индуцированные эффекты, такие как фазовые сдвиги и деполяризация и была применима для оптоволоконных датчиков и пригодна для прямой аппроксимации экспериментальных данных.

Постановка задачи

Основная задача состоит в выводе формулы интенсивности в обозначенном контексте, которая была бы удобна для практического применения.

Предполагаемая теоретическая модель должна описывать интенсивность света после анализатора с учётом фазовых и спектральных эффектов, одновременно с тем оставаясь простой для понимания, что сделало бы её полезной как для практических расчётов ВБР-датчиков, так и для образовательных целей.

Для проверки работоспособности выводимой формулы интенсивности предполагается произвести верификацию на основе специальной численной модели, реализованной в среде программы **Microsoft Excel**, в основе работы которой будет положено использование модуля Solver с эволюционным методом поиска решения.

Описание исследования

Для монохроматической плоской волны с линейной поляризацией, ориентированной под углом φ к оси анализатора, интенсивность света, прошедшего через идеальный поляризатор, подчиняется закону Малюса [1, с. 48]:

$$I(\lambda, \theta) = I_0(\lambda) \cos^2(\theta - \varphi(\lambda)), \quad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ – интенсивность на входе анализатора, θ – угол ориентации оси анализатора.

Для описания произвольного преобразования состояния поляризации в оптическом тракте (волокне, волновых пластинках) используется формализм Джонса [1, гл. 14; 4, гл. 3]. Выходное поле $E_{\text{выход}}(\lambda)$ связано со входным $E_{\text{вход}}(\lambda)$ матрицей Джонса тракта $J(\lambda)$:

$$E_{\text{выход}}(\lambda) = J(\lambda) E_{\text{вход}}(\lambda).$$

Интенсивность после анализатора с вектором Джонса $a(\theta)$ определяется квадратом проекции выходного поля на его ось [1, с. 714]:

$$\begin{aligned} I(\lambda, \theta) &= |a(\theta) \cdot E_{\text{выход}}(\lambda)|^2 = \\ &= |a(\theta) \cdot J(\lambda) E_{\text{вход}}(\lambda)|^2. \end{aligned}$$

Реальный оптический источник обладает конечной шириной спектра. Измеряемая фотодетектором интенсивность представляет собой интеграл по спектру от спектральной плотности мощности источника $S(\lambda)$, учитывающей как исходный спектр, так и затухание (например, радиационно-индуцированное) в тракте [2, гл. 5; 5]:

$$\begin{aligned} I(\theta) &= \int S(\lambda) I(\lambda, \theta) d\lambda = \\ &= \int S(\lambda) |a(\theta) \cdot J(\lambda) E_{\text{вход}}(\lambda)|^2 d\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

Для случая, описываемого выражением (1), формула (2) принимает вид:

$$I(\theta) = \int S(\lambda) \cos^2(\theta - \varphi(\lambda)) d\lambda. \quad (3)$$

Используется тригонометрическое тождество для понижения степени:

$$\cos^2(\theta - \varphi(\lambda)) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\theta - 2\varphi(\lambda))]. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (3) даёт:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} \int S(\lambda) d\lambda + \frac{1}{2} \int S(\lambda) \cos(2\theta - 2\varphi(\lambda)) d\lambda. \quad (5)$$

Косинус представляется как действительная часть комплексной экспоненты:

$$\begin{aligned} \cos(2\theta - 2\varphi(\lambda)) &= \\ &= \operatorname{Re}\{e^{i \cdot 2\theta} \cdot e^{-i \cdot 2\varphi(\lambda)}\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подстановка (6) в (5) позволяет вынести не зависящие от λ множители за знак интеграла:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} P_0 + \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{e^{i \cdot 2\theta} \cdot \int S(\lambda) e^{-i \cdot 2\varphi(\lambda)} d\lambda\}. \quad (7)$$

$$\cdot \int S(\lambda) e^{-i \cdot 2\varphi(\lambda)} d\lambda\},$$

Где P_0 – полная мощность источника на входе в систему:

$$P_0 = \int S(\lambda) d\lambda.$$

Вводится комплексный коэффициент когерентности C , характеризующий степень сохранения поляризационной информации при спектральном усреднении [2, с. 133–134]:

$$C \equiv (1/P_0) \cdot \int S(\lambda) e^{-i \cdot 2\varphi(\lambda)} d\lambda \quad (8)$$

С учётом (8) выражение (7) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} I(\theta) &= \left(\frac{P_0}{2}\right) [1 + \operatorname{Re}\{C e^{i \cdot 2\theta}\}] = \\ &= \left(\frac{P_0}{2}\right) [1 + |C| \cdot \cos(2\theta + \arg(C))]. \end{aligned}$$

Для перехода к формуле, пригодной для аппроксимации экспериментальных данных, вводятся поправки, следующие из анализа реальных оптических систем [3; 4]:

1) суммарная фоновая составляющая $I_{\text{БГ}}$: обусловлена темновым током фотодетектора, рассеянным излучением и несогласованной ортогональной компонентой из-за конечного коэффициента подавления поляризации тракта и анализатора.

2) замена $P_0/2$ на $I_{\perp}$ – интенсивность, регистрируемую при отсутствии модуляции ($C=0$) для учёта общих потерь.

3) учтём частичную поляризацию: наблюдаемая видимость V меньше теоретического предела $|C|$ из-за конечной степени поляризации света:

$$V = |C|$$

С учётом этих поправок итоговая рабочая формула принимает вид:

$$I(\theta) = I_{\text{БГ}} + I_{\perp} [1 + V \cos(2\theta + \theta_0)], \quad (9)$$

где θ_0 – фазовый сдвиг, определяющий положение экстремумов:

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \arg(C)$$

Выведенное выражение (9) является обобщением закона Малюса для случая полихроматического частично поляризованного света, прошедшего оптическую систему.

Данная модель описывает интенсивность света с помощью четырёх физически интерпретируемых параметров, каждый из которых несёт информацию о конкретных радиационных эффектах в волокне.

Фоновая интенсивность $I_{\text{БГ}}$: данный параметр характеризует аддитивную составляющую сигнала, не зависящую от угла θ . Рост $I_{\text{БГ}}$ с увеличением дозы облучения D является прямым

следствием деградации **коэффициента подавления поляризации** и увеличения **радиационно-индуцированного затухания**. Ухудшение поляризационных свойств волокна приводит к усилению утечки оптической мощности в ортогональную поляризацию, регистрируемой как рост постоянного фона [4].

Видимость (контраст) V : данный параметр ($V \in [0,1]$) определяет глубину модуляции сигнала. Его уменьшение с ростом дозы D однозначно связано с увеличением **поляризационной модовой дисперсии** и **разности групповых задержек** между ортогональными модами. Усиление дисперсии приводит к спектральному «размыванию» интерференционной картины, что проявляется в падении контраста [2, 4].

Фазовый сдвиг θ_0 : сдвиг положения экстремумов кривой $I(\theta)$ обусловлен изменением эффективного показателя преломления $n_{\text{эфф}}$ сердцевины волокна, вызванным радиационным воздействием. Это изменение является прямой причиной **сдвига длины волны Брэгга $\lambda_{\text{Б}}$** , что делает мониторинг дрейфа θ_0 инструментом для отслеживания данного эффекта [4].

Опорная интенсивность $I_{\perp}$: данный параметр является масштабным коэффициентом, характеризующим общий уровень мощности сигнала. Его динамика несёт в себе информацию об интегральных потерях в системе.

Для подтверждения работоспособности, а также точности и адекватности выдаваемых числовых результатов аналитической формулы (9) была использована модель численной верификации, реализованная в среде программы Microsoft Excel. Такой выбор обусловлен возможностью на базе Excel обеспечить интуитивную, легко документируемую и воспроизводимую среду для инженерных расчётов, а также наличием в самой программе встроенного модуля «Поиск решения», используемого для решения задач оптимизации, статистического анализа и работы с формулами, что полностью отвечает требованиям реализуемой верификационной модели [5].

Дальнейшая часть исследования посвящена подробному описанию самой модели, её логики и полученным результатам её использования.

Принципиально задача верификации заключается в следующем: по исходным экспериментальным значениям интенсивности $I_{\text{эксп}}(\theta_k)$ при наборе углов анализатора θ_k восстанавливаются параметры модели $I_{\text{БГ}}$, V , θ_0 , $I_{\perp}$ таким образом, чтобы минимизировать расхождение между моделью и данными. В качестве функционала рас-

хождения используется стандартная сумма квадратов невязок S :

$$S = \sum_{k=1}^N (I_{\text{эсп}}(\theta_k) - I_{\text{мод}}(\theta_k))^2,$$

где модельная интенсивность $I_{\text{мод}}(\theta)$ задаётся выражением (9).

При допущении, что шум измерений аддитивен и аппроксимируется нормальным распределением, математическое ожидание суммы квадратов невязок $S_{\text{ож}}$ равно числу степеней свободы, умноженному на дисперсию шума σ^2 :

$$S_{\text{ож}} = (N - p)\sigma^2,$$

где N – число измерений (точек), p – число настраиваемых параметров ($p=4$). Для корректной статистической интерпретации результатов мы сопоставляем полученные значения S с этой величиной, используя дополнительный показатель – среднеквадратичную ошибку:

$$\chi_v^2 = \frac{S}{(N-p)\sigma^2},$$

для которого утверждение « χ_v^2 близко по значению к единице» интерпретируется как статистическое согласие модели и шума [3].

Ключевым этапом численной верификации является задание исходных экспериментальных параметров модели (см. формулу (9)), которые определяются для каждого набора данных, полученного из литературных источников (доза облучения, смещение длины волны Брэгга, степень деполяризации и другие радиационно-индуцированные изменения). Данный процесс базируется на ряде устойчивых физических и статистических процедур, позволяющих связать наблюдаемые характеристики с параметрами модели $I_{\text{Бг}}$, V , θ_0 , $I_{\perp}$.

Таким образом, структура верификационной модели представлена наборами данных: значения угла θ в радианах от 0 до π ; соответствующие значения эталонной интенсивности $I_{\text{идеал}}$, рассчитанные по формуле (9) с использованием выведенных предполагаемых показателей параметров формулы $I_{\text{Бг}}$, V , θ_0 , $I_{\perp}$ для каждого набора изначальных данных; значения экспериментальной интенсивности $I_{\text{эсп}}$, полученные добавлением случайного шума к $I_{\text{идеал}}$; значения модельной интенсивности $I_{\text{мод}}$, вычисленные с использованием восстановленных параметров $I_{\text{БгВосст}}$, $V_{\text{Восст}}$, $\theta_{0\text{Восст}}$, $I_{\perp\text{Восст}}$; квадраты невязок между $I_{\text{эсп}}$ и $I_{\text{мод}}$. Результатом работы верификационной модели выступает сумма квадратов невязок.

Значение фоновой интенсивности $I_{\text{Бг}}$ определяется как аддитивная составляющая сигнала, не зависящая от угла θ . Экспериментально этот параметр вычисляется как среднее значение

уровня сигнала при больших дозах облучения или при положениях анализатора, соответствующих минимальной модуляции интенсивности. В контексте формулы (9), при том, что

$$\cos(2\theta + \theta_0) \approx 0,$$

остаточный уровень сигнала соответствует именно $I_{\text{Бг}}$. Данный подход опирается на экспериментальные результаты, зафиксированные в работах «Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies» Morana [4] и «Статистическая оптика» Гудмана [2].

Видимость (контраст) V рассчитывается на основе соотношения между экстремальными значениями интенсивности сигнала. Для заданного распределения интенсивности, экспериментальное значение V определяется как

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (10)$$

где I_{max} и I_{min} фиксируются при изменении угла анализатора. Эта величина напрямую связана с контрастностью интерференционной картины, и её снижение при увеличении дозы отражает возрастание поляризационной модовой дисперсии и радиационно-индуцированной деполяризации [2,4].

Фазовый сдвиг θ_0 устанавливается исходя из данных о смещении длины волны Брэгга $\Delta\lambda$. В рамках формализма Джонса и теории интерференции, θ_0 определяется как половина аргумента комплексного коэффициента когерентности C , то есть:

$$\theta_0 = \frac{1}{2}\arg(C). \quad (11)$$

При этом значение $\arg(C)$ восстанавливается через спектрально-зависимые данные о фазе $\varphi(\lambda)$, которые в свою очередь связаны с радиационно-индуцированными изменениями эффективного показателя преломления $n_{\text{эфф}}$. Таким образом, наблюдаемое в источниках смещение Брэгговской длины волны $\Delta\lambda_{\text{Б}}$ прямо соответствует фазовому сдвигу, что согласуется с выводами работы Morana [4].

Параметр $I_{\perp}$ задаётся как средняя интенсивность при условии отсутствия модуляции ($C=0$). В практическом плане C соответствует половине суммы экстремальных значений сигнала:

$$I_{\perp} = \frac{1}{2}(I_{\text{max}} + I_{\text{min}}). \quad (12)$$

Данный параметр характеризует общий уровень мощности сигнала, прошедшего через систему, и несёт информацию о совокупных потерях в тракте.

Верификационная модель была реализована с использованием встроенного в надстройку Solver программы Excel эволюционного метода решения, выбор в сторону которого в сравнении

с нелинейным алгоритмом обусловлен тем, что нелинейный алгоритм решения в задачах с косинусной зависимостью, как раз таки представленной в анализируемой формуле (9), по фазе нередко застревает в локальных минимумах: функция суммы квадратов невязок имеет множество локальных минимумов, связанных с периодичностью косинуса, сдвигами фазы и соотношением параметров V и $I_{\perp}$.

Параметры оптимизации верификационной модели были выбраны следующие: размер совокупностей равен – 100 – выбран для обеспечения достаточной популяционной разведки пространства параметров поляризационного состояния для рассматриваемого случая (количество параметров равно 4); число итераций – 1500 – обеспечивает достаточно большое число поколений для сходимости; точность ограничения и сходимость – 0,0001 – обеспечивают точность параметров, сравнимую с экспериментальной погрешностью; число независимых запусков – 30 на каждую пару (набор изначальных данных и уровень шума) – обеспечивает статистическую устойчивость оценок и возможность вычислить сумму квадратов невязок [5].

Диапазоны изменения параметров, используемые в реализуемой верификационной модели, выбираются с учётом как экспериментальных данных из источников [4,6], так и общих физических ограничений ($0 \leq I_{\text{Бг}}, I_{\perp} \leq 1, 0 \leq V \leq 1$).

$I_{\text{Бг}}$ ограничивается диапазоном $\pm 0,15$: такая ширина покрывает ожидаемую деградацию фоновой составляющей, обусловленную радиационно-индуцированное затухание и утечкой в ортогональную поляризацию. Значение $\pm 0,15$ выбрано как компромисс между достаточной гибкостью восстановления и исключением нереалистичных крайних решений.

V (видимость) ограничена диапазоном $\pm 0,15$. На практике радиационные эффекты уменьшают V , поэтому допустимый диапазон должен покрывать уменьшение на десятки процентов.

θ_0 ограничивается в диапазоне $\pm \pi$ – такой шаг необходим из-за цикличности косинуса: сдвиг фазы на $\pm \pi$ даёт существенные изменения положения максимумов. Диапазон $\pm \pi$ достаточно широк, чтобы покрыть смещения, наблюдаемые в экспериментах [4,6].

Для параметра $I_{\perp}$ установлен узкий диапазон $\pm 0,02$, поскольку это масштабная величина и обычно измеряется с меньшей неопределённостью, чем V или θ_0 .

Такой выбор границ даёт исключение возможных нерелевантных решений, способных

возникнуть в глобальной оптимизации, и ограничение программы в возможности затронуть область параметров, противоречащую свойствам оптического тракта.

Для численной верификации рабочей формулы (9) использовались литературные экспериментальные данные, отражающие радиационно-индуцированные изменения в волоконных Брэгговских решётках. В качестве базы были привлечены результаты измерений работ «Radiation Response of Fiber Bragg Gratings at Different Doses and Temperatures» Cumberland [6] (как исходные наборы данных) и обзорные данные Morana [4]. Указанные работы предоставляют как конкретные значения смещения Брэгговской длины волны и изменений параметров поляризационных характеристик при различных дозах облучения, так и усреднённые оценки диапазонов вариации основных параметров модели.

На основе этих данных были выбраны два характерных набора исходных условий и соответствующих им значений параметров (присвоение экспериментальных значений параметрам модели выполнялось по ранее указанным формулам (10), (11) и (12)) и восстанавливаемых, систематизированных в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные.

	Набор данных №1	Набор данных №2
Доза, кГр	0,1	300
$\Delta\lambda$, пм	750	150
$I_{\text{Бг}}$	0,6	0,8
V	0,36	0,63
θ_0	280°	57°
$I_{\perp}$	0,06	0,04
$I_{\text{БгВосст}}$	0,75	0,95
$V_{\text{Восст}}$	0,21	0,78
$\theta_{0\text{Восст}}$	283,14	60,14
$I_{\perp\text{Восст}}$	0,058	0,042

Для каждого набора данных при двух различных значениях уровня шума ($\sigma=0.02$ и $\sigma=0.03$) были получены результаты верификационной модели, занесенные в таблицу 2 и таблицу 3 для первого и второго наборов соответственно.

Таблица 2. Результаты верификационной модели для набора данных №1.

Уровень шума σ	S	S ожидаемое	χ^2
0,02	0,0572	0,0392	1,459184
	0,036431		0,929362

	0,042619		1,087219		0,089402		1,013628
	0,043681		1,114311		0,115361		1,307948
	0,034893		0,890128		0,09872		1,119274
	0,039655		1,011607		0,107414		1,217846
	0,040253		1,026862		0,073946		0,83839
	0,033016		0,842245		0,086362		0,979161
	0,052573		1,341148		0,090744		1,028844
	0,042565		1,085842		0,07245		0,821429
	0,031207		0,796097		0,075568		0,85678
	0,039561		1,009209		0,083071		0,941848
	0,031633		0,806964		0,090957		1,031259
	0,045574		1,162602		0,099844		1,132018
	0,036915		0,941709				
	0,042961		1,095944				
	0,0339		0,864796				
	0,040957		1,044821				
	0,028473		0,726352				
	0,042154		1,075357				
	0,03217		0,820663				
	0,042672		1,088571				
	0,042619		1,087219				
	0,03957		1,009439				
	0,037976		0,968776				
	0,041906		1,069031				
	0,04593		1,171684				
	0,03231		0,824235				
	0,042282		1,078622				
	0,04032		1,028571				
0,03	0,099226	0,0882	1,125011		0,039029	0,0392	0,995638
	0,086444		0,980091		0,037498		0,956582
	0,067082		0,760567		0,047757		1,218291
	0,081421		0,923141		0,039964		1,01949
	0,074826		0,848367		0,038912		0,992653
	0,096805		1,097562		0,037349		0,952781
	0,09843		1,115986		0,044786		1,1425
	0,077842		0,882562		0,04077		1,040051
	0,084077		0,953254		0,044103		1,125077
	0,085893		0,973844		0,047266		1,205765
	0,086247		0,977857		0,053386		1,361888
	0,098358		1,11517		0,03926		1,001531
	0,07859		0,891043		0,032239		0,822423
	0,088566		1,00415		0,035834		0,914133
	0,088488		1,003265		0,051006		1,301173
	0,09275		1,051587		0,04087		1,042602
	0,099638		1,129683		0,041208		1,051224
	0,099311		1,125975		0,035092		0,895204
					0,033351		0,850791
					0,038524		0,982755
					0,042606		1,086888
					0,033383		0,851607
					0,040898		1,043316
					0,045577		1,162679
					0,037691		0,961505
					0,049389		1,259923
					0,046961		1,197985
					0,032373		0,825842
					0,034442		0,878622

Таблица 3. Результаты верификационной модели для набора данных №2.

Уро- вень шума σ	S	S ожида- емое	χ^2
0,02	0,039029	0,0392	0,995638
	0,037498		0,956582
	0,047757		1,218291
	0,039964		1,01949
	0,038912		0,992653
	0,037349		0,952781
	0,044786		1,1425
	0,04077		1,040051
	0,044103		1,125077
	0,047266		1,205765
	0,053386		1,361888
	0,03926		1,001531
	0,032239		0,822423
	0,035834		0,914133
	0,051006		1,301173
	0,04087		1,042602
	0,041208		1,051224
	0,035092		0,895204
	0,033351		0,850791
	0,038524		0,982755
	0,042606		1,086888
	0,033383		0,851607
	0,040898		1,043316
	0,045577		1,162679
	0,037691		0,961505
	0,049389		1,259923
	0,046961		1,197985
	0,032373		0,825842
	0,034442		0,878622

	0,035317		0,900944
0,03	0,09589	0,0882	1,087188
	0,064546		0,731814
	0,016669		0,188991
	0,084677		0,960057
	0,068446		0,776032
	0,082651		0,937086
	0,082196		0,931927
	0,080444		0,912063
	0,078352		0,888345
	0,086963		0,985975
	0,089808		1,018231
	0,09267		1,05068
	0,09643		1,093311
	0,085906		0,973991
	0,102135		1,157993
	0,096184		1,090522
	0,105303		1,193912
	0,082125		0,931122
	0,077302		0,87644
	0,059714		0,677029
	0,092153		1,044819
	0,092859		1,052823
	0,119714		1,357302
	0,099583		1,129059
	0,108749		1,232982
	0,101428		1,149977
	0,073917		0,838061
	0,09629		1,091723
	0,09717		1,101701
	0,077227		0,87559

Заключение

В результате проведённого исследования была успешно разработана теоретическая модель описания интенсивности света для оптоволоконных датчиков на основе волоконных Брэгговских решёток, работающих в условиях радиационного воздействия. Модель представляет собой обобщение закона Малюса для частично поляризованного и спектрально-широкополосного излучения, выражена в компактной аналитической форме (9), учитывающей спектральные свойства источника и фазовые сдвиги, вызванные радиационными-индуцированными эффектами.

Выявлены прямые количественные связи между параметрами модели и радиационными

эффектами в оптическом волокне.

Реализованная численная верификация показала, что предложенная аналитическая модель успешно воспроизводит поведение исследуемых систем. Использование Excel-модели с модулем Solver позволило воспроизвести параметры, извлечённые из литературных источников, с высокой степенью совпадения с теоретическими значениями. Распределения суммы квадратов невязок и критерия среднеквадратичной ошибки, демонстрирующие близость к ожидаемым показателям, показывают адекватность отражения моделью экспериментальных данных.

Разработанная модель представляет практическую ценность для проектирования и эксплуатации оптоволоконных систем мониторинга и диагностики в ядерной энергетике, позволяя количественно оценивать радиационно-индуцированные деградационные процессы в датчиках и прогнозировать их работоспособность в условиях высоких доз облучения. Полученные результаты создают основу для разработки новых методик контроля состояния волоконно-оптических систем в радиационно опасных средах.

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики : пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1973. – 720 с.
2. Гудман Дж. В. Статистическая оптика : пер. с англ. – М. : Физматлит, 2009. – 576 с.
3. Темкина М. Ю., Алексеев А. А., Гаврилов А. С. Поляризационные методы диагностики оптоволоконных датчиков // Измерительная техника. – 2023. – № 7. – С. 15–23. DOI: 10.3103/S0205177923070045
4. Morana A., Ouerdane Y., Cannas M., Girard S. Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 6. – P. 1–23. DOI: 10.3390/s20061582
5. Сошников Ю. В., Сидоров Д. А. Математическое моделирование и численные методы : учебное пособие. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – 384 с. – ISBN 978-5-7038-5450-9
6. Cumberland B., Gusarov A., Gusarov S., Williams D., Girard S. Radiation Response of Fiber Bragg Gratings at Different Doses and Temperatures // NIST Technical Note. – 2017. – No. 2079. – P. 1–38.

References

1. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Principles of Optics]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1973, 720 p. (In Russ.)
2. Goodman J.W. *Statisticheskaya optika* [Statistical Optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 576 p. (In Russ.)

- Russ.)
3. Temkina M.Yu., Alekseev A.A., Gavrilov A.S. Polarization methods for diagnostics of fiber-optic sensors. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2023, No. 7, pp. 15–23. DOI: 10.3103/S0205177923070045 (In Russ.)
 4. Morana A., Ouerdane Y., Cannas M., Girard S. Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies. *Sensors*, 2020, Vol. 20, No. 6, pp. 1–23. DOI: 10.3390/s20061582.
 5. Soshnikov Yu.V., Sidorov D.A. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical Modeling and Numerical Methods]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020, 384 p. ISBN 978-5-7038-5450-9. (In Russ.)
 6. Cumberland B., Gusarov A., Gusarov S., Williams D., Girard S. Radiation Response of Fiber Bragg Gratings at Different Doses and Temperatures. *NIST Technical Note*, 2017, No. 2079, pp. 1–38.

УДК 53.082.531:697.92

Измерение параметров вибрации систем промышленной вентиляции

А.А. Коренькова¹, А.А. Рачицкая¹, В.А. Нурзай¹, А.В. Мостовщиков²,
Ф.А. Губарев¹

¹ Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, 299015, Россия,
email: VANurzai@sevsu.ru

² Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003, Россия

Статья поступила 07.10.2025 г.; после доработки 08.10.2025 г.

Аннотация

В работе представлены результаты разработки методики бесконтактного оптического мониторинга вибрации воздуховодов систем вентиляции. В работе рассмотрено одновременное применение в процессе контроля двух методов неразрушающего контроля вибрационного состояния: бесконтактного метода корреляции лазерных спеклов и квазибесконтактного фотомодуляционного метода с использованием голографических плёнок. Методика контроля апробирована на системе вентиляции химической учебной лаборатории. Проведены экспериментальные исследования колебаний горизонтального пролёта воздуховода при закрытии воздушной заслонки воздуховода и при пуске и останове двигателя вентилятора. Получены графики визуализации переходных колебательных процессов и частотные спектры колебаний. Сделан вывод о возможности применения обоих оптических методов для контроля колебаний систем вентиляции.

Ключевые слова: вибрационный контроль, вибрация воздуховодов, вентиляция, колебания вентиляционных систем, корреляция лазерных спеклов, оптический контроль, параметры вибрации, фотомодуляционный метод.

Measurement of vibration parameters of industrial ventilation systems

A.A. Koren'kova¹, A.A. Rachickaya¹, V.A. Nurzai¹, A.V. Mostovshchikov²,
F.A. Gubarev¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, 299015, Russia, VANurzai@sevsu.ru author affiliation

² Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Solyanaya sq., 2, 634003, Russia

Received 07.10.2025 y.; received in final form 08.10.2025 y.

Abstract

The paper presents the results of developing a contactless optical monitoring technique for ventilation system air duct vibration. The paper considers the simultaneous application of two non-destructive vibration testing methods in the process of monitoring: a contactless laser speckle correlation method and a quasi-contactless photomodulation method using holographic films. The monitoring technique was tested on a chemical educational laboratory ventilation system. Experimental studies of horizontal duct span vibrations were conducted when the air duct damper was closed and when the fan motor was started and stopped. Graphs of transient vibrational processes visualization and vibration frequency spectra were obtained. A conclusion was made about the possibility of using both optical methods to monitor ventilation system vibrations. Using the developed technique, it is possible to estimate both the vibration frequencies of the structure and transient processes during hydraulic shocks.

Keywords: vibration control, air duct vibration, ventilation, ventilation system vibrations, laser speckle correlation, optical control, vibration parameters, photomodulation method.

Введение

Вибрации систем вентиляции являются негативными производственными факторами. На сайте проектного бюро архитектуры и дизайна [1] обозначены основные требования к виброзащите при проектировании систем вентиляции. Отмечается, что для подбора оптимальной виброзащиты важно учитывать частоту и амплитуду колебаний, которые создаются оборудованием. Обычно для низкочастотных вибраций выбирают массивные пружинные амортизаторы, а для высокочастотных – материалы с демпфирующими свойствами. Работа [2] посвящена вопросу снижения вибрации как вредного производственного фактора. В работе представлен типовой расчет виброизоляции опор вентилятора системы вентиляции, установленного на сварочном посту механического участка. На государственном уровне, нормы по вибрации воздуховодов устанавливаются управлением Роспотребнадзора и санитарно-эпидемиологической службой [3, 4].

В статье [5] указывается, что системы кондиционирования и вентиляции создают шум интенсивностью до 75 дБ, но на отдельных частотах уровни давления составляют 80–95 дБ. Даже краткосрочные воздействия инфразвука такой интенсивности вызывают процессы торможения в центральной нервной системе (снижение зрительно-моторных реакций, концентрации внимания, скорости выполнения простых задач). В статье [6] представлен перечень возможных вредных эффектов, оказываемых на организм человека длительным воздействием инфразвука. В частности, указывается, что инфразвуковые частоты от 0,1–10 Гц являются резонансными для внутренних органов человека и могут вызывать боли в желудке, кишечнике, в сердце, суставах. Частоты от 10 Гц до 30 Гц вызывают целый комплекс различных заболеваний.

Проблемы влияния инфразвука на человека широко освещены в российской науке [7, 8], озвучены актуальные задачи по минимизации вредного влияния инфразвука на человека, доказаны побочные эффекты длительного воздействия на различные органы и системы. В книге [9] рассматривается психоакустический эффект, оказываемый на человека, вибрациями и шумами систем вентиляции с воздуховодами. Предлагаются базовые методы прогнозирования и контроля шумов и вибраций. Таким образом, является актуальным определение частот и уровней вибрации от систем вентиляции, находящихся в непосредственной близости от человека

и оказывающих воздействие в течение длительного времени.

В статье [10], представленной на сайте производителя вентиляционных систем, предложено использование пружинных и резиновых виброизоляторов с целью гашения вибрации воздуховодов. Различаются способы передачи вибрации на человека: общая вибрация передается через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека; локальная вибрация передается через руки человека или отдельные участки тела, контактирующие с вибрирующим инструментом, а также через ноги сидящего человека.

В статье [11] внимание уделяется анализу колебаний кожуха радиального вентилятора, которые во время работы машины, особенно в переходных режимах, очень сильны. В ходе серии исследований, проведенных в соответствии с экспериментальным модальным анализом, были определены собственные частоты колебаний кожуха вентилятора. Дополнительные численные моделирования помогли определить теоретические значения собственной частоты колебаний и их формы.

В статье [12] рассмотрена система контроля вибрации туннельных воздуховодов, которая получила название ZJET. Утверждается, что разработанная система может заменить и превзойти по производительности дорогостоящее портативное оборудование для измерения вибрации, анализаторы и сборщики данных, предоставляемые такими эталонными компаниями, как ADASH [13] или IFM [14].

В работе [15] показано, что регулирующая способность воздушных заслонок связана с сопротивлением всей системы воздуховодов. Рабочая характеристика расхода воздушной заслонки варьируется в зависимости от системы воздуховодов, что сильно влияет на эффективность управления заслонкой. Таким образом, изменение положения воздушной заслонки приводит к вибрационному отклику по всей длине воздуховодов системы вентиляции. Изменяется профиль распределения скоростей и завихрений потока, что приводит к деформациям поверхностей жестяных стенок воздуховодов. Это изменение может быть зафиксировано бесконтактными оптическими методами измерения.

К бесконтактным методам контроля вибрации, применяемым в производственных процессах контроля и диагностики, относится метод корреляции лазерных спеклов [16], который в работах [17, 18] успешно использовался для вери-

фикации фотомодуляционного метода при измерении частоты вибрации тестовых объектов и мониторинге протяженной конструкции (автомобильного моста).

Постановка задачи

Исследование возможности проведения оптического контроля колебаний элементов системы вентиляции и фиксации колебаний на низких частотах с использованием бесконтактного метода корреляции лазерных спеклов и квазибесконтактного фотомодуляционного метода, и разработка дистанционных оптических методик контроля вибрации воздуховодов на основе указанных методов.

Описание исследования

Работа предполагала экспериментальные исследования, которые были выполнены с применением реальной работающей системы вентиляции помещения (химическая учебная лаборатория). В ходе экспериментов фиксировались переходные процессы закрытия воздушной заслонки, пуска и останова радиального вентилятора.

При применении метода корреляции лазерных спеклов исследуемая область подсвечивалась твердотельным зеленым лазером мощностью 200 мВт с длиной волны 532 нм. Для фотомодуляционного метода, в области интереса на трубопровод наклеивалась голографическая пленка, изменение цветности которой регистрировалось камерой в цифровом виде. После чего проводилась математическая обработка изображений и анализ результатов.

Исследуемая система представляла собой объединенную сеть, состоящую из радиального вентилятора ВЦ4-75-№4 с прямым соединением с электродвигателем АИРМ63В6У2 (рис. 1), центрального воздуховода сечением 400×300 мм, проложенного с крыши 4-этажного здания по фасаду, и разветвлений внутри помещения на 3-м этаже. Вентилятор соединен с воздуховодом через гибкую вставку, что должно способствовать уменьшению передаваемой вибрации. Центральный воздуховод проходит в окно 3-го этажа и в помещении разделяется на четыре вертикальных участка сечением 200×200 мм, включающими в себя воздушные заслонки для перекрытия потока и оканчивающиеся вытяжными зонтами. Открытие (закрытие) заслонок регулируется вручную.

В ходе проведения экспериментов проводи-

лись замеры на центральном пролёте воздуховода – длинный участок 400×300 мм (в помещении). Схема проведения испытаний и фотографии контролируемых участков системы вентиляции приведены на рис. 1.

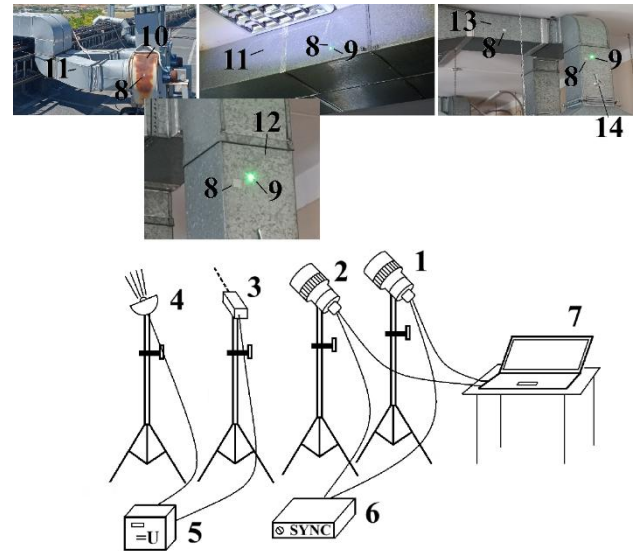


Рис. 1. Схема эксперимента

Цифровая видеокамера технического зрения Basler acA1440-220uc с объективом Canon Macro100mm (1) использовалась для фиксации вибрации фотомодуляционным методом. Цифровая видеокамера технического зрения НIKROBOT MV-CS004-10UM с объективом Fotorox 420-800mm F/8.3-16 (2) использовалась для реализации лазерных спеклов. Процесс съемки был синхронизирован генератором (3). Информация с цифровых видеокамер передавалась в ноутбук (4) для сохранения данных и дальнейшей обработки. Твердотельный зелёный лазер (5) и источник белого света (6), исключая мерцание, были запитаны от трансформаторного источника напряжения (7). Источник освещения использовался для дополнительной подсветки фрагментов голографической плёнки (8), в непосредственной близости располагался лазерный луч (9). Источником вибрации является радиальный вентилятор (10), расположенный на крыше здания, соединенный с центральным воздуховодом (11). В помещении, непосредственно, расположены вертикальная часть воздуховода (12) и воздуховод среднего размера (13). Лазерный луч направлялся в область интереса на поверхность трубы, исключая попадания на голографическую плёнку. Режимы работы системы вентиляции изменялись вручную посредством воздушных заслонок (14).

На рис. 2 представлены графики визуализации колебаний центрального пролёта воздуховода при закрытии воздушной заслонки. Размах смещения и приведённой интегральной яркости синего канала изображений для центрального пролёта воздуховода при закрытии воздушной заслонки составил 583 пикселя для лазерного метода и 39 бит для фотомодуляционного метода, соответственно.

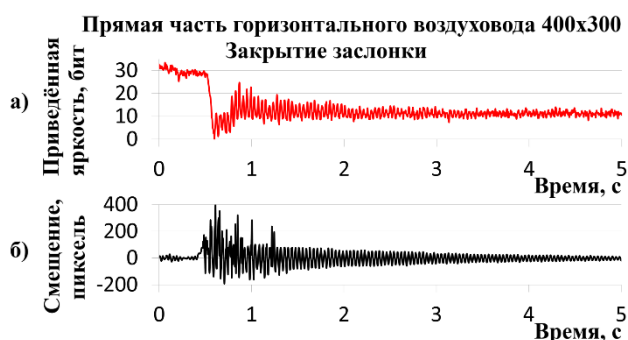


Рис. 2. Визуализация колебаний центрального пролёта воздуховода при закрытии воздушной заслонки. а – фотомодуляционный метод, б – метод корреляции лазерных спеклов

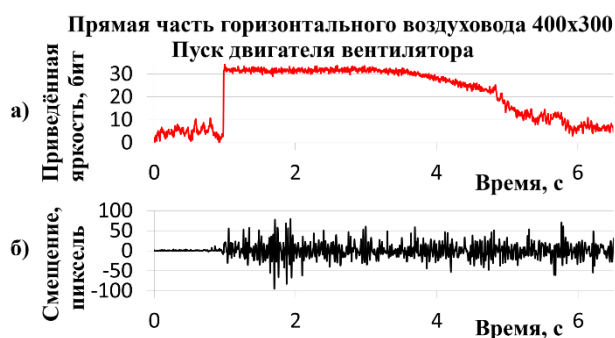


Рис. 3. Визуализация колебаний центрального пролёта воздуховода, при пуске двигателя вентилятора. а – фотомодуляционный метод, б – метод корреляции лазерных спеклов

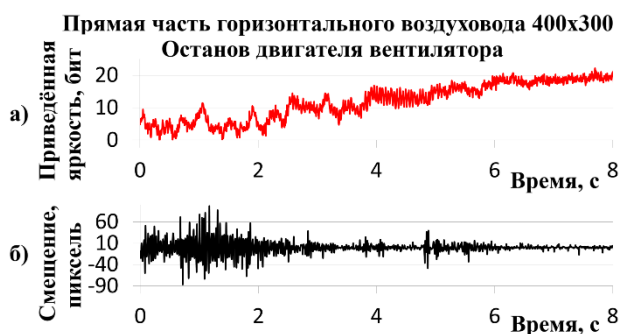


Рис. 4. Визуализация колебаний центрального пролёта воздуховода, при останове двигателя вентилятора. а – фотомодуляционный метод, б – метод корреляции лазерных спеклов

Размах смещения и приведённой интегральной яркости для центрального пролёта воздуховода при пуске двигателя составил 183 пикселя для лазерного метода 24,9 бит для фотомодуляционного метода соответственно. Размах смещения и приведённой интегральной яркости для центрального пролёта воздуховода при останове двигателя (рис. 3) составил 174 пикселя для лазерного метода и 34,2 бит для фотомодуляционного метода, соответственно.

Обработка и анализ данных

В данном разделе представлены результаты частотной обработки данных мониторинга элементов системы вентиляции при закрытии воздушной заслонки (рис. 5), а также децимированные графики колебательных процессов для всего периода измерений, полученные фотомодуляционным методом (рис. 6–8). Децимация произведена усреднением за период с коэффициентом 1/100 в один этап.



Рис. 5. Частотный анализ колебаний центрального пролёта воздуховода при закрытии воздушной заслонки

Результаты, полученные обоими методами, представлены в одном частотном диапазоне в виде графиков частотного спектра колебаний после быстрого преобразования Фурье (рис. 5). Граничная частота принята равной 100 Гц. Данные, полученные фотомодуляционным методом, отображены красной (серой в печатном варианте) пунктирной кривой. Данные, полученные методом лазерных спеклов, отображены сплошной черной кривой.

На рис. 6–8 красной кривой (квадратные маркеры) отображены усреднённые за период значения колебаний яркости, зелёной кривой (треугольные маркеры) показан максимальный размах за период.

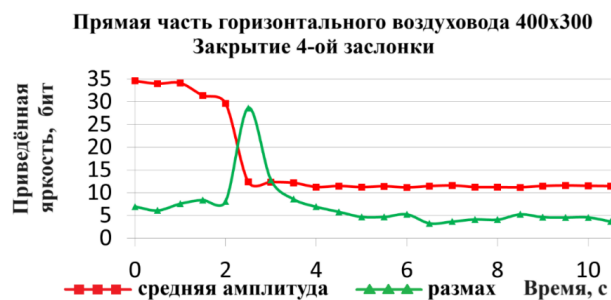


Рис. 6. Усреднённые параметры вибрации центрального пролёта воздуховода при закрытии воздушной заслонки

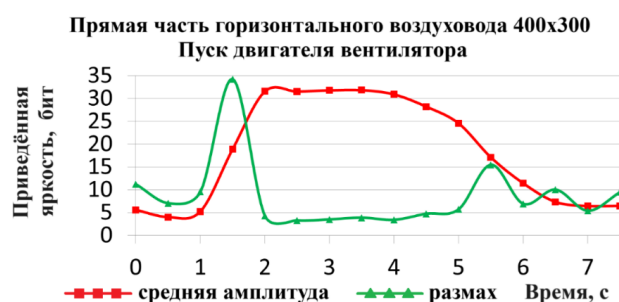


Рис. 7. Усреднённые параметры вибрации центрального пролёта воздуховода при пуске двигателя

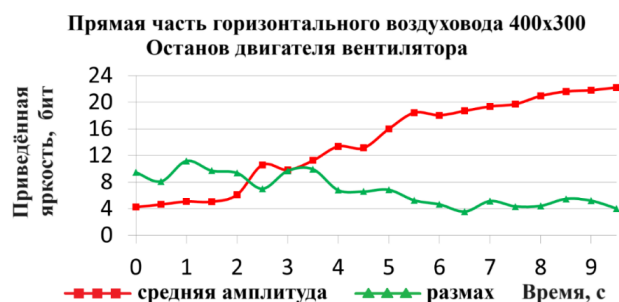


Рис. 8. Усреднённые параметры вибрации центрального пролёта воздуховода при останове двигателя

Заключение

В ходе эксплуатации систем вентиляции возникают вибрации воздухопроводов, находящихся в помещениях в непосредственной близости от персонала. Частотный спектр и амплитуда колебаний зависят от режима работы, автоколебаний системы, переходных режимов машин и механизмов. Длительное воздействие инфразвукового спектра вибраций на человека оказывает вредное влияние на органы и системы, может приводить к локальному ухудшению самочувствия и устойчивым заболеваниям. Для помещений различного типа существуют нормативы по инфразвуковому шуму, который, в свою очередь, слабо подвержен гашению различными преградами и может передаваться на большие

расстояния. Таким образом, периодический мониторинг вибрационного состояния систем вентиляции позволит своевременно изучить частотный спектр, определить степень его влияния и принять решения по минимизации воздействия на человека.

В ходе работы были проведены эксперименты по одновременному применению двух методов оптического неразрушающего контроля вибрации элементов систем вентиляции: метода лазерной спекл-корреляции и фотомодуляционного метода с использованием голографических плёнок. Экспериментально исследованы переходные процессы вибраций горизонтального участка воздуховода в помещении, получены экспериментальные данные. Выполнена цифровая обработка результатов мониторинга двумя методами, выполнен спектральный анализ колебаний трубопроводов, построены графики.

Информация об отклонениях вибрационного состояния от стационарного может быть получена как при анализе формы и относительной амплитуды колебаний, так и при фиксации изменений в частотном диапазоне.

Эксперименты показали высокую корреляцию результатов, полученных фотомодуляционным методом и методом лазерных спеклов, а также возможность использования обоих методов для мониторинга вибрационного состояния систем вентиляции. При этом, фотомодуляционный метод может использоваться для мониторинга как самостоятельно, так и совместно с методом лазерных спеклов.

На основе полученных данных возможно создание автоматизированной системы вибрационного контроля, способной безаварийно функционировать в условиях производств длительное время, не допускать ложных срабатываний и выдавать предупредительные сигналы при фиксации изменений параметров вибрации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект: «Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии для устойчивого развития инфраструктуры территории Крайнего Севера и Арктики» (шифр FEMN-2022-0003).

Список литературы

1. Требования к виброзащите при проектировании вентиляции / Проектное бюро архитектуры и дизайна Energy Systems. – Режим доступа: <https://energy-systems.ru/main-articles/inzhenernye-sistemy/trebovaniya-k->

- vibrozaschite-pri-proektirovanii-ventilyatsii
2. Кузьмина О.В. Расчет виброизоляции опор системы вентиляции / О.В. Кузьмина, С.В. Янчий // Вестник науки и творчества. – 2016. – С. 156–159. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-vibroizolyatsii-opor-sistemy-ventilyatsii>
3. СН 2.2.4/2.1.8.583-96 Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки. – Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/e45/4294851486.pdf>
4. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71362000/>
5. Волошин И. Вредные и опасные факторы производственной среды: инфразвук – «тихий» убийца // ООО «КИОУТ». – 2021. Режим доступа: <https://www.kiout.ru/info/publish/24151?ysclid=m2zba0wx3f30250281>
6. Ихлов Б.Л. Инфразвук, микроволны и профилактика заболеваний // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 2. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26194>
7. Зинкин В.Н. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука / В.Н. Зинкин, С.К. Солдатов, А.В. Богомолов, С.П. Драган // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – Т. 12, № 1 (43). – С. 91–96.
8. Нехорошев А.С. Санитарно-эпидемиологический надзор за источниками инфразвука и эффективностью мероприятий по профилактике его воздействия на организм работающих: Учебное пособие. – ГОУВПО Санкт-Петербургская ГМА им. И.И. Мечникова ФАЗСР, 2016. – 85 с.
9. Mak C.M. Prediction and control of noise and vibration from ventilation systems / C.M. Mak, K.W. Ma, H.M. Wong. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 156 p.
10. Завод вентиляции Вентпром: Главная – Статьи – Вентиляция помещений – Вибрация в системах вентиляции и виброизоляторы. – Режим доступа: <https://wentprom.ru/articles/ventilyatsiya-pomeshcheniy/vibratsiya-v-sistemakh-ventilyatsii-i-vibroizolyatory/>
11. Rusiński, E., Moczko, P., Odyjas, P. et al. Investigation of vibrations of a main centrifugal fan used in mine ventilation // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 14. – P. 569–579.
12. Real-time monitoring solution with vibration analysis for industry 4.0 ventilation systems / R. Muñoz, F. Nuño, J. Díaz, M. González, M. J. Prieto, Ó. Menéndez // The Journal of Supercomputing. – 2023. – Vol. 79. – P. 6203–6227.
13. Adash spol. s r.o. Vibration analyzers and condition monitoring. – Available at: <https://adash.com/> (accessed 12.11.2024).
14. IFM efector, inc. Products. – Available at: <https://www.ifm.com/us/en> (accessed 12.11.2024).
15. Shihao Wen, Ran Gao, Hongming Guan, Haimeng Li, Meng Wang, Sikai Zhang, Angui Li // Air damper with Controlling Capacity Unrelated to duct system resistance // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 43. – Art. no. 102388.
16. Елугачев П.А. Применение технологии флопов в техническом зрении киберфизических систем для диагностики автодорожных мостов / П.А. Елугачев, Ф.А. Губарев, А.А. Банников, А.В. Мостовщиков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, No 2. – С. 191–206.
17. Нурзай В.А. Применение оптических методов визуализации для контроля колебаний мостовых дорожных конструкций / В.А. Нурзай, Ф.А. Губарев, П.А. Елугачев, А.В. Мостовщиков // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27, No 8. – С. 42–49.
18. Нурзай В.А. Оптические методы измерения перемещений для контроля вибрации технологического оборудования / В.А. Нурзай, Ф.А. Губарев, В.А. Лей // Системы контроля окружающей среды. – 2024. – Вып. 55. – С. 118–129.

References

1. Requirements for vibration protection in the design of ventilation. *Proektnoe byuro arhitektury i dizajna Energy Systems* [Bureau of Architecture and Design Energy Systems], Available at: <https://energy-systems.ru/main-articles/inzhenernye-sistemy/trebovaniya-k-vibrozaschite-pri-proektirovanii-ventilyatsii> (accessed: 15.11.2024).
2. Kuz'mina O.V., Yanchij S.V. Calculation of vibration insulation of the support systems of the ventilation system. *Vestnik nauki i tvorchestva*, 2016, pp. 156–159 Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-vibroizolyatsii-opor-sistemy-ventilyatsii> (accessed: 15.11.2024).
3. SN 2.2.4/2.1.8.583-96 Infrasound at workplaces, in residential and public premises and on the territory of housing. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/e45/4294851486.pdf> (accessed: 15.11.2024).
4. SanPiN 2.2.4.3359-16 Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in workplaces. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71362000/> (accessed: 15.11.2024).
5. Voloshin I. Harmful and dangerous factors of the production environment: infrasound - “quiet” killer. *ООО «КИОУТ»*, 2021, Available at: <https://www.kiout.ru/info/publish/24151?ysclid=m2zba0wx3f30250281> (accessed: 15.11.2024).
6. Ihlov B.L. Infrasound, microwaves and diseases pre-

- vention. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2017, No. 2, Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26194> (accessed: 12.11.2024).
7. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Bogomolov A.V., Dragan S.P. Actual problems of the protection of the population from low -frequency noise and infrasound. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Civil security technologies], 2015, Vol. 12, No. 1 (43), pp. 91–96.
 8. Nekhoroshev A.S. Sanitary and epidemiological supervision of infrasound ischy and the effectiveness of the prevention of its effects on the body of working. *Sankt-Peterburgskaya GMA im. I.I. Mechnikova*, 2016, 85 p.
 9. Mak C.M. Prediction and control of noise and vibration from ventilation systems. C.M. Mak, K.W. Ma, H.M. Wong. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 156 p.
 10. Vibration in ventilation systems and vibro-valves. *Zavod ventilyacii Ventprom* [Ventilation Ventilation Plant] Available at: <https://wentprom.ru/articles/ventilyatsiya-pomeshcheniy/vibratsiya-v-sistemakh-ventilyatsii-i-vibroizolyatory/> (accessed: 12.11.2024).
 11. Rusiński, E., Moczko, P., Odyjas, P. et al. Investigation of vibrations of a main centrifugal fan used in mine ventilation // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol. 14. – P. 569–579.
 12. Real-time monitoring solution with vibration analysis for industry 4.0 ventilation systems / R. Muñiz, F. Nuño, J. Díaz, M. González, M. J. Prieto, Ó. Menéndez // *The Journal of Supercomputing*. – 2023. – Vol. 79. – P. 6203–6227.
 13. Adash spol. s r.o. Vibration analyzers and condition monitoring. – Available at: <https://adash.com/> (accessed 12.11.2024).
 14. IFM efector, inc. Products. – Available at: <https://www.ifm.com/us/en> (accessed 12.11.2024).
 15. Shihao Wen, Ran Gao, Hongming Guan, Haimeng Li, Meng Wang, Sikai Zhang, Angui Li // Air damper with Controlling Capacity Unrelated to duct system resistance // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 43. – Art. no. 102388.
 16. Elugachev P.A., Gubarev F.A., Bannikov A.A., Mostovshchikov A.V. The use of flop technology in the technical vision of cyberphysical systems for the diagnostician of road bridges *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State Architectural and Construction University], 2023, Vol. 25, No 2, pp. 191–206.
 17. Nurzai V.A., Gubarev F.A., Elugachev P.A., Мостовщиков А.В. The use of optical visualization methods to control vibrations of bridge road structures. *Control. Diagnostics*, 2024, Vol. 27, No 8, pp. 42–49.
 18. Nurzai V.A., Gubarev F.A., Lej V.A. Optical methods for measuring movements to control the vibration of technological equipment. *Environmental control systems*, 2024, No. 55, pp. 118–129.

УДК: 62-192:681.51

Анализ работоспособности и метод расчета эксплуатационной надежности систем диагностирования СКУ на базе платформы ТПТС

Кузнецова Н.И.¹, Серова-Нашева Н.В.¹, Губина Е.Д.¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия,
e-mail: nikuznetsova@mail.sevsu.ru, nvserovanasheva@mail.sevsu.ru, edgubina@mail.sevsu.ru

Статья поступила 13.10.2025 г.; после доработки 14.10.2025 г.

Аннотация

Статья посвящена исследованию работоспособности и эксплуатационной надежности систем диагностирования систем контроля и управления (СКУ) на базе платформы ТПТС, которые широко применяются, в настоящий момент, на предприятиях атомной промышленности. Системы диагностирования СКУ АЭС на базе платформы ТПТС играют важнейшую роль в эксплуатации энергоблоков, а именно поиск и определение причин возникновения отказов оборудования автоматизации. Технические комплексы систем автоматизации характеризуются количественными показателями надежности. В статье определены количественные показатели надежности функционально-логической схемы, с применением метода повышения надёжности – резервирования. Предлагается решение задачи: повышение надежности систем диагностирования за счет резервирования, а также своевременно производить модернизацию оборудования систем автоматизации.

Ключевые слова: резервирование, система диагностирования, ТПТС, надежность, СКУ АЭС.

Performance analysis and method for calculating the operational reliability of control and monitoring system diagnostic systems based on the TPTS platform

Kuznetsova N.I.¹, Serova-Nasheva N.V.¹, Gubina E.D.¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia,
e-mail: nikuznetsova@mail.sevsu.ru, nvserovanasheva@mail.sevsu.ru, edgubina@mail.sevsu.ru

Received 13.10.2025 y.; received in final form 14.10.2025 y.

Abstract

This article examines the performance and operational reliability of diagnostic systems for control and monitoring systems (CMS) based on the TPTS platform, which are currently widely used in the nuclear industry. NPP CMS diagnostic systems based on the TPTS platform play a crucial role in the operation of power units, specifically identifying and determining the causes of automation equipment malfunctions. Automation system technical complexes are characterized by quantitative reliability indicators. This article defines quantitative reliability indicators for a functional-logical diagram using a reliability-enhancing method—redundancy. A proposed solution is to increase the reliability of diagnostic systems through redundancy and to timely modernize automation system equipment.

Keywords: redundancy, diagnostic system, TPTS, reliability, NPP CCS.

Введение

Опыт эксплуатации АЭС показывает, что проблема безопасности – проблема потенциально возможных, маловероятных аварий по причине отказа технических систем и ошибок

персонала.

Последнее, в свою очередь, зависит от надежности всех элементов, входящих в её состав. Для поддержания системы в работоспособном состоянии необходимо регулярное проведе-

ние технического обслуживания и ремонтов оборудования, периодичность которых определяется его техническим состоянием. Именно поэтому анализ технического состояния и оценка работоспособности основных элементов при диагностировании является актуальной задачей [1-5].

Типовые программно-технические средства (ТПТС) на данный момент имеют широкое применение на АЭС в разных странах мира, реализуя различного вида функции для обеспечения автоматизации технологического процесса.

Система в своем составе имеет функцию самодиагностики, что позволяет незамедлительно зафиксировать отказы оборудования автоматики определить место и причину их возникновения. Современные ТПТС со встроенной функцией самодиагностики, дают возможность повысить уровень безопасности АЭС, так и обеспечить высокую точность обнаружения причинно-следственных связей отказов оборудования автоматизации АЭС.

Так как вышеперечисленные средства диагностирования обеспечивают надежный контроль и безопасность эксплуатации средств СКУ, поэтому они сами должны иметь высокие показатели надежности и работоспособности.

Изложение основного материала исследования

Анализ работоспособности проводится с целью оптимизации планов проведения ремонтных работ и предусматривает оценку общего технического состояния оборудования СКУ, выявление элементов, узлов, снижающих надежность оборудования.

Анализ технического состояния оборудования проводится в три этапа:

На первом этапе производится описание диагностируемого объекта. После подготовки необходимой информации производится построение математической модели объекта; определение наиболее значимых параметров, подходящих на роль диагностических признаков и оценка диапазона допустимых значений ДП. Создается диагностическая модель (ДМ) объекта.

На втором этапе происходит сбор и обработка измерительной информации с использованием полученной диагностической модели контролируемого объекта, в результате которого ставится диагноз о техническом состоянии объекта.

На третьем этапе производится прогнозирование остаточного ресурса.

Средства самодиагностирования ТПТС выполняют всеобъемлющий контроль исправности элементов, входящих в систему. В случае возникновения ошибки происходит её обнаружение и выдача соответствующей информации на панелях щитов управления, а также на самих модулях. Если стойка резервирована, то происходит переключение на резервный модуль.

В результате анализа формируется оценка работоспособности, на основании которой прогнозируется остаточный ресурс, а также, при необходимости, корректируются стратегии проведения ТОиР.

На следующем рис.1 представлена схема процедуры диагностирования.

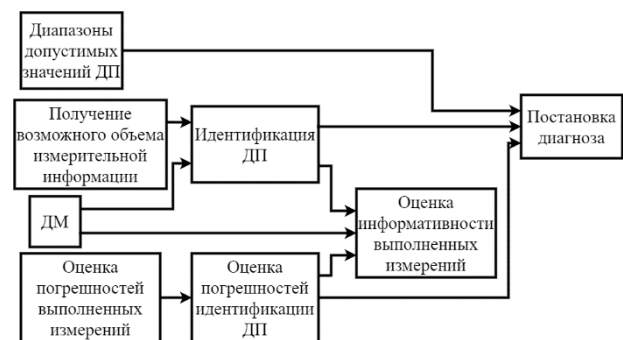


Рис. 1. Схема процедуры диагностирования.

Отдельного внимания заслуживает выбор диагностических признаков. При их выборе необходимо учитывать следующее:

- В качестве диагностических признаков должны быть выбраны те параметры, изменение которых больше всего влияют на изменение рабочих функций объекта;
- Наличие достаточного количества контрольных точек для проведения диагностирования;
- Возможность построения достаточно точных математической и диагностической моделей.

В результате анализа формируется оценка работоспособности, на основании которой прогнозируется остаточный ресурс, а также, при необходимости, корректируются стратегии проведения ТОиР.

Вывод о работоспособности объекта может быть сделан на основании субъективных и объективных методов оценки.

Под субъективными методами оценки работоспособности подразумеваются методы, при которых для сбора данных о состоянии оборудования используются органы чувств человека. При этом для анализа используется

аналитико-мыслительный аппарат человека. К таким методам относится визуальный осмотр, контроль температуры и другие подобные методы.

Под объективными методами оценки работоспособности подразумеваются методы, при которых для сбора и анализа данных используются специализированные устройства, например, диагностические станции.

Оценка работоспособности заключается в сравнении значения выходного параметра X с его максимальным значением $X_{\text{макс}}$, который является основным критерием предельного состояния, т.к. именно значение выходного параметра определяет область работоспособности изделия.

Объект считается работоспособным, если выполняется условие $X < X_{\text{макс}}$. В случае, если условие не выполняется, принимается решение о проведении мероприятий по обслуживанию оборудования.

Прогнозирование остаточного ресурса заключается в оценке степени приближения состояния объекта к предельному состоянию.

Назначение системы диагностирования

Для анализа и оценки работоспособности основных элементов рассмотрена система ТПТС. Платформа ТПТС построена по модульному принципу. Конструктивно, комплекс ТПТС представляет собой приборную стойку, в которой расположены модули, крейты для их установки, соединительные провода и кабели.

Система может быть сконфигурирована в полностью, частично и не резервированном варианте. Структура системы ТПТС с резервированной конфигурацией приведена на рис.2.

Через шину EN осуществляется обмен данными между стойками.

Через внутреннюю шину ввода/вывода осуществляется обмен информацией между модулями в пределах одной стойки.

Модуль контроллера шины EAS предназначен для управления внутренней шиной.

Для увеличения вычислительных мощностей в ПС могут быть установлены модули расширения, которые увеличивают количество аппаратных каналов ввода/вывода.

Стойка может быть резервирована полностью или частично. В случае резервированной ПС ФМ работают совместно в режиме «Основ-

ной – резервный». Резервный находится в состоянии «горячего» резерва.

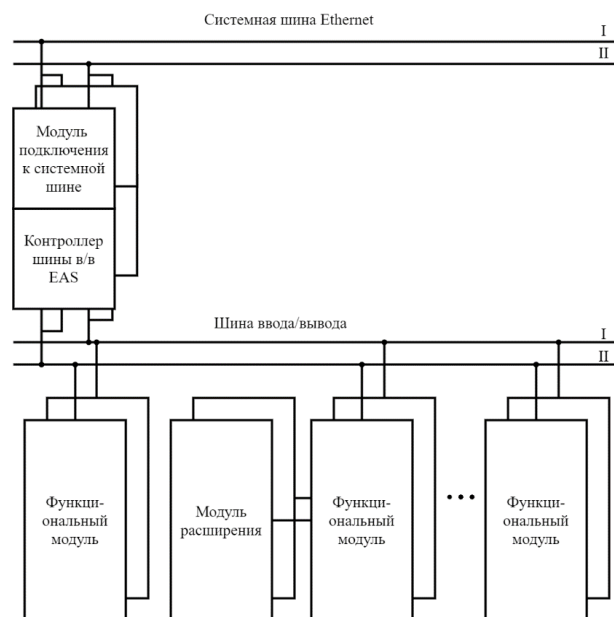


Рис. 2. Структура системы ТПТС с резервированной конфигурацией.

В качестве объекта исследования выбран ФМ ТПТС, схема которого представлена на рис.3.



Рис.3. Обобщенная структурная схема ФМ

В зависимости от назначения модуля те или иные элементы, например, АЦП или ЦАП, могут отсутствовать.

В зависимости от типа модуля (аналоговый или цифровой регулятор) входные сигналы поступают в обработку в цифровом виде по внутренней шине обмена данными либо напрямую, через аппаратные разъемы связи с техпроцессом функциональных модулей. Функции обработки данных выполняет микропроцессор.

Программная память этого микропроцессора разделяется на постоянную память (Flash Erasable Programmable Read Only Memory) и перепрограммируемую память (Electrically

Erasable Programmable Read-Only Memory). В FEPR0M хранятся библиотеки для выполнения арифметических и логических функций, а в EEPROM на этапе проектирования конкретной системы записываются прикладные программы.

Для расчета количественных показателей надежности ФМ ТПТС выбраны значения интенсивности отказов элементов и блоков системы в статье [7] и приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения интенсивности отказов элементов ФМ ТПТС.

Перечень элементов функционально – логической схемы	Наименование элементов	Интенсивность отказов λ , 1/ч
1	Кодек	10^{-7}
2	Коммутатор	$0,702 \cdot 10^{-6}$
3	АЦП	$21,36 \cdot 10^{-6}$
4	Приемник дискретных сигналов	$1,557 \cdot 10^{-6}$
5	Микропроцессор	10^{-8}
6	Формирователь сигналов индикации	$1,784 \cdot 10^{-6}$
7	ЦАП	$21,36 \cdot 10^{-6}$
8	Коммутатор	$0,702 \cdot 10^{-6}$
9	Формирователь дискретных сигналов	$1,784 \cdot 10^{-6}$
10	Схемы контроля аппаратной части модуля	$0,023 \cdot 10^{-8}$
11	Схемы питания	$5 \cdot 10^{-5}$

В качестве времени работы системы берется длительность топливной кампании 26280 часов [1]. Для повышения наглядности вычислений время работы разбито на 6 равных участков по 4380 часов.

Для расчета выберем комбинированное резервирование при трёх резервных элементах. Для резервирования выбираем элементы 3 (АЦП), 7 (ЦАП), 11 (схема питания), т.к. они имеют наибольшую интенсивность отказов, следовательно, наименее надежны.

Обобщенную структурную схему системы диагностирования преобразовали в функционально-логическую схему для расчета количественных показателей надежности при комбинированном резервировании с тремя резервными

элементами, которая представлена на рис. 4 [2].

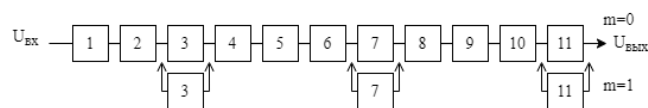


Рис. 4. Функционально – логическая схема ФМ ТПТС при комбинированном резервировании

К элементам 3 и 7 применено резервирование с ненагруженным резервом, а к элементу 11 – недогруженным резервом.

Тогда:

1. $m = 0$: Расчет ВБР производится по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность отказов;

t – время работы.

При $m = 0$ вероятность безотказной работы элементов 3 и 7 рассчитана и занесена в таблицу 2.

Таблица 2. Вероятность безотказной работы элементов системы

$P_1(t)$	4380	8760	13140	17520	21900	26280
$P_3(t)$	0,91069	0,82935	0,75528	0,68782	0,62639	0,57044
$P_7(t)$	0,91069	0,82935	0,75528	0,68782	0,62639	0,57044

Вероятность безотказной работы резервированных элементов 3,7 при $m=1$ определяется по формуле:

$$P_{3,7}(t) = e^{-\lambda_{3,7} \cdot t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_{3,7} \cdot t)^i}{i!},$$

2. $m = 1$:

$$P_{3,7}(4380) = e^{-21,36 \cdot 10^{-6} \cdot 4380} (1 + 21,36 \cdot 10^{-6} \cdot 4380) = 0,995887,$$

Аналогично рассчитаем ВБР для других промежутков времени и внесем в таблицу 3.

Таблица 3. Вероятность безотказной работы резервированных элементов 3,7.

$P_1(t)$	4380	8760	13140	17520	21900	26280
$P_{3,7}(t)$	0,995887	0,984532	0,967261	0,945222	0,919403	0,890657

Вероятность безотказной работы резервированного элемента 11 при $m=1$ определяется по

формуле:

$$P_{11}(t) = e^{-\lambda_{11} \cdot t} \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t})^i \right),$$

где

$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right).$$

3. $m = 1$:

$$P_{11}(t) = e^{-\lambda_{11} \cdot t} \left(1 + \sum_{i=1}^1 \frac{a_i}{i!} \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t})^i \right) =$$

$$= e^{-\lambda_{11} \cdot t} \left(1 + a_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_1 \cdot t})^1 \right),$$

$$a_1 = \prod_{j=0}^{1-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-5}} = 1.$$

$$P_{11}(4380) = e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 4380} \left(1 + 1 \cdot (1 - e^{-5 \cdot 10^{-5} \cdot 4380})^1 \right) = 0.961318,$$

Аналогично рассчитаем ВБР для других промежутков времени и внесем в таблицу 4.

Таблица 4. Вероятность безотказной работы резервированного элемента 11

$P_i(t)$	4380	8760	13140	17520	21900	26280
$P_{11}(t)$	0,961318	0,872636	0,764954	0,657292	0,550000	0,442708

ВБР для всей системы $P_c(t)$ при данном резервировании определим, как произведение ВБР каждого элемента.

Результаты расчета сведены в таблицу 5.

Таблица 5. $P_c(t)$ системы с комбинированным резервированием

t_i , час	$P_c(t)$	
	$m = 0$	$m = 1$
4380	0,647139	0,926100
8760	0,418790	0,799494
13140	0,271015	0,658564
17520	0,175385	0,524495
21900	0,113498	0,407238
26280	0,073449	0,309988

Составим таблицу 6, по данным которой построим график (рис.5). зависимости $P_c(\lambda_0 t)$.

Таблица 6. Зависимость $P_c(\lambda_0 t)$ при различных значениях t

t_i , час	$P_c(t)$	
	$m = 0$	$m = 1$
0.435	0,647139	0,926100
0.870	0,418790	0,799494
1.306	0,271015	0,658564
1.740	0,175385	0,524495
2.176	0,113498	0,407238
2.611	0,073449	0,309988

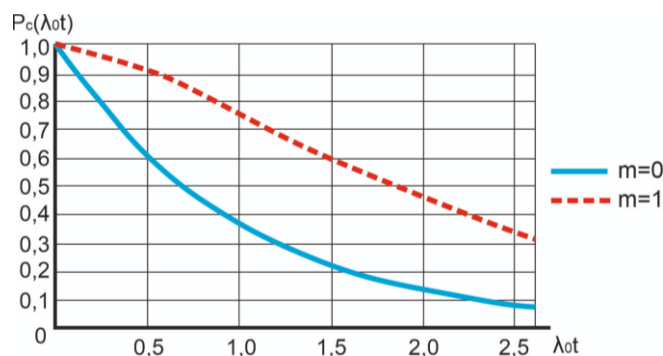


Рис.5. График зависимости ВБР от $\lambda_0 t$ при различных значениях m

По итогам расчета можно утверждать, что очень эффективным с точки зрения надежности является комбинированное резервирование.

Заключение

В основной части описано устройство приборной стойки ТПТС и входящих в её состав модулей, представлена обобщенная структурная схема функционального модуля, рассмотрен способ проведения анализа технического состояния оборудования и дальнейшей оценки его работоспособности, описан метод диагностирования модулей.

Предложен один из способов проведения анализа работоспособности оборудования, при диагностировании, на основе расчетов количественных показателей надежности системы контроля и управления на базе платформы ТПТС. Данный анализ может быть использован для усовершенствования систем контроля и диагностики.

Рекомендуем на всех этапах жизненного цикла изделия проводить анализ работоспособности и оценку общего технического состояния оборудования СКУ с целью выявления элементов, снижающих надежность оборудования, а также своевременно производить модернизацию

оборудования систем автоматизации.

Список литературы

1. Емельянов, И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами: учебное пособие для вузов / И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; под общ. ред. Н. А. Доллежала. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 360 с.: ил.
2. Н.И. Кузнецова, Н.В. Серова-Нашева. Расчет и анализ эксплуатационной надежности АСУ ТП АЭС и методы ее повышения: учеб. пособие для выполнения курсового проекта./ Н.И. Кузнецова, Н.В. Серова-Нашева - Севастополь: СевГУ, 2016-116 с.: ил.
3. Токмачев, Г.В. Оценка надежности АСУ ТП, разрабатываемого на программируемых средствах для АЭС с ВВЭР-1000 / Токмачев Г.В., Чулухадзе В.Р.: ФГУП ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2006.
4. Программно – технические средства ТПТС51 для построения АСУ ТП объектов энергетики: Каталог. - ВНИИА. - М., 2001.
5. Панкин, А.М. Диагностирование объектов атомной техники [Электронный ресурс]: А.М. Панкин - электрон. текст. дан. – Сосновый Бор: 2017. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7264>, свободный.
6. ТПТС-НТ. Описание платформы. [Электронный ресурс]: – электрон. дан. – М.: ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», 2017
7. Интенсивности отказов элементов для электронных схем. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com>
8. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. [Текст]; М.: Стандартиформ, 2009. – 11 с.
9. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]; М.: ФГУП «Стандартиформ», 2005. - 24 с.

References

1. Emelyanov, I. Ya. Scientific and Technical Fundamentals of Nuclear Reactor Control: A Textbook for Universities / I. Ya. Emelyanov, A. I. Efanov, L. V. Konstantinov; edited by N. A. Dollezhal. – Moscow: Energoatomizdat, 1982. – 360 p.: ill.
2. N. I. Kuznetsova, N. V. Serova-Nasheva. Calculation and Analysis of Operational Reliability of NPP APCS and Methods for Improving It: A Textbook for Completing a Course Project. / N. I. Kuznetsova, N. V. Serova-Nasheva - Sevastopol: SevSU, 2016. – 116 p.: ill.
3. Tokmachev, G. V. Reliability assessment of the automated process control system developed using programmable tools for NPPs with WWER-1000 /

- Tokmachev G.V., Chulukhadze V.R: FSUE OKB Hidropress. Podolsk, 2006.
4. Software and hardware tools TPTS51 for building automated process control systems for power facilities: Catalog. - VNIIA. - Moscow, 2001.
5. Pankin, A.M. Diagnostics of nuclear facilities [Electronic resource]: A.M. Pankin - electronic text. data. - Sosnovy Bor: 2017. - Access mode: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7264>, free.
6. TPTS-NT. Description of the platform. [Electronic resource]: - electronic data. - Moscow: FSUE VNIIA im. N.L. Dukhova, 2017
7. Failure rates of electronic circuit components. [Electronic resource] Access mode: <http://www.alldatasheet.com>
8. GOST 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions. [Text]; Moscow: Standartinform, 2009. – 11 p.
9. GOST 27.002-2015. Reliability in engineering. Basic concepts. Terms and definitions [Text]; Moscow: FSUE Standartinform, 2005. – 24 p.

**ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ,
РАДИЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

УДК 681.51

**Оптимизация процедуры внесения изменений в
автоматизированные системы управления технологическим
процессом на энергоблоках**Т.Г. Зацаринная¹, К.П. Аникевич¹, А.С. Чефранов² Н.В. Шахова¹, А.В. Груздева¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия,²Филиал АО «Концерн Росэнергоатом», Курская атомная станция,
Курская область, г. Курчатова, 307250, Россия¹biochip@mail.ru, ¹anikonst@mail.ru, ¹nvshakhova@mail.sevsu.ru, ¹gruzdeva2002@mail.ru, ²alechefranov@yandex.ru

Статья поступила 01.10.2025 г.; после доработки 03.10.2025 г.

Аннотация

В данной статье рассмотрена оптимизация процедуры внесения изменений в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) энергоблока Курской АЭС-2 с применением цифровых инструментов проектирования и согласования. На примере доработки функций безопасности (DA11 и DA12) в автоматике ступенчатого пуска показано применение двух систем, предназначенных для автоматизации процессов проектирования (САПР GET-R1) и административного управления, обработки, хранения, учёта и защиты документированной информации (ЕОСДО) в усовершенствованной процедуре внесения изменений. Представленное решение позволило повысить надёжность функционирования систем безопасности, а также сократить время, затрачиваемое на процесс сопровождения проектных решений.

Ключевые слова: электростанция, алгоритм, автоматизированная система управления, процедура изменения, проектная документация, проект, дизель-генератор.

**The procedure optimization for making changes to the automated
systems control used for technological process at the power units**T.G. Zatsarinnaya¹, K.P. Anikevich¹, A.S. Chefranov² N.V. Shahova¹, A.V. Gruzdeva¹¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,²«Rosenergoatom Concern» - Kursk Nuclear Power Plant, Kurchatov, Kursk Region, 307250, Russia¹biochip@mail.ru, ¹anikonst@mail.ru, ¹nvshakhova@mail.sevsu.ru, ¹gruzdeva2002@mail.ru, ²alechefranov@yandex.ru

Received 01.10.2025 y.; received in final form 03.10.2025 y.

Abstract

This article discusses the optimization of the procedure for making changes to the automated control system by the technological process which is applied on the Kursk NPP-2 unit. Presented procedure realized with using of digital design and approval tools. Using both systems which one of them is the system of automade designing process (SAPR GET-R1) and other of them is the system realized the administrative management, the protection of the documented information and the data processing and accounting (EOCDO) help to improve the protection functions (DA11 и DA12) realized by the automatic of step-by-step start. Thus improved procedure for making changes was shown on the example of the protection functions (DA11 и DA12). The presented problem solving in this article displays two main achievements which help to improve

the reliability of safety systems and reduced the time required for the project decision supporting.

Keywords: power plant, algorithm, automated control system, modification procedure, design documentation, project, diesel generator.

Введение

Современные автоматизированные системы управления (АСУТП) электростанций – особый класс многофункциональных иерархически построенных сложных систем управления. Рассматриваемые системы управления технологическими процессами строятся на базе программно – технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры, которые служат системообразующим компонентом АСУТП энергоблока. Базовые ПТК АСУТП, включающие в себя контроллеры (нижний уровень), сетевой комплекс и рабочие станции (верхний уровень), образуют единую информационно-технологическую среду управления, в которой обеспечивается доступ к любой информации, единожды введенной в систему. Таким образом, современные АСУТП перестали быть вспомогательными средствами автоматизации производственного процесса и служат не только в качестве системы сбора и отображения информации в режиме текущего времени (online), но и позволяют осуществить управление всеми режимами работы оборудования электростанций, а также вести анализ эффективности процессов управления [1-7] и совершенствовать алгоритмы управления технологическими объектами на АЭС.

Современный проект ВВЭР-ТОИ, внедряемый на Курской АЭС-2 - это эволюционный проект на базе АЭС-2006, который получил развитие благодаря оптимизациям проектирования, учету опыта эксплуатации референтных блоков в стране и за рубежом. Целью данной разработки является создание типового проекта нового поколения с улучшенной технологической базой и информационной составляющей. Для реализации поставленной цели, при разработке проекта вносятся изменения во многие его части, в том числе и в АСУ ТП, а при проведении пуско-наладочных работ они дополняются и улучшаются. Проводится информатизация, улучшение цифровых и интеграционных решений, унифицирование АСУ ТП.

Объективная необходимость регулярного внесения изменений в АСУ ТП возникает по следующим причинам:

- во-первых, исправление ошибок проектной документации. Несмотря на многоуровне-

вую проверку, при реализации сложных проектов возможны неточности и противоречия. Их устранение напрямую влияет на надежность системы;

- во-вторых, поступление уточненных данных по технологическому оборудованию. В ходе наладки и первых этапов пусконаладочных работ выявляются реальные характеристики оборудования и агрегатов, отличающиеся от проектных. Для корректной работы системы АСУ ТП требуется внесение изменений в уставки, алгоритмы и диагностические параметры;
- в-третьих, изменения со стороны поставщика (завода-изготовителя) оборудования. Изготовитель обновляет технические задания, программное обеспечение или алгоритмы работы, что в свою очередь требует актуализации системы управления на объекте.
- Следовательно, внесение изменений в АСУ ТП является необходимой процедурой, носящей не только корректирующий, но и развивающий характер, способствующий повышению эффективности, надежности и безопасности эксплуатации энергоблока.

Нормативно-техническая база процедуры внесения изменений

Внесение изменений в автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) атомных станций является сложным и строго регламентированным процессом. Это связано с тем, что такие изменения затрагивают не только эксплуатационные характеристики оборудования, но и вопросы ядерной и радиационной безопасности.

Процедуры регулирования изменений формируются на трёх уровнях: *международном* (в международных стандартах Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ (IAEA)) и документах Международной электротехнической комиссии (МЭК (IEC)); *национальном* (в законодательстве, нормах и правилах, требованиях органов надзора); *отраслевом* - на уровне эксплуатирующей организации (в регламентах организации).

Руководство МАГАТЭ по модификациям на

АЭС устанавливает цель и принципы контроля всех видов изменений (временных/постоянных), а также градуированный подход по значимости для безопасности. Требования МАГАТЭ для этапов ввода в эксплуатацию и эксплуатации закрепляют обязанности держателя лицензии обеспечивать заданный уровень безопасности и исключать снижение ее уровня, а также обеспечивать соответствие установленным пределам и условиям эксплуатации. Норматив ИЕС/МЭК для информационных систем управления (ИСУ): ИЕС 61513 задает общие требования к системам, важным для безопасности, включая модернизации и реконструкции.

Ключевым документом в области регулирования модификаций является руководство МАГАТЭ «Формат и содержание отчета по обоснованию безопасности атомных электростанций» [8]. В нём изложены базовые принципы управления изменениями, которые состоят в следующем:

- все модификации классифицируются по значимости для безопасности (градуированный подход);
- все изменения должны сопровождаться анализом безопасности, чтобы подтвердить отсутствие отрицательного влияния на предельно допустимые параметры эксплуатации;
- при модификациях должна сохраняться управляемая конфигурация, то есть единство проектных решений, фактического состояния оборудования и эксплуатационной документации;
- любые изменения должны быть прослеживаемыми и задокументированными на всех этапах, включая разработку, согласование, внедрение и проверку.

Таким образом, в требованиях МАГАТЭ [8] прямо закреплено: любые изменения в проекте и при эксплуатации станции не должны снижать уровень безопасности и обязаны выполняться в соответствии с лицензией, установленными пределами и условиями эксплуатации.

На уровне технических стандартов для АСУ ТП основным является международный стандарт ИЕС 61513, определяющий принципы проектирования и модернизации систем, методы верификации и валидации изменений, организацию конфигурационного управления и требования к документации и процедурам сопровождения. В России применима гармонизированная версия стандарта — ГОСТ Р МЭК 61513-2020 [9]. Эти документы регламентируют общие требования к системам управления, важным для безопасности,

включая вопросы модернизации и доработки программного обеспечения.

В Российской Федерации основным нормативным документом является Федеральный закон № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [10]. В нём закрепляется обязанность эксплуатирующей организации соблюдать требования безопасности и согласовывать с федеральным органом надзора (Ростехнадзором) все виды деятельности, затрагивающие условия лицензии. Внесение изменений в АСУ ТП в ряде случаев требует получения отдельного лицензирующего решения.

Регламентирующие документы Ростехнадзора содержат: перечень документов, которые должны быть представлены для рассмотрения изменений; порядок административных действий, включая сроки согласования и лицензирования; требования к экспертизе обоснования безопасности, которая проводится в случае значимых изменений.

В свою очередь эксплуатирующая организация разрабатывает собственные регламенты внесения изменений с последовательностью действий и этапами согласования, эти регламенты и являются заключительной процедурой регулирования в иерархической трехуровневой системе.

Таким образом, любые модификации не должны ухудшать безопасность. Их нужно выполнять последовательно, по установленному принципу, включающему обоснование, анализ безопасности, проверки, актуализацию оперативных инструкций и документации. Нормативно-техническая база в части внесения изменений в АСУ ТП строится на принципах приоритета безопасности, прослеживаемости и управляемой конфигурации. Международные стандарты формируют общую рамку, национальное законодательство уточняет порядок лицензирования, а внутри эксплуатирующих организаций действуют регламенты, обеспечивающие практическое выполнение этих требований.

Постановка задачи

В общем виде процесс внесения изменений в АСУ ТП атомной станции можно разделить на несколько последовательных этапов. На начальном этапе инициируются изменения. Поскольку изменение может быть вызвано различными причинами, к примеру, указаниями завода-изготовителя или поступлением уточнённых данных об оборудовании, а также выявлением ошибок в проекте или требованиями эксплуатации. В дан-

ном случае формируется заявка с описанием исходного состояния, сути изменения и ожидаемого результата. Следующим шагом является категорирование изменения.

В зависимости от значимости для безопасности, изменение классифицируется как затрагивающее или не затрагивающее условия лицензии. От этого зависит глубина анализа и необходимость обращения в надзорный орган. Затем следует подготовка проектной документации. При подготовке разрабатывают схему, алгоритмы, программные модификации, а также проводят анализ влияния предполагаемого изменения на безопасность. Следующий шаг – это экспертиза и согласование.

Внутренняя экспертиза проводится проектными организациями и подразделениями эксплуатирующей организации. При необходимости выполняется экспертиза обоснования безопасности, материалы которой передаются в надзорные органы. После экспертизы переходят лицензированию. В случае значимых изменений Ростехнадзор или соответствующий надзорный орган вносит изменения в условия лицензии. Сроки и порядок таких действий определены административными регламентами. За лицензированием следует верификация и валидация – предшествующий этап внедрению изменений.

Перед внедрением изменения проверяются на стендах, цифровых моделях или полномасштабных тренажёрах. Это позволяет убедиться, что новое решение корректно работает и не приводит к сбоям. Получив убедительные результаты в правильности принятых изменений, проводится внедрение. Изменение реализуется в системе, после чего проводится комплексное тестирование в реальных условиях. На заключительном этапе выполняются актуализация документации и обучение персонала.

Все документы, включая инструкции и эксплуатационные схемы, приводятся в соответствие, а персонал проходит подготовку для работы с изменённой системой.

В процессе внесения изменений задействованы различные участники процесса. Так, эксплуатирующая организация (держатель лицензии) — инициирует, координирует и несёт ответственность за изменение. Проектные и конструкторские организации — разрабатывают технические решения и документацию. Надзорный орган (Ростехнадзор, Госатомнадзор) — контролирует и лицензирует изменения. Эксплуатационный персонал — принимает участие в тестировании и

адаптации к новым условиям.

В качестве демонстрационной модели, исполняющей процедуру внесения изменений в АСУ ТП энергоблока, в данной статье представлена модель с оптимизацией данной процедуры на примере автоматики ступенчатого пуска.

Материал и методы

Анализ текущего состояния процедуры внесения изменений в АСУ ТП на энергоблоках Курской АЭС-2

На данный момент процедура внесения изменений в АСУ ТП энергоблоков Курской АЭС-2 регламентируется внутренним нормативным документом эксплуатирующей организации [Р-15-ЦТАИ-КурАЭС-2 Регламент Внесение изменений в GET-проект программно-технических комплексов на базе ТПТС для АСУ ТП Курской АЭС-2 [11].

Основными целями процесса управления изменениями являются: устранение несоответствий оборудования и подсистем ПТК АСУ ТП требованиям, установленным нормативной, проектной и рабочей документацией; устранение несоответствий оборудования требованиям, установленным эксплуатационной документацией; корректировка алгоритмов, уставок, значений параметров регуляторов, поправочных значений (коэффициентов) и других настраиваемых (регулируемых) параметров автоматизированных систем при выполнении пусконаладочных работ; приведение технических средств и программного обеспечения АСУ ТП в соответствие с требованиями технологического процесса.

Все изменения, вносимые в автоматизированные системы управления технологическим процессом, подразделяются на следующие группы: предварительные постоянные и временные.

Предварительные изменения вводятся как компенсирующие меры на период, до выдачи в производство проектной документации с внесёнными постоянными изменениями по результатам выявленных несоответствий, согласованные Генпроектировщиком. Предварительные изменения приобретают статус постоянных после выдачи проектной документации «для производства работ» с предварительными изменениями.

Постоянные изменения вводятся в АСУ ТП на основании выданной проектной документации. Они могут быть инициализированы по инициативе проектной организации или разработчиков подсистем АСУ ТП посредством выдачи в

производство изменений проектной документации, а также посредством оформления технических решений (ТР), разработанных в процессе ввода в эксплуатацию энергоблоков.

Необходимость внесения временных изменений обусловлена, прежде всего, процессом пусконаладочных работ и испытаний, когда осуществляется настройка и испытание оборудования и систем, обеспечивающих достижение проектных параметров и режимов работы энергоблока. Под временными изменениями понимаются также изменения в программной части оборудования АСУ ТП, которые подлежат последу-

ющей отмене и восстановлению до исходного состояния после завершения работ, вызвавших необходимость реализации таких изменений.

Перечень основных сокращений на рисунке 1 следующий: ТР – технические решения, АТЭ – Атомтехэнерго, АСЭ – Атомстройэкспорт, ЭО – эксплуатирующая организация, АЭП – Атомэнергопроект, ПД – проектная документация, РД – рабочая документация, ЗЗИ – задание завода-изготовителя, ТЗА – техническое задание на автоматизацию, БПУ – блочный пульт управления.

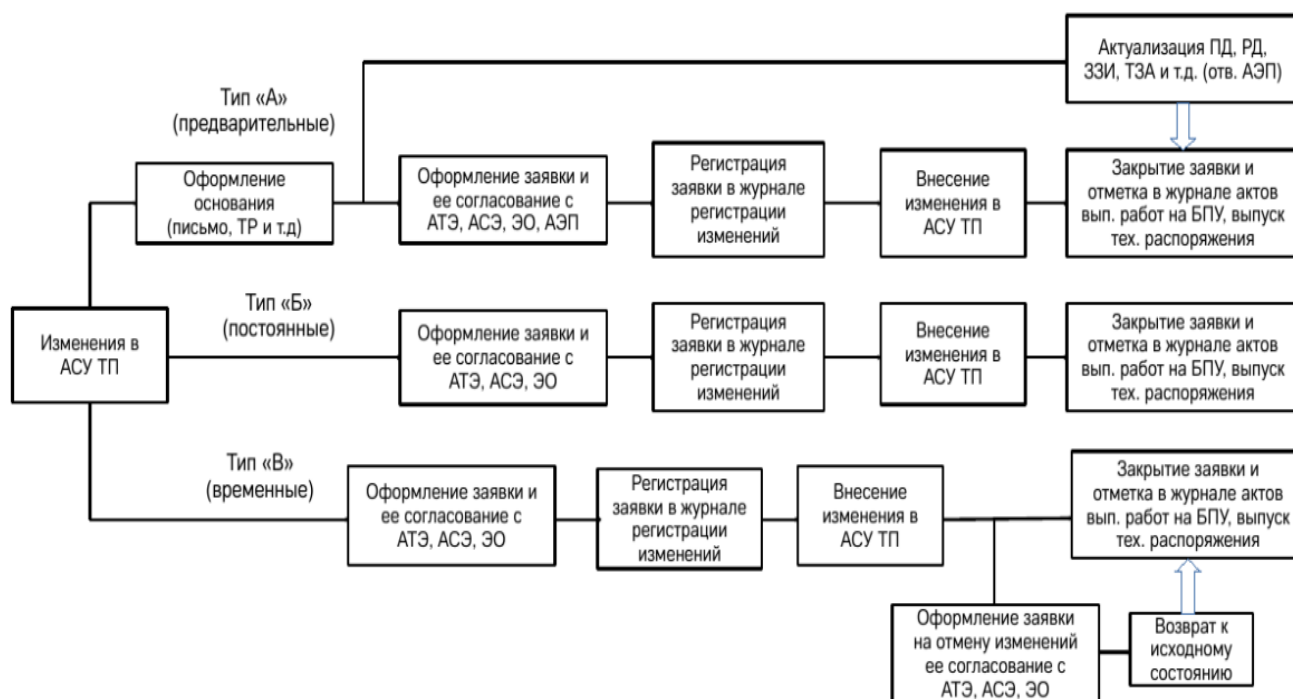


Рис. 1. Структурная схема алгоритма внесения изменений в АСУ ТП.

Принятый порядок согласования, выполнения и фиксации изменений в АСУ ТП является строгим, регламентированным и обеспечивает высокий уровень прослеживаемости. Однако его практическое применение выявило ряд существенных недостатков, которые негативно сказываются на оперативности процесса.

Данный алгоритм предусматривает последовательное прохождение заявки через несколько уровней - инициатора, исполнителя, администратора, а также сторонних организаций (например, АО «АТЭ»).

Каждый этап сопровождается проверкой и документированием, что значительно увеличивает суммарное время согласования. В данном

случае от создания заявки до реализации изменения проходит 15 рабочих дней, что увеличивает риск невыполнения и ошибки.

Для решения данной проблемы произведена автоматизация процесса согласования на базе Единой отраслевой системы электронного документооборота (ЕОСДО).

Использование данной платформы позволило перейти от последовательного к параллельному согласованию заявок.

Теперь документ поступает во все заинтересованные ведомства одновременно, и каждый участник может выполнять свою часть проверки независимо от других, сроки не зависят от очередности передачи бумажного оригинала, а статус согласования можно отследить в реальном

времени. Визуализация согласования на базе ЕОСДО показана на рис. 2.

В ЕОСДО каждый шаг автоматически фиксируется в системе, что облегчает контроль со

стороны администратора АСУ ТП и повышает ответственность участников. Согласование заявки участниками представлено на рис. 3.

Рис. 2. Основная информация о заявке в единой отраслевой системе документооборота (ЕОСДО)

Регистрационный № 0611010202/31422-3 от 28.08.2025									
Универсальный документ/Заявка									
Статус: Закрыт Версия: 1.0									
Электронный документ (ПЭД)									
АД "Концерн Росэнергоатом"									
Редигировать Печать									
Список очередей									
Добавить очередь									
Район									
Добавить группу									
Группы									
Согласование									
2 дн 0 ч 0 %									
Подразделение									
Организация									
План дата									
Время									
Общая информация									
Согласование									
1 дн 0 ч 0 %									
Подписание									
1 дн 0 ч 0 %									
Виды по версиям (7)									
Версия 1.0									
Свернуть все экспортеры									
Открыть все									
Вариант									
3									
Очередь									
Дата решения									
План дата									
ФИО									
Организация									
Обл.									
Решение									
Замечание/комментарий									
Комментарий исполнителя									
1									
Записи 1 - 7 из 7									
Показать 15									

Рис. 3. Лист согласования заявки на базе ЕОСДО

В настоящее время средний срок реализации сокращён до 5 рабочих дней. Сокращение времени более чем в три раза стало возможным именно благодаря одновременному согласованию всеми участниками в цифровой среде.

Для повышения точности внесения изменений и исключения риска ошибки на оборудовании, производится тестирование алгоритма на цифровой модели. В данном случае базой моделирования выступает САПР GET-R1. На прак-

тике это выглядит следующим образом: при необходимости внесения корректировок в группу однотипных алгоритмов (например, в 32 идентичных по структуре алгоритма) первоначально изменения внедряются только в один из них. После реализации изменений выполняется тестирование алгоритма на имитационной модели.

На этапе тестирования анализируется корректность функционирования логики, полнота обработки входных данных, а также адекватность формируемых выходных сигналов. Особое внимание уделяется проверке работы алгоритма в штатных и нештатных режимах, что позволяет выявить возможные ошибки проектирования ещё до внедрения на действующем оборудовании. В случае если результаты тестирования подтверждают правильность и надёжность доработанного алгоритма, инициатор формирует заявку на внесение изменений для дальнейшего согласования. Если же в ходе тестирования выявляются недочёты (например, ошибки в логике алгоритма, некорректные исходные данные или искажённые выходные сигналы), алгоритм возвращается на этап доработки. После внесения корректировок процедура тестирования повторяется до получения положительных результатов.

В рамках реализации доработок в составе АСУ ТП энергоблока № 1 Курской АЭС-2 выполняется полный цикл обработки сигналов, начиная от анализа исходного перечня, предоставленного заводом-изготовителем, и заканчивая внесением уточнений, необходимых для обеспечения корректной работы оборудования в реальных условиях эксплуатации. Данный процесс включает в себя введение новых сигналов, востребованных эксплуатацией, изменение существующих сигналов в соответствии с актуализированными техническими требованиями, а также удаление неактуальных позиций, утративших практическую ценность.

В ходе выполнения доработок некоторые сигналы добавляются, некоторые удаляются или

заменяются. Все эти данные фиксируются и заносятся в таблицу. По статистике, общее количество сигналов на входе и на выходе процедуры существенно различается. Это связано с тем, что первоначальный перечень, формируемый заводом-изготовителем, требует адаптации под реальные условия эксплуатации, специфику оборудования и обновлённые технологические задания. В среднем процент изменений в программно-техническом комплексе оборудования составляет порядка 56 %, что свидетельствует о высокой интенсивности корректировок и значимости их для дальнейшей безотказной работы энергоблока. Данные приведены в таблице 1.

Реализация данных доработок обеспечивает ряд ключевых эффектов:

- приведение проектных решений в соответствие с действующими нормами и правилами, закреплёнными в нормативно-технической документации НП-026-16 [13] и НП-001-15 [14];
- реализацию корректной работы технологических защит, блокировок и сигнализаций в соответствии с актуализированными заданиями на автоматизацию, поступающими от АО «Атомэнергопроект»;
- расширение функциональных возможностей АСУ ТП за счёт внедрения новых точек контроля и управления технологическими параметрами;
- повышение достоверности и актуальности сигналов (из системы исключаются устаревшие или некорректные позиции);
- снижение нагрузки на персонал путём оптимизации перечня сигналов и логики их обработки;
- исключение нерелевантной информации на рабочих местах оперативного персонала.

Таблица 1. Перечень изменений по сигналам в ПТК

ПТК	Кол-во сигналов в исходных ЗЗИ	Кол-во сигналов в новых ЗЗИ	Добавлено и изменено	Удалено	Процент изменений
ЛЗ*	1072	1472	544	46	55%
ПУ и САПМ*	1688	1724	317	163	28%
ИнЧ АЗ-УСБТ*	5293	5873	943	106	20%
В РПУ*	152	150	2	4	4%
В СБ*	618	694	308	23	54%
ВД*	618	694	308	23	54%
НСОП*	300	310	273	263	179%

Примечание* - перечень аббревиатур в Таблице 1: ЛЗ – линейная защита, ПУ и САПМ – приоритетное управление и система аварийного и поставарийного мониторинга, ИнЧ АЗ-УСБТ – инициирующая часть аварийной защиты управляющей системы безопасности технологической, В РПУ – вентиляция резервного пульта управления, В СБ – вентиляция систем безопасности, ВД – вентиляция дизель-генераторных установок, НСОП – насосная станция ответственных потребителей.

Таким образом, внедрённые меры не только позволили ускорить реализацию изменений, но и сохранили требуемый уровень контроля за каждым этапом, обеспечив качество и минимизацию рисков. Вместе с тем, для комплексного понимания эффективности новой процедуры важно рассмотреть её практическую реализацию на конкретном примере.

Процедура внесения изменений в автоматику ступенчатого пуска

Управляющая система безопасности (УСБ) обеспечивает контроль и управление во всех режимах защитными, локализирующими и обеспечивающими системами безопасности. Часть из этих систем включаются только в аварийных ситуациях, а часть работает постоянно, совмещая функции нормальной эксплуатации и функции безопасности. Количество управляющих систем безопасности всегда соответствует количеству каналов технологических систем безопасности.

УСБ подразделяют на инициирующую и исполнительную части. Иницирующая часть УСБ в проекте АЭС-2006, как и в проекте ВВЭР-ТОИ, входит в состав инициирующей части СУЗ.

Исполнительную часть иногда обозначают аббревиатурой УСБТ – управляющая система безопасности технологическая, а инициирующая часть – УСБИ, имея ввиду следующее. Иницирующая часть УСБИ из состава СУЗ-УСБ предназначена для функций управления связанных со сбором и обработкой информации, выявлением исходного события и запуском систем безопасности. Исполнительная часть УСБТ предназначена для автоматического пуска и ступенчатого нагружения ДГ, авторегулирования, технологических защит и блокировок, организации технологической сигнализации [12].

Ниже на рис. 4 представлена общая блок-схема функционирования УСБ, которая дает понимание процедур организации запуска при совместной работе, инициирующей и исполнительной частей управляющей системы безопасности.

В рамках совершенствования АСУ ТП энергоблока № 1 Курской АЭС-2 рассматривались изменения в автоматике ступенчатого пуска функций безопасности DA11 и DA12. Данная система обеспечивает пуск дизель-генераторов обеспечивающих систем безопасности и ступенчатое подключение к ним групп потребителей.

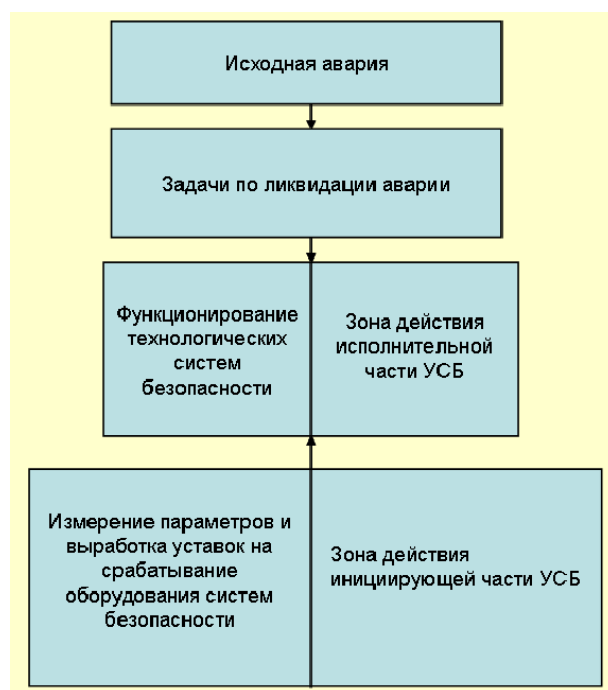


Рис. 4. Общая блок-схема функционирования УСБ

Функция DA11 – «Включение ДГ при обесточивании» - вступает в действие при формировании сигнала «Обесточивание» или при нажатии

оператором кнопки «Пуск ДГ» на панелях безопасности БПУ/РПУ. При этом выдаются команды на отключение выключателей системы аварийного электроснабжения от секций системы нормального электроснабжения и запуск аварийного ДГ соответствующего канала.

Функция DA12 - Управляющая система безопасности технологическая: «Ступенчатое подключение механизмов СБ к ДГ». Данная функция обеспечивает отключение механизмов систем

безопасности при наличии сигнала об обесточивании секции аварийного электропитания и последующее ступенчатое подключение механизмов систем безопасности к секциям аварийного электропитания после подтверждения работоспособности дизель генератора и обеспечения требуемых параметров на секции.

Функциональная схема введения в действие АСП и запуска ДГ представлена на рис. 5.

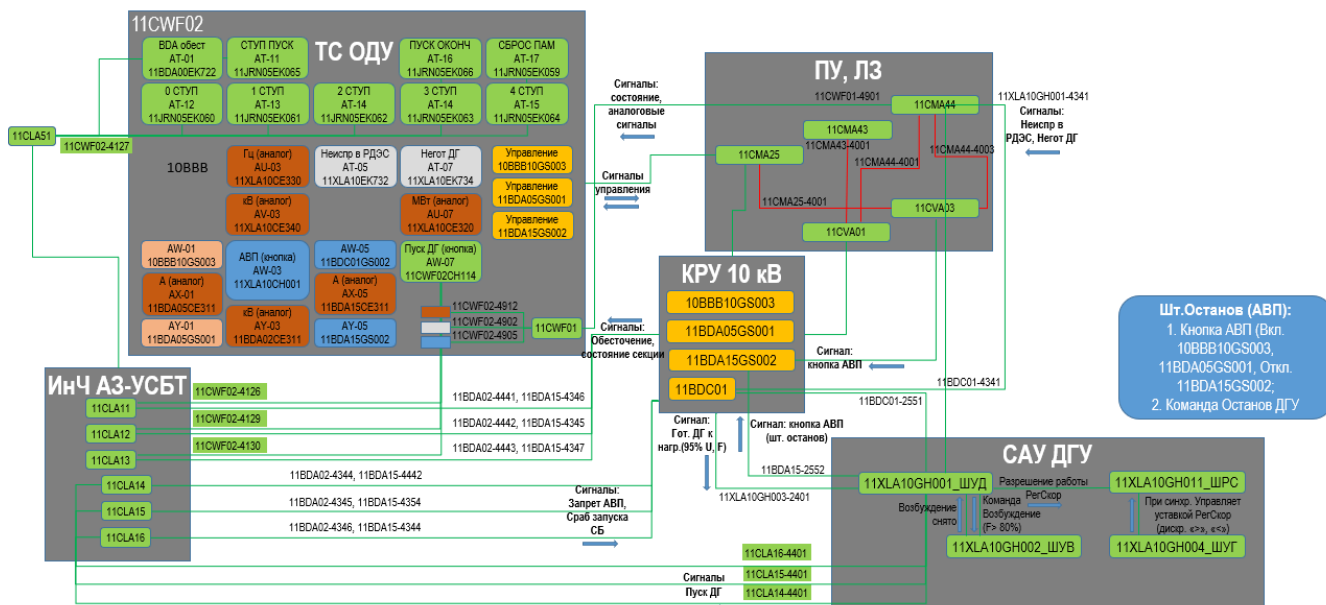


Таблица 2. Состав потребителей, включаемые в работу по программе ступенчатого пуска

Степень	Потребители	Описание
0	Элементы управления и контроля, узлы управления (автоматика пуска/топливная система ДГ); кондиционирование (вентиляция) помещений СБ (поддержание температурного режима шкафов); сигнализация и аварийное освещение помещений СБ.	Данные нагрузки критичны для обеспечения работоспособности аппаратуры систем безопасности и самих генераторов. Некоторые из них имеют малую мощность, но их отсутствие быстро ведет к деградации оборудования.
1	Ключевые управляющие и контрольные шины, насосы аварийного охлаждения первой очереди; источники питания для систем защиты, части автоматических распределительных устройств.	Эти потребители обеспечивают непосредственное охлаждение активной зоны и работу критичных защитных контуров; их подключение должно быть достаточно быстрым, но при этом учитывать стартовые токи. Источники и численность нагрузок подбирают так, чтобы ДГУ мог их принять без неустойчивости
2	Насосы вспомогательных систем (заполнение, подпитка, вторичные теплообменники), насосы аварийного расхолаживания, системы противоаварийного водоснабжения, пожарные насосы/спринклерные установки), вспомогательное освещение.	К этой группе относятся более мощные электродвигатели, которые при одновременном включении создают значительные пусковые нагрузки; их подключение осуществляется после стабилизации параметров ДГУ. При проектировании распределения ступеней учитывают «пиковую» нагрузку на каждой ступени и интервал между ступенями.
3 и далее	Вспомогательное технологическое оборудование, офисное и административное питание, серверы, деаэраторы, насосы, не влияющие напрямую на обеспечение устойчивости реактора в аварийный период.	Эти нагрузки подключаются последними или остаются отключенными, пока не будет завершён набор основных нагрузок, чтобы не превысить возможности ДГ

В разных редакциях ТЗ данные параметры могут изменяться: уточняется набор механизмов, перераспределяются нагрузки между степенями, корректируются временные выдержки и логика работы защит. Для оценки влияния этих изменений на алгоритм работы автоматики выполнялось сравнение двух версий технического задания и анализировались ключевые отличия.

При анализе содержания технических

АО «Атомэнергoproject» МПИ АЭП	КУРСКАЯ АЭС-2	В01
-----------------------------------	---------------	-----

Таблица Е.46.1 – Перечень механизмов подключаемых по ступеням 0-4 к секциям аварийного электропитания

Наименование оборудования	Маркировка по KKS	Время включения, с /ступень				
		0	10	20	30	40
		0	1	2	3	4
Насос аварийного и планового расхолаживания низкого давления	11JNA20AP001 12JNA50AP001		+			
Насос аварийного и планового расхолаживания высокого давления	11JNA30AP001 12JNA60AP001		+	*) Запрет включения при температуре первого контура менее 70 °С («Холодный останов»)		
Насос аварийного расхолаживания ПГ	11JNB11AP001 12JNB31AP001		+			
Насос спринклерной системы (охлаждение БВ)	11JMN11AP001 12JMN31AP001		+			

заданий на проектирование систем безопасности выявлено, что на разных ступенях подключаются насосы спринклерной системы и насосы аварийного расхолаживания. Включение данных механизмов на более ранних или поздних ступенях оказывает влияние на скорость срабатывания защитных функций и на устойчивость источников питания при наборе нагрузки. Это можно увидеть на рис. 6.

АО «Атомэнергoproject» МПИ АЭП	КУРСКАЯ АЭС-2	В01
-----------------------------------	---------------	-----

Таблица Е.46.1 – Перечень механизмов подключаемых по ступеням 0-4 к секциям аварийного электропитания

Наименование оборудования	Маркировка по KKS	Время включения, с /ступень				
		0	10	20	30	40
		0	1	2	3	4
Насос аварийного и планового расхолаживания низкого давления	11JNA20AP001 12JNA50AP001		+			
Насос аварийного и планового расхолаживания высокого давления	11JNA30AP001 12JNA60AP001		+	*) Запрет включения при температуре первого контура менее 70 °С («Холодный останов»)		
Насос аварийного расхолаживания ПГ	11JNB11AP001 12JNB31AP001		+			
Насос спринклерной системы (охлаждение БВ)	11JMN11AP001 12JMN31AP001		+			

Рис. 6. Сравнение версий ТЗ на проектирование СКУ безопасности в части подключения механизмов по ступеням (насосное оборудование).

В последней версии ТЗ насосы включаются в работу не на первой ступени, как в предыдущей, а на нулевой, при поступлении сигнала DA12, т. е. фактически сразу при поступлении сигнала «Обесточивание».

Насосы аварийного расхолаживания — это активная часть системы аварийного охлаждения реактора, которая предназначена для обеспечения подачи теплоносителя в первый контур и/или утилизации остаточного тепла в аварийных ситуациях. Их включение является высокоприоритетным из-за выполняемых ими функций.

Спринклерные насосы предназначены для

Наименование оборудования	Маркировка по KKS	Время включения, с /ступень				
		0	10	20	30	40
		0	1	2	3	4
		Не требуется отключать механизмы по сигналу обесточивания. Работа возобновляется при появлении напряжения		Требуется отключать механизмы по сигналу обесточивания и включать механизмы по программе СП или оператором (блокировкой) по завершении ступенчатого пуска		
Вентагрегат приточной системы вентиляции кабельных помещений РПУ	11SAE42AN001 12SAE42AN001 (11SAE42AN002) (12SAE42AN002)	+				
Электрокалорифер системы SAE42**	11SAE42AH001 12SAE42AH001 (11SAE42AH002) (12SAE42AH002)		Включение возможно по блокировке после завершения ступенчатого пуска			
Кондиционер приточно-рециркуляционной системы охлаждения воздуха помещений ДГУ СБ	11SAD01AH101 11SAD01AH103 12SAD01AH101 12SAD01AH103 (11SAD01AH102) (11SAD01AH104) (12SAD01AH102) (12SAD01AH104)			+		
Вентагрегат	11SAC01AN001					

снижения давления и температуры внутри гермооболочки, а так же конденсации пара и удержания радиоактивных веществ внутри объема. В ВВЭР система распыления включается автоматически при достижении давления 0,03 МПа в гермообъеме.

Аналогично изменяется время включения в работу кондиционеров приточной рециркуляционной системы охлаждения воздуха помещений дизель-генераторной установки (ДГУ) систем безопасности, как показано на рис. 7.

Наименование оборудования	Маркировка по KKS	Время включения, с /ступень				
		0	10	20	30	40
		0	1	2	3	4
		Не требуется отключать механизмы по сигналу обесточивания. Работа возобновляется при появлении напряжения		Требуется отключать механизмы по сигналу обесточивания и включать механизмы по программе СП или оператором (блокировкой) по завершении ступенчатого пуска		
Вентагрегат приточной системы вентиляции кабельных помещений РПУ**	11SAE42AN001 12SAE42AN001 (11SAE42AN002) (12SAE42AN002)	+				
Электрокалорифер системы SAE42**	11SAE42AH001 12SAE42AH001 (11SAE42AH002) (12SAE42AH002)		Включение возможно по блокировке после завершения ступенчатого пуска			
Кондиционер приточно-рециркуляционной системы охлаждения воздуха помещений ДГУ СБ	11SAD01AH101 11SAD01AH103 12SAD01AH101 12SAD01AH103 (11SAD01AH102) (11SAD01AH104) (12SAD01AH102) (12SAD01AH104)	+				
Вентагрегат рециркуляционной системы охлаждения воздуха	11SAC01AN001 12SAC01AN001 (11SAC01AN002)	+				

Рис. 7. Сравнение версий ТЗ на проектирование SKU безопасности в части подключения механизмов по ступеням (оборудование систем кондиционирования и вентиляции).

Также со 2-й ступени на 1-ую перемещается включение в работу вентагрегатов системы охлаждения помещений необслуживаемой зоны контейнмента (защитной оболочки ядерного реактора).

При распределении потребителей по

Холодильная машина	11QKB03AC001 12QKB03AC001					+
	(11QKB03AC002) (12QKB03AC002)		Включение возможно оператором после завершения ступенчатого пуска при наличии резервной мощности ДГ			
Вспомогательный насос холодообеспечения ответственных потребителей (КХОП)	11QKB01AP001 12QKB01AP001	+				
	(11QKB01AP002) (12QKB01AP002)		Включение возможно оператором после завершения ступенчатого пуска при наличии резервной мощности ДГ			

ступеням изменено включение в работу холодильной машины и вспомогательного насоса хладоснабжения ответственных потребителей (рис. 8).

Холодильная машина	11QKB03AC001 12QKB03AC001 (11QKB03AC002) (12QKB03AC002)					+
Вспомогательный насос холодообеспечения ответственных потребителей (КХОП)	11QKB01AP001 12QKB01AP001 (11QKB01AP002) (12QKB01AP002)	+				
Прочие потребители сборок 0.4 кВ		+				
Собственные нужды		+				

Рис.8. Сравнение версий ТЗ на проектирование SKU безопасности в части подключения механизмов по ступеням (оборудование системы охлаждения воздуха).

Более раннее включение данных групп потребителей связано с повышением приоритета их работы в условиях аварийного режима. Система охлаждения воздуха обеспечивает

поддержание допустимой температуры в помещениях, где утановлены шкафы управления, силовые кабели и другое важное для работы системы оборудование. При отсутствии

охлаждения велика вероятность перегрева оборудования, что снижает его надежность и может привести к отказам при работе в аварийном режиме.

Инициатором изменений в логике работы автоматики ступенчатого пуска выступает АО «Атомэнергопроект» как генеральный проектировщик. Корректировки данного типа вносятся на основании результатов уточненных расчетных нагрузок, анализа устойчивости работы дизель генераторов при наборе мощности, а также приоритизации функций безопасности. Основная цель данных изменений – повышение надежности работы оборудования систем безопасности и обеспечение их устойчивого функционирования в аварийных режимах.

Данные уточнения оформляются в виде

заявки на внесение изменений в АСУ ТП. Фиксируется техническое обоснование, ссылки на корректировки, перечень механизмов, порядок внесения изменений. Для формирования заявки на внесение изменений взяты следующие потребители: насосы аварийного расхолаживания парогенератора 11JNB11AP001, 12JNB31AP001; насосы спринклерной системы 11JMN11AP001, 12JMN31AP0014 а также вентагрегаты системы охлаждения помещений необслуживаемой зоны контеймента 11KLA01AN001 и 12KLA01AN001. Данные потребители включаются в работу на 0 и 1 ступенях, вместо предшествующих 1 и 2 в предыдущей версии ТЗ на проектирование. Сводные данные для формирования заявки на внесение изменений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Перечень изменений, вносимых в техническое задание на проектирование СКУ безопасности.

№ 1	KUR-EEC1050 версия 9.0	KUR-EEC1050 версия 10.0	Инициатор изменения
1	11JNB11AP001 12JNB31AP001 на 1 ступени	11JNB11AP001 12JNB31AP001 на 0 ступени (включение по сигналу DA12)	АЭП
2	11JMN11AP001 12JMN31AP001 на 1 ступени	11JMN11AP001 12JMN31AP001 на 0 ступени (включение по сигналу DA12)	АЭП
3	11KLA01AN001 12KLA01AN001 на 2 ступени	11KLA01AN001 12KLA01AN001 на 1 ступени	АЭП

Для повышения точности внесения изменений и исключения риска ошибки на оборудовании, проводится тестирование алгоритма на цифровой модели, выполненной в виде Get-проекта ТПТС. Основной принцип тестирования заключается в оказании воздействия на модель (ПТК) путём задания значений входных переменных и последующего сравнения реакции модели (ПТК) с заранее заданным критерием успешности выполнения теста. Причём, процесс тестирования предполагает его автоматизацию, но с возможностью вмешательства пользователя:

возможен запрос каких-либо действий, выполняемых пользователем вручную, предложение выбора пользователем дальнейшего действия (остановить выполнение сценария или продолжить).

На рис. 9 – 11 представлены GET-проекты с внесенными изменениями.

Переключение насосов с 1 ступени на 0 происходит по 2 комплектам и трем диверситетам соответственно. На рисунке 8 видно, что в предыдущем проекте насосы включаются в работу на 1 ступени. Красным цветом включение насосов перенесено на 0 ступень. Таким образом реализатор

заявки видит, что именно необходимо изменить в GET-проекте.

Аналогично меняется включение в работу вентагрегатов KLA со 2-й ступени на 1-ую.

Далее алгоритмы, представленные на рис. 9 - 10 переходят в алгоритм включения на рисунке 11. Здесь так же меняется номер ступени, на которой механизмы включаются в работу.

Иницирующая часть аварийной защиты управляющей системы безопасности технологической (ИнЧ АЗ-УСБТ) состоит из двух независимых комплектов, а сигналы поступают по трем каналом в каждом комплекте, поэтому алгоритм изменения включения оборудования в работу в GET-проекте реализуется на 6 листах, по каждому каналу комплекта. Для правильной работы реализатора изменения данный алгоритм прописывается аналогично для кодов KKS каждого канала в рамке сверху.

В случае если результаты тестирования подтверждают правильность и надёжность доработанного алгоритма, инициатор формирует заявку на внесение изменений для дальнейшего согласования.

Если же в ходе тестирования выявляются недочёты (например, ошибки в логике алгоритма,

некорректные исходные данные или искажённые выходные сигналы), алгоритм возвращается на этап доработки. После внесения корректировок процедура тестирования повторяется до получения положительных результатов.

Далее данная заявка загружается в ЕОСДО

для дальнейшего согласования и последующей реализации.

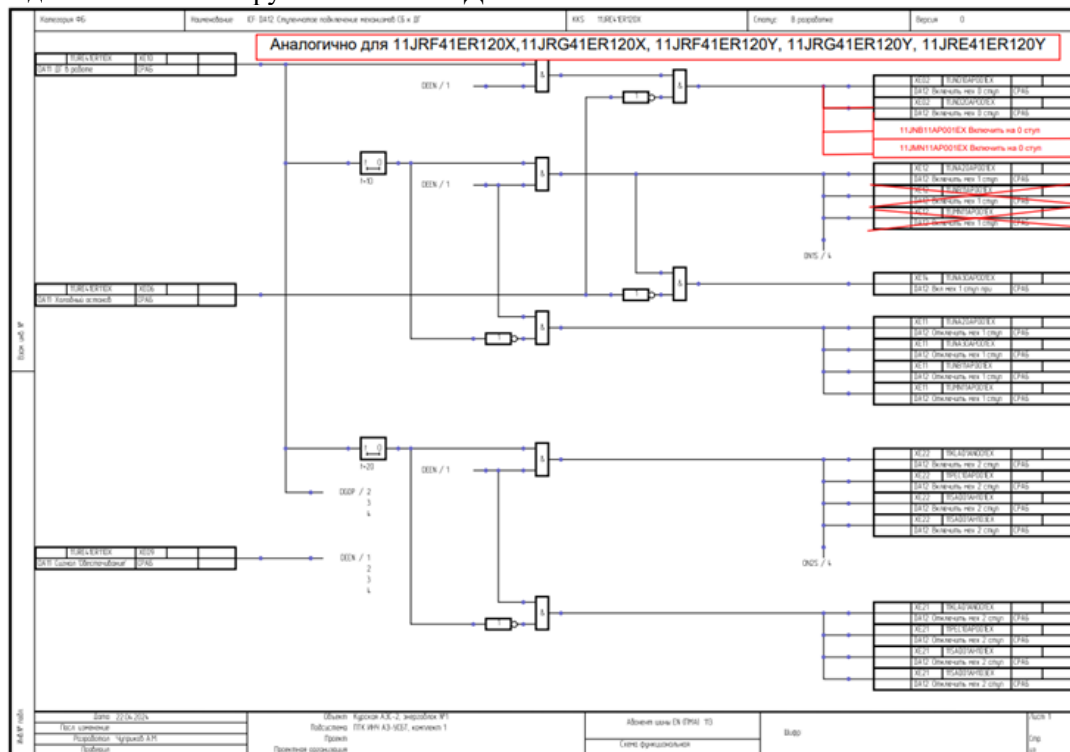


Рис.9. GET-проект DA12 – Ступенчатое подключение механизмов СБ к ДГ (включение в работу насосов 11JNB11AP00, 11JMN11AP001)

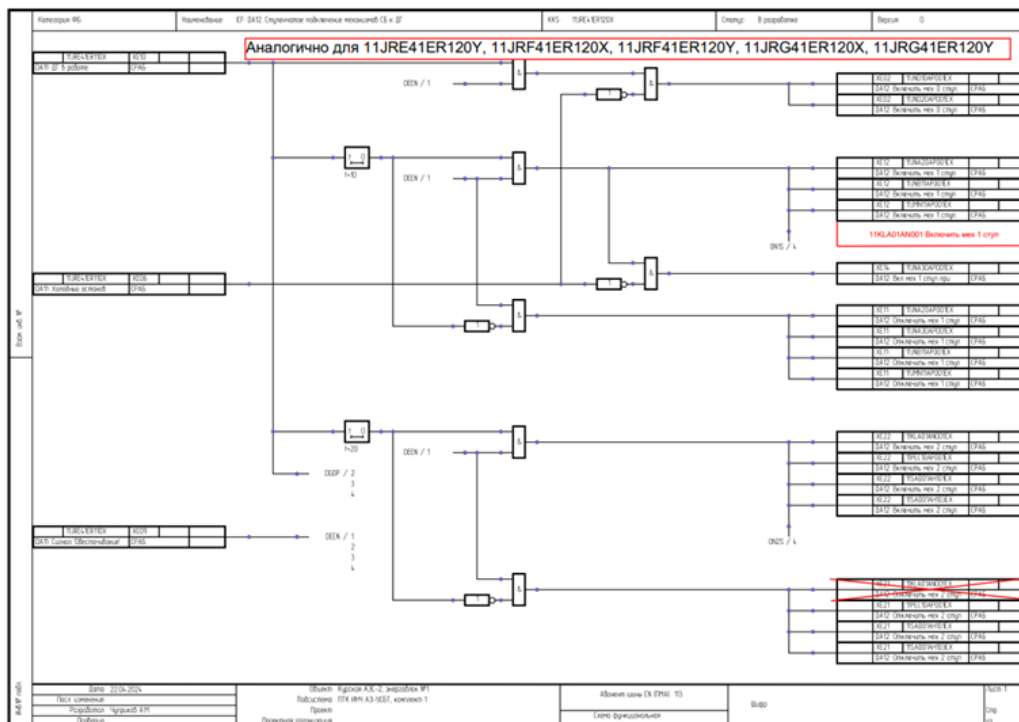


Рис. 10. GET-проект DA12 – Ступенчатое подключение механизмов СБ к ДГ (включение в работу вентагрегата 11KLA01AN001)

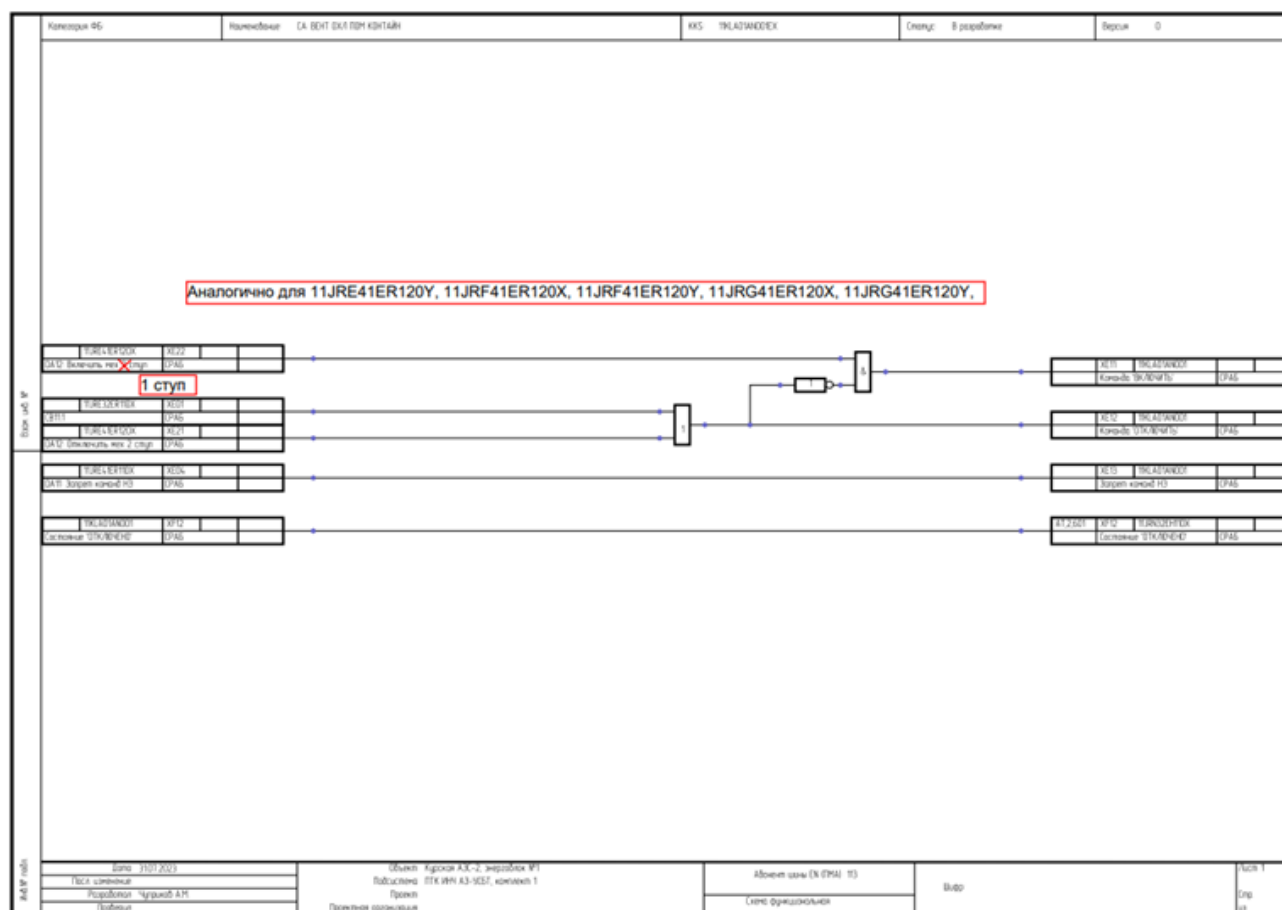


Рис.11. GET-проект ПТК ИнЧ АЗ-УСБТ. Изменение по включению в работу насосного оборудования.

Заключение

Оптимизация процедуры внесения изменений в АСУ ТП энергоблока № 1 Курской АЭС-2 позволила значительно повысить эффективность и прозрачность процесса сопровождения проектных решений. Внедрение единой схемы согласования через ЕОСДО, а также использование цифровых инструментов — в частности, среды GET-проект — обеспечили возможность проведения доработок в более короткие сроки без снижения качества и надёжности. Применение усовершенствованной процедуры на практике реализовано при внесении изменений в автоматику ступенчатого пуска функций безопасности DA11 и DA12. В результате анализа двух версий технического задания были выявлены расхождения в уставках времени и логике включения механизмов. Подготовленная заявка на изменение позволила уточнить параметры, оптимизировать распределение нагрузок по ступеням и привести алгоритмы работы автоматики в соответствие с актуализированными расчётами АО «Атомэнергопроект».

В ходе реализации изменений проведено моделирование и тестирование в GET-проекте,

что подтвердило корректность работы обновлённых алгоритмов и обеспечило безопасное внедрение в действующую систему. Таким образом, внедрение новых подходов к управлению изменениями не только сократило сроки их прохождения (с 15 до 5 рабочих дней), но и повысило качество технического сопровождения АСУ ТП. Полученные результаты показывают, что применение цифровых технологий и централизация процедур согласования формируют основу для дальнейшего развития культуры управления изменениями в отрасли и могут быть масштабированы для других систем и энергоблоков нового поколения.

Список литературы

1. Биленко В.А. Автоматизация отечественных энергоблоков: тенденции развития, проблемы, перспективы / В.А. Биленко, Л.Л. Грехов, А.Г. Свицерский // Теплоэнергетика. – 2012. - №10. – С.3 – 11.
2. Биленко В.А. Опыт эксплуатации микропроцессорных АСУТП мощных модернизированных энергоблоков / В.А. Биленко, Л.Л. Грехов, А.Г. Свицерский, А.П. Струков // Теплоэнергетика. –

2013. - №10. – С.18 – 28.
3. Сви́дерский А.Г. Совершенствование автоматизированных систем управления энергетическим оборудованием / А.Г. Сви́дерский, В.А. Биленко, В.В. Лыско // Энергетические станции, - 2010. - №1. – С.59 – 67.
4. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций: в 3-х кн. / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им В. И. Ленина»; под общ. ред. Ю.С. Тверского, - Иваново: Б.н., 2013. Кн. 1: Проблемы и задачи / Ю.С. Тверской [и др.]. – 2013. – 260 с.
5. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций: в 3-х кн. / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им В. И. Ленина»; под общ. ред. Ю.С. Тверского, - Иваново: Б.н., 2013. Кн. 2: Проектирование / Ю.С. Тверской [и др.]. – 2013. – 436 с.
6. Тверской Д.Ю. Проблемы и задачи технологии многофункциональных АСУТП на этапе структурного синтеза систем автоматического управления / Д.Ю. Тверской, Ю.С. Тверской // Состояние и перспективы развития электротехнологии («XVIII Бенардосовские чтения»): Матер. Междунар. науч.-техн. Конф. – Иваново, 2015. – Том 2. – С.228 – 231.
7. Тверской Ю.С. «Полигон электростанций» - современное средство поддержки новой технологии создания АСУТП: опыт разработки и использования / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // Теплоэнергетика. – 2011, - №10, - С.70 – 75.
8. Формат и содержание отчета по обоснованию безопасности атомных электростанций МАГАТЭ, Вена, 2024 год STI/PUB/1884, - 2014, - С.7 – 12.
9. ГОСТ Р МЭК 61513 – 2020. «Системы контроля и управления, важные для безопасности атомных станций. Общие требования.»
10. Федеральный закон от 21.11.1995 №170 – ФЗ «Об использовании атомной энергии»
11. Р-15-ЦТАИ-КурАЭС-2 «Регламент Внесение изменений в GET-проект программно-технических комплексов на базе ТПТС для АСУ ТП Курской АЭС-2»
12. Зверков В.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС. Монография. — М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 560 с.
13. НП-026-16 «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, Требования

ния к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций»

14. НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». – 2016, Москва.

References

1. Bilenko V.A. Grekhov L.L., Svidersky A.G. Automation of domestic power units: development trends, problems, prospects. *Thermal power engineering*, 2012, No. 10, pp. 3-11.
2. Bilenko V.A. Grekhov L.L., Svidersky A.G., Strukov A.P. Operating experience of microprocessor automated control systems of powerful modernized power units. *Thermal power engineering*, 2013, No. 10, pp. 18-28.
3. Svidersky A.G., Bilenko V.A., Lysko V.V. Improvement of automated control systems for power equipment. *Power plants*, 2010, No. 1, pp. 59-67.
4. Tverskoy Yu.S [et al.] *Theory and technology of control systems. Multi-functional automated control systems of thermal power plants: in 3 books.* Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ivanovo State University of Energy named after V. I. Lenin; under the general editorship of Yu.S. Tverskoy, Ivanovo: B.N., 2013. Book 1: Problems and tasks, 2013. 260 p.
5. Tverskoy Yu.S [et al.] *Theory and technology of control systems. Multi-functional automated control systems of thermal power plants: in 3 books.* Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ivanovo State University of Energy named after V. I. Lenin; under the general Editorship of Yu.S. Tverskoy, Ivanovo: B.N., 2013. Book 2: Designing, 2013. 436 p.
6. Tverskoy D.Yu., Tverskoy Yu.S Problems and tasks of multifunctional automated control system technology at the stage of structural synthesis of automatic control systems *The state and prospects of the development of electrical technology ("XVIII Benardos Readings")*: Mater. Inter-dunar. scientific and technical Conference, Ivanovo, 2015, Vol. 2, pp. 228-231.
7. Tverskoy Yu.S. Golubev A.V., Nikonov A.N. "Landfill of power plants" - a modern means of supporting a new technology for creating automated control systems: experience in development and use. *Thermal power engineering*, 2011, No. 10, pp. 70-75.
8. Format and content of the IAEA Safety Justification Report on Nuclear Power Plants, Vienna, 2024 STI/PUB/1884, 2014, pp.7-12.
9. GOST R IEC 61513-2020. "Monitoring and control systems that are important for the safety of nuclear power plants. General requirements."
10. Federal Law No. 170 – FZ dated 11/21/1995 "On the Use of Atomic Energy"
11. R-15-CTAI-KurAES-2 "Regulations for making changes to the GET project of software and hard-

ware complexes based on TPTS for automated control systems of Kursk NPP-2"

12. Zverkov V.V. *Automated Process Control system of nuclear power plants*. Monograph. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2014. 560 p.
13. NP-026-16 "Federal norms and rules in the field of atomic energy use, Requirements for control systems important for the safety of nuclear power plants"
14. NP-001-15 "General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants". – 2016, Moscow.

УДК 66.023

Моделирование химической реакции с диффузией в трубчатом реакторе

К.Б. Матузаев, О.В. Матузаева, С.А.Чернявская

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, matuzaev@mail.ru, olga-matuzaeva@mail.ru, svalch74@mail.ru

Статья поступила 13.10.2025 г.; после доработки 15.10.2025 г.

Аннотация

Целью данной работы вывод аналитического решения для профиля концентрации реагента по длине аппарата, исследование граничных условий и анализ предельных случаев, когда модель должна сводиться к известным упрощенным решениям. Для достижения поставленной цели проводится детальный анализ модели — трубчатого реактора, в котором протекает необратимая реакция первого порядка, осложненная продольной диффузией с постоянным коэффициентом. Гипотеза исследования состоит в предположении, разработанная математическая модель позволит инженерам не только точнее прогнозировать выход продукта, но и анализировать, при каких условиях влиянием перемешивания можно пренебречь. Для подтверждения гипотезы поставленная задача решена с использованием дифференциальных уравнений. Результат решения интересен и важен — как с точки зрения физического явления, так и с точки зрения того, как анализировать непростые математические выкладки.

Ключевые слова: химические реакторы, молекулярная диффузия дифференциальные уравнения, концентрация, коэффициент диффузии, замкнутая математическая модель.

Modeling of a chemical reaction with diffusion in a tube reactor

K.B. Matuzaev, O.V. Matuzaeva, S.A. Chernyavskaya

Sevastopol state University, Sevastopol, 299053, Russia, matuzaev@mail.ru, olga-matuzaeva@mail.ru, svalch74@mail.ru

Received 13.10.2025 y.; received in final form 15.10.2025 y.

Annotation

The purpose of this work is to derive an analytical solution for the concentration profile of the reactant along the length of the apparatus, to study the boundary conditions, and to analyze the limiting cases when the model should be reduced to known simplified solutions. To achieve this goal, a detailed analysis of a model is conducted, which is a tubular reactor where an irreversible first-order reaction occurs, accompanied by longitudinal diffusion with a constant coefficient. The hypothesis of this research is that the developed mathematical model will allow engineers not only to accurately predict the yield of the product, but also to analyze the conditions under which the effect of mixing can be neglected. To confirm the hypothesis, the problem was solved using differential equations. The result is interesting and important, both from the point of view of the physical phenomenon and from the point of view of how to analyze complex mathematical calculations.

Keywords: chemical reactors, molecular diffusion, differential equations

Введение

Проектирование и оптимизация химических реакторов является центральной задачей энергетических технологий, связанных с аппаратами, которые реализуют различные водно-химические режимы. Среди разных типов реакторов

трубчатые аппараты занимают особое место благодаря своей относительной простоте, эффективности и широкой применимости в непрерывных процессах — от крупнотоннажного органического синтеза и процессов полимеризации до

специализированных технологических процессов с использованием сложносоставных теплоносителей. Ключевой принцип работы идеального трубчатого реактора (реактора идеального вытеснения, РИВ) предполагает, что каждое элементарное количество реагента движется вдоль аппарата как поршень, не смешиваясь с соседними порциями. В такой модели время пребывания всех частиц одинаково, а преобразование реагентов в продукты зависит только от кинетики реакции и этого времени.

Однако в реальных промышленных условиях поведение потока почти никогда не соответствует идеальной модели. Из-за турбулентности, паразитных течений и молекулярной диффузии возникает явление продольного перемешивания — выравнивания концентраций вдоль направления потока. Это перемешивание кардинально меняет картину процесса: частицы реагента проводят в реакторе разное время, что приводит к размыванию фронта реакции и может существенно снизить среднюю степень конверсии по сравнению с расчетной для РИВ.

Таким образом, создание адекватной математической модели, которая одновременно учитывает и химическое превращение, и механизм переноса вещества, представляет значительный практический интерес. Такая модель позволяет инженерам не только точнее прогнозировать выход продукта, но и анализировать, при каких условиях влиянием перемешивания можно пренебречь, а когда оно становится критическим фактором, определяющим размеры аппарата и режим его работы.

В данной статье проводится детальный анализ именно такой модели — трубчатого реактора, в котором протекает необратимая реакция первого порядка, осложненная продольной диффузией с постоянным коэффициентом. Целью работы является вывод аналитического решения для профиля концентрации реагента по длине аппарата, исследование граничных условий и анализ предельных случаев, когда модель должна сводиться к известным упрощенным решениям.

Постановка задачи

Цель моделирования: Описать, как меняется концентрация реагента внутри химического реактора трубчатого типа, где одновременно происходят два процесса: течение потока и хи-

мическое превращение, осложненное диффузией.

Ключевые параметры системы:

Реакция: Превращение вещества M в продукт N . Скорость этой реакции пропорциональна текущей концентрации M (кинетика первого порядка) и описывается константой скорости k (измеряется в ч^{-1}).

Геометрия: Реактор представляет собой трубу длиной L и с единичной площадью поперечного сечения (1 м^2), что упрощает математические выкладки, так как объем участка трубы численно равен его длине.

Гидродинамика: Реагент подается в аппарат с постоянной объемной скоростью ω ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Перенос: В системе действует молекулярная диффузия, характеризуемая коэффициентом диффузии D ($\text{м}^2/\text{ч}$). Модель предполагает, что это значение постоянно по всему реактору.

Начальные условия: Концентрация вещества M в поступающем потоке равна C_0 .

Математическая модель

Разработка модели основана на законе сохранения массы (материальном балансе) для бесконечно малого элемента объема реактора.

Система координат: Вдоль оси реактора вводится координата x . Начало координат ($x = 0$) соответствует входу в реакционную зону. Область до входа ($x < 0$) — это подводящий канал, а область после ($x > 0$) — собственно реактор.

Переменные концентрации: Концентрация M в подводящем канале обозначается как $c(x)$, а внутри реактора — как $y(x)$.

Вывод основного уравнения:

1. Выбирается элементарный отрезок внутри реактора длиной Δx .

2. Учитываются все потоки массы, проходящие через этот отрезок за время:

Конвективный приход (за счет течения): $\omega \cdot y(x)$

Конвективный

уход:

$$\omega \cdot y(x + \Delta x) \approx \omega \cdot \left(y + \frac{dy}{dx} \Delta x \right)$$

Диффузионный приход (согласно закону

Фика): $-D \frac{dy}{dx}$

Диффузионный уход:

$$-D \frac{dy}{dx}(x + \Delta x) \approx -D \left(\frac{dy}{dx} + \frac{d^2 y}{dx^2} \Delta x \right)$$

3. Учитывается сток вещества из-за химической реакции. Поскольку реакция первого порядка, скорость исчезновения M в объеме Δx равна $ky\Delta x$.

4. Составляется баланс: (Приход - Уход) = Расход на реакцию.

5. После подстановки всех членов, сокращения и перехода к пределу при $\Delta x \rightarrow 0$ получается классическое дифференциальное уравнение, описывающее конвекцию, диффузию и реакцию:

$$D \frac{d^2 y}{dx^2} - \omega \frac{dy}{dx} - ky = 0$$

Для подводящего канала, где реакция не идет ($k = 0$), уравнение упрощается:

$$D \frac{d^2 y}{dx^2} - \omega \frac{dy}{dx} = 0$$

Решение дифференциальных уравнений

Данные уравнения являются линейными и имеют постоянные коэффициенты, что позволяет искать решение в стандартной аналитической форме.

1. Находятся корни характеристического уравнения. Для основного уравнения подставляется пробное решение вида $y = e^{mx}$, что приводит к квадратному уравнению:

$$Dm^2 - \omega m - k = 0$$

2. Определяются корни m : Решение этого уравнения дает два корня:

$$m = \frac{\omega \pm \sqrt{\omega^2 + 4kD}}{2D}$$

Для компактности вводится безразмерный

параметр $\alpha = \sqrt{1 + \frac{4kD}{\omega^2}}$, который характери-

зует соотношение между скоростью реакции, диффузии и течения. Тогда корни записываются

как $m = \frac{\omega(1 \pm \alpha)}{2D}$.

3. Записывается общее решение: Так как корни действительные и различные, общее решение для концентрации внутри реактора представляет собой сумму двух экспонент:

$$y(x) = Ae^{\frac{\omega(1+\alpha)x}{2D}} + Be^{\frac{\omega(1-\alpha)x}{2D}}$$

Здесь A и B — константы интегрирования, которые будут найдены из граничных условий.

4. Решение для подводящего канала ($x < 0$) оказывается более простым (линейная функция), так как соответствующее характеристическое уравнение имеет один корень, равный нулю.

Граничные условия и определение констант

Для нахождения четырех неизвестных констант (A , B и две константы из решения для $c(x)$) требуется четыре граничных условия, которые физически описывают поведение системы на ее границах.

1. Условие на бесконечности перед входом: При $x \rightarrow -\infty$ концентрация должна оставаться неизменной и равной исходной: $c = c_0$. Это условие определяет одну из констант в решении для $c(x)$.

2. Условие непрерывности концентрации на границе: В точке $x = 0$ (вход в реактор) не должно быть скачка концентрации: $c(0) = y(0)$.

3. Условие непрерывности потока на границе: В точке $x = 0$ суммарный поток массы (конвективный + диффузионный) должен быть непрерывным. Это гарантирует сохранение вещества.

4. Условие на выходе из реактора: На выходе ($x = L$) часто предполагается, что диффузионный поток равен нулю (т.н. условие Неймана). Это физически означает, что за пределами реактора состав потока определяется только течением, а не диффузией назад в реактор.

Решение полученной системы из четырех

уравнений позволяет однозначно выразить константы A и B через известные параметры задачи (c_0, ω, D, k, L).

Финальное выражение для концентрации

После подстановки найденных констант A и B в общее решение получается итоговая формула, описывающая профиль концентрации $y(x)$ вдоль всего реактора. Хотя итоговое выражение выглядит громоздким из-за экспонент, оно является точным аналитическим решением.

Смысл результата: Эта формула позволяет рассчитать концентрацию реагента M в любой точке реактора, учитывая совместное влияние продольного перемешивания (диффузии) и химической реакции.

Частный случай: диффузией можно пренебречь

Это важная проверка модели на адекватность. Если коэффициент диффузии D очень мал (стремится к нулю), это соответствует идеальному режиму вытеснения, когда перемешивание вдоль оси реактора отсутствует.

При $D \rightarrow 0$ параметр $\alpha \rightarrow \infty$, и прямое использование финальной формулы становится невозможным.

Применяя математический аппарат (правило Лопиталя) к исходному уравнению или к его решению, можно получить предельное выражение.

В результате модель сводится к классическому уравнению для идеального трубчатого реактора без диффузии:

$$\frac{c_0 - y}{c_0} = 1 - e^{-kL/\omega}$$

Левая часть — это доля прореагировавшего вещества (конверсия).

Выражение L/ω имеет размерность времени и представляет собой среднее время пребывания вещества в реакторе.

Вывод: Проведенное исследование позволило разработать замкнутую математическую модель, описывающую совместное протекание химической реакции и диффузионного переноса в трубчатом реакторе. Полученное аналитическое решение (уравнение 5) является мощным инструментом для количественного анализа вли-

яния различных факторов на эффективность работы аппарата.

Наиболее важным практическим выводом является определение безразмерного параметра

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{4kD}{\omega^2}},$$

который можно интерпретиро-

вать как критерий, характеризующий соотношение между скоростью реакции (k), интенсивностью диффузии (D) и скоростью потока (ω). Анализ этого параметра позволяет классифицировать режимы работы реактора:

1. При больших значениях ω (высокая скорость потока) и малых D параметр α стремится к 1. В этом случае диффузионным членом в уравнении можно пренебречь, и модель переходит в классическое уравнение для реактора идеального вытеснения (уравнение 6). Этот режим является желательным для быстрых реакций, так как обеспечивает максимальную конверсию.
2. При малых ω или значительных D параметр α становится велик, что указывает на доминирующую роль продольного перемешивания. В этом режиме реактор по своим характеристикам приближается к идеальному смешиванию, что приводит к снижению средней конверсии, поскольку часть реагента быстро "проскакивает" через аппарат, не успевая прореагировать.

Проверка модели показала ее состоятельность: при стремлении коэффициента диффузии D к нулю решение асимптотически переходит в уравнение для РИВ. Это подтверждает корректность математического аппарата и адекватность выбранных граничных условий.

Перспективы применения модели: Разработанное решение может быть непосредственно использовано для:

- **Оптимизации конструктивных параметров** (длины и диаметра реактора) при заданных кинетических и гидродинамических условиях.
- **Анализа чувствительности** процесса к колебаниям скорости подачи сырья или начальной концентрации.

Оценки допустимого уровня перемешивания, при котором еще сохраняется требуемая степень превращения реагентов.

Заключение

Дальнейшим развитием модели может стать учет более сложной кинетики (реакции второго

порядка, параллельные или последовательные реакции), переменного коэффициента диффузии или условий теплопередачи промышленных теплообменных аппаратов, когда необходимо совместно решать уравнения материального и теплового баланса.

Список литературы

1. Поваров В.П. Водно-химический режим АЭС-2026: Руководство для организаций и компаний, осуществляющих безопасное и эффективное ведение технологических процессов при эксплуатации энергоблоков атомных электрических станций. Воронеж: Диамант, 2022.-629с.
2. Тураев Н. С., Жерин И.И. Химия и технология урана: Учебное пособие для вузов. – М. ЦНИИ-АТОМИНФОРМ, 2005, 407с.
3. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Том III, часть 2. — М.: Наука, 1974. – 672 с.
4. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. – 9 изд. – М.: Айрис-пресс, 2009. – 608 с.
5. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика: Учеб. для вузов. Том 1 – М.: Дрофа, 2004. – 284 с.

References

1. Povarov V.P. Water and Chemical Regime of NPP-2026: A Guide for Organizations and Companies Responsible for the Safe and Efficient Operation of Nuclear Power Plant Power Units. Voronezh: Diamant, 2022.-629p.
2. Turaev N. S., Zherin I. I. Chemistry and Technology of Uranium: Textbook for Universities. Moscow: TsNIIAtominform, 2005, 407 p.
3. Smirnov V. I. Course of higher mathematics. Volume III, part 2. — Moscow: Nauka, 1974. – 672 p.
4. Pismeniy D.T. Lecture notes on higher mathematics: a complete course. – 9th ed. – Moscow: Iris Press, 2009. - 608 p .
5. Bugrov Ya.S., Nikolsky S.M. Higher Mathematics: Studies for universities. Volume 1 – M.: Bustard, 2004. – 284 p.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.92, 621.311.24

Оптимизация энергоснабжения удаленных сельских потребителей в Республике Крым при использовании ветроэнергетических установок

Абдурахманов Р.Н.¹, Асанов М.М.¹, Бекиров Э.А.¹, Кувшинов В.В.²,
Коломийченко В.П.³

¹ Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского Физико-технический институт,
Симферополь, 29500, Россия

² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия

³ Черноморское высшее военно-морское орденов Нахимова и Красной Звезды училище им. П. С. Нахимова,
Севастополь, 299028, Россия, rechatfor@gmail.com VVKuvshinov@mail.sevsu.ru

Статья поступила 06.10.2025 г.; после доработки 08.10.2025 г.

Аннотация

Рассматривается проблема энергоснабжения удаленных сельских населенных пунктов Республики Крым, характеризующихся развитым сельскохозяйственным сектором, в частности, тепличным хозяйством. Проведенные расчеты демонстрируют техническую возможность реализации проекта, который не только обеспечит энергетическую независимость села и его сельскохозяйственных предприятий, но и позволит рационально использовать непродуктивные земельные угодья.

Ключевые слова: энергоснабжение, возобновляемая энергетика, ветрогенератор, автономное энергоснабжение, сельские потребители.

Optimization of energy supply for remote rural areas in the Republic of Crimea through the use of wind energy systems

Abdurakhmanov R.N.¹, Asanov M.M.¹, Bekirov E.A.¹,
Kuvshinov V.V.², Kolomiychenko V.P.³

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Physics and Technology, Simferopol, 29500

² Sevastopol State University, Sevastopol, 299053

³ P.S. Nakhimov Black Sea Higher Naval School of the Orders of Nakhimov and the Red Star,
Sevastopol, 299028

Received 06.10.2025 y.; Received in final form 08.10.2025 y.

Abstract

The paper considers the problem of energy supply for remote rural settlements in the Republic of Crimea, which are characterized by a developed agricultural sector, in particular, greenhouse farming. The calculations performed demonstrate the technical feasibility of a project that will not only ensure the energy independence of the village and its agricultural enterprises but also allow for the rational use of unproductive land.

Keywords: energy supply, renewable energy, wind turbine, autonomous energy supply, rural consumers.

Введение

Энергетическая безопасность и устойчивое развитие удаленных сельских территорий является одной из ключевых задач для Республики Крым. Удаленность многих населенных пунктов от магистральных сетей, высокие тарифы на электроэнергию создают существенные препятствия для развития агропромышленного комплекса региона. Особенно остро эта проблема стоит для энергоемких производств, таких как круглогодичные тепличные комплексы. Крым обладает значительным потенциалом для возобновляемых источников энергии, это дает возможность для создания децентрализованных энергосистем. Важным аспектом является рациональное использование земель, где установка ветрогенераторов на малопригодных или непродуктивных землях (таких как солончаки) позволяет избежать изъятия из оборота ценных сельскохозяйственных угодий. В представленной работе на примере конкретного села проведен детальный анализ энергопотребления, выявлен дефицит мощности и нестабильность централизованного энергоснабжения. В качестве решения предложена концепция перевода потребителей на автономное энергоснабжение с использованием возобновляемых источников энергии. Исследован потенциал ветровой энергии на прилегающих к селу малопригодных для сельского хозяйства землях (солончаках). На основе данных о ветровом режиме и расчетного энергопотребления выполнено техническое обоснование установки ветроэнергетической установки (ВЭУ) оптимальной мощности. Целью данного исследования является разработка модели автономного энергоснабжения удаленного сельского поселения в Крыму с развитым тепличным хозяйством за счет строительства ветроэнергетической установки на прилегающих солончаковых территориях.

При проведении работы были поставлены следующие задачи исследования:

- проведение анализа и расчёт совокупного энергопотребления сельского поселения с учетом бытовой нагрузки населения и технологических потребностей тепличного комплекса;
- оценка ветроэнергетического потенциала территории, прилегающей к селу, с условием малопригодных для сельского хозяйства земель;
- подбор типа и мощности ветрогенераторной установки, способной обеспечить расчет-

ную нагрузку и функционирование в автономном режиме.

В качестве объекта исследования выбрано удаленное сельское поселение в северо-западной части Республики Крым с. Дмитровка с населением 915 человек, тепличным хозяйством площадью 2 га и животноводческим хозяйством на 500 голов крупного рогатого скота [1]. Научная новизна работы заключается в комплексном подходе, объединяющем детальный аудит энергопотребления конкретного сельскохозяйственного поселения с технико-экономическим моделированием автономной энергосистемы, интегрированной в локальную инфраструктуру с учетом агроклиматических и земельных особенностей региона (использование местности с солончаком). Результаты работы могут быть использованы органами региональной власти и малыми агропромышленными предприятиями Крыма при планировании мероприятий по повышению энергетической независимости и устойчивости сельских территорий.

Проведем оценку состав почвы на территории проектируемой площадки вблизи села Дмитровка [2]. На рисунке 1 показан участок местности преобладающей почвой, занимаемой солончаками и засоленный почвы.

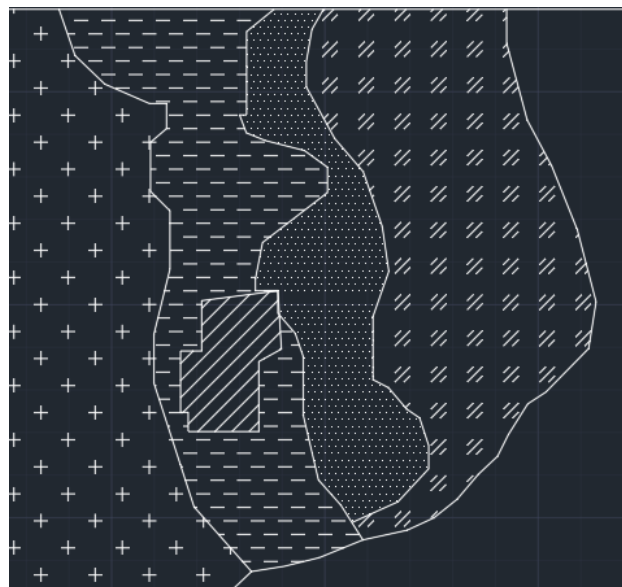


Рис. 1. Состав почвы местности для установки ВЭУ.

Солонцовые почвы неблагоприятны для выращивания сельскохозяйственных культур. Пахотный слой в них во влажном состоянии заплывает, высохший покрывается плотной коркой, растрескивается. При пахоте образуются плотные крупные глыбы. Их солонцовый горизонт

весной набухает, становится водонепроницаемым, из-за чего на пятнах солонцов долго задерживается вода, что препятствует своевременному проведению на них полевых работ.

Таблица 1. Легенда условных обозначений к карте почв

	каштановые солонцеватые
	каштановые солонцеватые и солончаковатые почвы
	засоленные почвы
	солончаки и солончаковый мул
	населенный пункт

Солончаки — это засоленные почвы, в которых легкорастворимые соли (более 1%) содержатся во всем их профиле. Такая концентрация солей в целом вредна для растений.

На данных территориях невозможно выращивать сельскохозяйственные культуры и использовать для выпаса скота. Поэтому данную территорию эффективно использовать для выработки электроэнергии и обеспечение ею близлежащее село.

Потребляемая электрическая энергия населением и сельскохозяйственными объектами показаны в таблице 1.

Таблица 1. Потребление электроэнергии

Потребители	Количество	Энергия на одну единицу (приблизительно) в год	Необходимая Мощность в год (МВт * ч)
Население	915 человек	840 кВт/ч на человека [3]	768.6
Коровник	500 голов	437 кВт на голову [4]	218.5
Теплицы	20 тыс. м ²	70 кВт на м ² [5]	1400
Итого			2387,1

Площадка под постройку ВЭС показана на

рисунке 2 составляет 8 км² 2*4 км.



Рис. 2. Площадка ВЭС и расположение ВУЭ.

ВЭУ устанавливаются плотинным методом на отдалении от населенного пункта не менее 1 км на рисунке изображены красной линией. Данное расположение ВЭУ обусловлено розой ветров на данном участке, показанной на рисунке 3, Среднегодовая скорость ветра на данном участке составляет 3,3м/с [6].

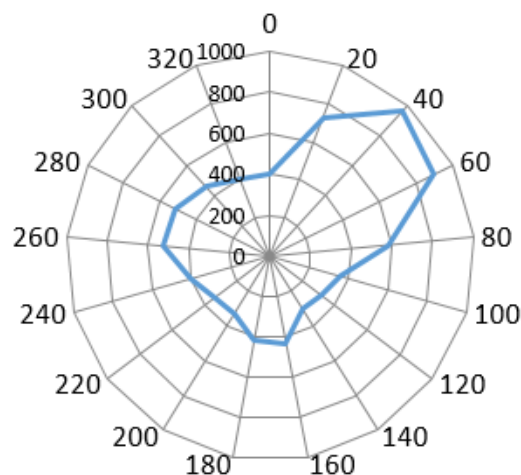


Рис. 3. Роза ветров с. Дмитровка.

Для подбора оптимального размера и мощности ветрогенератора проведем выбор из нескольких различных типов, показанных в таблице 1. Расстояние между ветрогенераторами (L) примем равным пяти диаметрам.[7]

Для подбора оптимального размера и мощности ветрогенератора проведем выбор из нескольких различных типов, показанных в таблице 1. Расстояние между ветрогенераторами (L) примем равным пяти диаметрам.[7]

$$L = 5 * D, \quad (1)$$

где L- расстояние между генераторами D-

диаметр ротора ветрогенератора.

Количество ветрогенераторов найдем по формуле 2. Округляем до ближайшего целого числа количества ВЭУ. Длина дуги(l) составляет 4,65 км

$$n = \frac{l}{L}, \quad (2)$$

где l - длина дуги, n - количество ВЭУ

Расчет фактической мощности одной одиночно стоящей ВЭУ на площадке ВЭС находят по следующей формуле [8]:

$$P = A * C_p * \rho * \eta_{\text{э}} * \eta_{\text{м}} * \frac{v^3}{2}, \quad (3)$$

где A - площадь, ометаемая ветроколесом, m^2 ; C_p - коэффициент использования энергии ветра; ρ - плотность воздуха ($\rho = 1.2255 \text{ кг/м}^3$); v - скорость ветра, м/с; $\eta_{\text{э}}$ - КПД генератора ($\eta_{\text{э}} = 0,95$); $\eta_{\text{м}}$ - КПД редуктора ($\eta_{\text{м}} = 0,95$).

Зависимость скорости ветрового потока от высоты башни определяем по формуле (4) [9]

$$v = v_0 * \left(\frac{H}{H_0}\right)^k, \quad (4)$$

где v_0 - скорость ветра на высоте H_0 , м/с; H_0 - высота, на которой проводилась регистрация данных ($H_0 = 10 \text{ м}$); H - высота горизонтальной оси ветроколеса, м; k - коэффициент Хеллмана (для Республики Крым принимаем $k = 0,2$ [10]).

Ожидаемый объем электроэнергии, вырабатываемый ВЭС в год W_n , без учета потерь рассчитывается по формуле (5) [11]:

$$W_n = (\sum P_i * t_i) * n, \quad (5)$$

где t_i - продолжительность текущей скорости ветра, ч; P_i - мощность ВЭУ при текущей скорости ветра, МВт; n - количество установок.

Произведем подбор различных ветрогенераторов в диапазоне мощности 100- 1300 кВт [12]. Выбранные генераторы и их технические характеристики показаны в таблице 2.

Таблица 2 Типы ВЭУ

Тип ВГ	P ном., кВт	D ротор., м	H баш., м	L, м	N	PВЭС, МВт
Bonus 100/30	100	23	24/30	115	40	4
Bonus B31/300	300	31	30	155	30	9
Bonus AN 600/41	600	41	42/50	205	23	13,8
Bonus 1000/54	1000	54.2	50/60/70	271	17	17
Bonus B62/1300	1300	62	68/80/90	310	15	19,5

Вырабатываемая электрическая мощность

W различного типа ВЭУ показана на рисунке 4

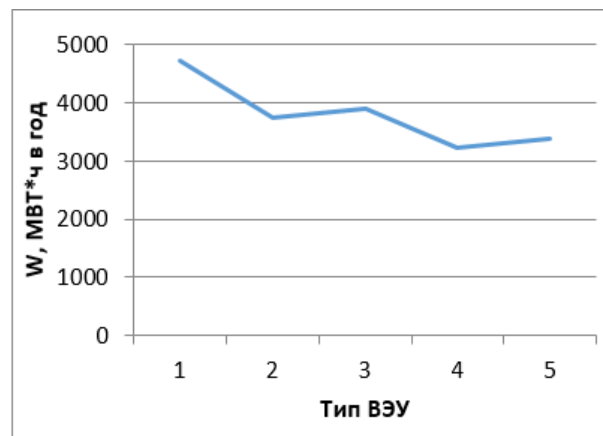


Рис. 4. Вырабатываемая мощность ВЭУ различного типа.

Заключение

Проведенное исследование по оптимизации энергоснабжения удаленного сельского поселения в Республике Крым позволило сделать следующие основные выводы:

По результатам детального аудита установлено, что совокупное годовое энергопотребление населенного пункта и тепличного комплекса составляет 2387,1 МВт*ч. Для покрытия данной нагрузки была предложена установка Bonus 100/30 мощностью 100 кВт на прилегающих к селу непродуктивных землях (солончаках). Расчетная годовая выработка электроэнергии подобранной ВЭУ, с учетом ветрового потенциала территории, составляет 4725 МВт*. Годовая выработка ВЭУ покрывает годовое потребление на 198%.

Данный результат свидетельствует о том, что предлагаемая ветроэнергетическая установка не только полностью обеспечивает автономное энергоснабжение села и сельского хозяйства, но и производит значительный избыток энергии, который может быть направлен на:

- развитие дополнительных энергоемких производств (например, капельное орошение больших площадей открытого грунта);
- продажу в общую сеть для получения дополнительного дохода;
- создание системы резервного питания (например, с использованием аккумуляторных батарей);
- электроснабжение социальных объектов (школа, больница) по более высоким стандартам.

Таким образом, технико-экономическое

обоснование подтверждает высокую эффективность и целесообразность использования ветрогенераторов, установленных на малопригодных землях, для перевода удаленных сельскохозяйственных поселений Крыма на полностью автономное и устойчивое энергоснабжение. Реализация подобного проекта не только решает проблему энергодефицита, но и создает основу для дальнейшего социально-экономического развития территории, одновременно рационально используя непродуктивные земельные ресурсы.

Список литературы

1. Почвенная карта 1967 г. http://www.etomesto.ru/map-krym_pochva-1967/?y=44.570446&x=33.344128
2. Социально-экономический паспорт Советского района Республики Крым по состоянию на 01.01.2025 г.
3. Постановление Правительства Российской Федерации № 614 от 22.07.2013 «О порядке установления и применения социальной нормы потребления электрической энергии (мощности) и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам установления и применения социальной нормы потребления электрической энергии (мощности)».
4. Электропотребление на животноводческих фермах по содержанию крупного рогатого скота / Г.И. Янукович, канд. техн. наук, профессор, Е.В. Влашевич, аспирант (БГАТУ) // Энергетика и транспорт. С. 14–17.
5. СП 107.13330.2012. Свод правил. Теплицы и парники. Актуализированная редакция СНиП 2.10.04-85 (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 № 271) (ред. от 02.05.2024).
6. Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии (NREL). NSRDB: National Solar Radiation Database. <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>
7. Salomon H., Drechsler M., Reutter F. Minimum distances for wind turbines: A robustness analysis of policies for a sustainable wind power deployment. Energy Policy. 2020. Vol. 140. 111431.
8. Сидоренко Г.И., Алджамил А. Модель оптимизации параметров ветровой электростанции // Евразийский Союз Ученых. 2021. № 15 (82). С. 35–41.
9. Дерюгина Г.В., Чернов Д.А., Тягунов М.Г., Алиходжина. Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов полуострова Камчатка // Вестник Московского энергетического института. 2019. № 1. С. 35–42.
10. Савенко А.Е., Османов Э.Ш. Расчет реализуемой мощности и выработки электроэнергии одиночно стоящей ветроустановкой // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2019. № 18 (181). С. 47–59.
11. Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Ахмед Алькаата. Повышение энергетического потенциала пластины при использовании энергоустановок ветроэнергетики // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 7 (59). С. 95–103.
12. База данных ветровых турбин. <https://en.wind-turbine-models.com>

References

1. Soil map of 1967. Available at: http://www.etomesto.ru/map-krym_pochva-1967/?y=44.570446&x=33.344128
2. Socio-economic passport of Sovetsky District of the Republic of Crimea as of 01.01.2025.
3. Government of the Russian Federation. Decree No. 614 of July 22, 2013 “On the procedure for establishing and applying the social norm of electricity (capacity) consumption and on amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the establishment and application of the social norm of electricity (capacity) consumption.”
4. Yanukovich G.I., Vlashevich E.V. Electricity consumption at livestock farms for cattle breeding. Energy and Transport, pp. 14–17.
5. SP 107.13330.2012. Code of Practice. Greenhouses and hothouses. Updated edition of SNiP 2.10.04-85 (approved by Order of the Ministry of Regional Development of Russia of 30.06.2012 No. 271) (as amended on 02.05.2024).
6. National Renewable Energy Laboratory (NREL). NSRDB: National Solar Radiation Database. Available at: <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>
7. Salomon H., Drechsler M., Reutter F. Minimum distances for wind turbines: A robustness analysis of policies for a sustainable wind power deployment. Energy Policy. 2020. Vol. 140. 111431.
8. Sidorenko G.I., Aldzhamil A. Optimization model of wind power plant parameters. Eurasian Union of Scientists. 2021. No. 15 (82), pp. 35–41.
9. Deryugina G.V., Chernov D.A., Tyagunov M.G., Alikhodzhina. Models of the vertical wind profile based on data from wind measurement complexes of the Kamchatka Peninsula. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute. 2019. No. 1, pp. 35–42.
10. Savenko A.E., Osmanov E.Sh. Calculation of achievable capacity and electricity generation by a stand-alone wind turbine. Proceedings of Agricultural Science of Tavrida. 2019. No. 18 (181), pp. 47–59.
11. Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Ahmed Alkaata. Increasing the energy potential of a plate when using wind energy installations. Construction and Technogenic Safety. 2017. No. 7 (59), pp. 95–103.
12. Wind Turbines Database. Available at: <https://en.wind-turbine-models.com>

УДК 620.92

Сравнительный анализ по применению тригенерационных установок на основе ВИЭ в Крыму и Ростовской области

Е.Г. Какушина¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹littie@mail.ru

Статья поступила 10.10.2025 г.; после доработки 14.10.2025 г.

Аннотация

В данной статье исследуется потенциал интеграции тригенерационных установок, работающих на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в энергосистемы регионов. Повышение энергоэффективности и надежности региональных энергосистем является одной из ключевых задач современной энергетической политики. Для оценки применяется методология, включающая технико-экономический анализ, расчет экологических показателей и моделирование работы системы в различных климатических условиях. В качестве объектов исследования рассматриваются гибридные системы.

Ключевые слова: тригенерация, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность, региональная энергосистема, децентрализованное энергоснабжение, гибридная энергоустановка, абсорбционная холодильная машина, технико-экономический анализ

Comparative analysis of the use of renewable energy-based trigeneration plants in the Crimea and the Rostov region

E.G. Kakushina¹

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹littie@mail.ru

Received 10.10.2025 y.; received in final form 14.10.2025 y.

Abstract

This article explores the potential of integrating trigeneration plants powered by renewable energy sources (RES) into the energy systems of the regions. Improving the energy efficiency and reliability of regional energy systems is one of the key objectives of modern energy policy. A methodology is used for the assessment, including technical and economic analysis, calculation of environmental indicators and modeling of the system's operation in various climatic conditions. Hybrid systems are considered as objects of research.

For citation: trigeneration, renewable energy sources, energy efficiency, regional energy system, decentralized energy supply, hybrid power plant, absorption refrigerating machine, technical and economic analysis.

Введение

Современные вызовы, связанные с истощением ископаемых энергоресурсов, ростом тарифов на энергию и ужесточением экологических стандартов, обуславливают необходимость перехода к более эффективным и устойчивым моделям энергоснабжения. Особую актуальность эта проблема приобретает на региональном уровне,

где зачастую существуют удаленные и энергодефицитные территории. Одним из наиболее перспективных направлений развития является децентрализация энергосистем с использованием когенерационных и тригенерационных установок [1].

Тригенерация, подразумевающая совместную выработку электрической, тепловой энергии и холода, позволяет существенно повысить

общий коэффициент полезного использования топлива и первичной энергии.

Тригенерация представляет собой расширенный вариант когенерации, при котором утилизируется не только тепло, но и холод, производимый за счет тепловой энергии с помощью абсорбционных или адсорбционных холодильных машин (АБХМ). Это особенно востребовано в регионах с жарким климатом, где значительную часть года существует потребность в кондиционировании [2].

Интеграция в такие установки возобновляемых источников энергии, таких как солнечная радиация и биомасса, позволяет создать практически автономные, экологически чистые энергетические комплексы [3].

Современные вызовы в энергетике, такие как рост тарифов, истощаемость ископаемых ресурсов и ужесточение экологических стандартов, актуализируют поиск комплексных решений для региональных энергосистем. Особую остроту эти проблемы приобретают в удаленных и изолированных регионах, где затраты на транспортировку топлива и потери в сетях значительно выше.

Несмотря на очевидные преимущества, широкому внедрению тригенерационных систем на основе ВИЭ препятствует недостаток комплексных исследований, количественная оценка и их эффективность применительно к конкретным климатическим и экономическим условиям регионов.

Существующие работы часто фокусируются либо только на технической, либо только на экономической составляющей, не предлагая интегрированного подхода к оценке [4].

Постановка задачи

Для проведения сравнительного анализа была разработана комплексная методика и проведена оценка эффективности интеграции тригенерационных установок на основе ВИЭ в энергосистеме регионов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель гибридной тригенерационной системы, включающей источники на основе ВИЭ (фотоэлектрические панели, биогазовая установка) и оборудование для преобразования энергий (АБХМ, тепловой насос, система аккумулирования).
2. Определить ключевые показатели эффек-

тивности (КПИ) для технико-экономического и экологического анализа.

3. Провести имитационное моделирование работы системы для регионов Юга России с учетом сезонных изменений нагрузки.
4. Сравнить полученные показатели с традиционной системой энергоснабжения.

Методология исследования

1. Моделируемая система

В состав гибридной энергетической системы входят:

- Источник электричества: Фотоэлектрическая (PV) станция (пиковая мощность 200 кВт).
- Источник тепла: Биогазовая установка, работающая на отходах агропромышленного комплекса региона, с когенерационной установкой (микротурбина) мощностью 100 кВтэл.
- Оборудование для утилизации тепла: Абсорбционная холодильная машина (АБХМ), использующая сбросное тепло микротурбины и солнечный теплоноситель для производства холода.
- Система аккумулирования: Теплоаккумуляторы и аккумуляторная батарея для сглаживания пиков нагрузки и обеспечения стабильности.
- Резервный источник: Связь с централизованной сетью.

2. Ключевые показатели эффективности (КПИ)

Для оценки были выбраны следующие КПИ:

- Первичный энергетический коэффициент (PEF) - отношение полезно использованной энергии (электричество + тепло + холод) к затраченной первичной энергии из ВИЭ и биогаза [5].
- Коэффициент экономии первичной энергии (PES) - процентное снижение расхода первичной энергии по сравнению с раздельной схемой.
- Снижение выбросов CO₂ - расчетное годовое снижение выбросов парниковых газов.
- Срок окупаемости капиталовложений (SPB).
- Уровень автономности - доля энергии, производимой системой самостоятельно, без закупки из сети.

3. Математическая модель

Моделирование работы системы проводилось в программной среде с почасовым шагом в течение года. Баланс мощности описывается

уравнением:

$$P_{PV}(t) + P_{Bio}(t) + P_{Grid}(t) = P_{Load,el}(t) + P_{Charge/Disch}(t) \quad (1)$$

где:

$P_{PV}(t)$ – мощность PV-станции;

$P_{Bio}(t)$ – электрическая мощность биогазовой микротурбины;

$P_{Grid}(t)$ – мощность, покупаемая/продаваемая в сеть;

$P_{Load,el}(t)$ – электрическая нагрузка;

$P_{Charge/Disch}(t)$ – мощность заряда/разряда АКБ.

Тепловой и холодильный балансы рассчитывались аналогично с учетом КПД и коэффициентов трансформации (COP) АБХМ и теплового насоса.

Результаты

Результаты годового моделирования для объекта, расположенного в г. Симферополь (Республика Крым), представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные показатели эффективности систем для объекта в Крыму

Показатель	Традиционная система	Тригенерационная система на ВИЭ	Изменение, %
Годовое потребление из сети, кВт*ч	810 000	300 000	-63,0%
Годовое потребление газа, м³	95 000	38 000 (биогаз)	-60,0%
Выбросы CO ₂ , т/год	460	120	-73,9%
PES, %	-	62.1	-
Уровень автономности, %	0	85	-

Выбор данного региона обусловлен высоким уровнем инсоляции, значительной продолжительностью сезона кондиционирования и наличием проблем с пиковыми нагрузками в летний период в крымской энергосистеме [6].

На рисунке 1 наглядно видно, что производство электроэнергии PV-станцией и выработка холода АБХМ имеют ярко выраженный летний пик, который идеально синхронизирован с пиковыми нагрузками на кондиционирование в крымской энергосистеме. Это является ключевым преимуществом, так как система не только покрывает собственные нужды, но и способна разгружать сети в наиболее напряженные периоды

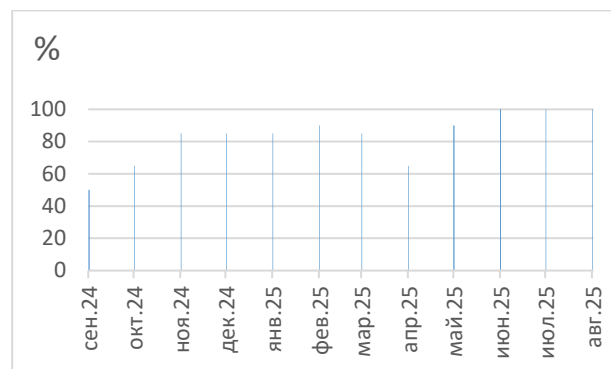


Рис.1. График помесечного распределения потребления энергии для климатических условий Крыма.

Результаты годового моделирования для объекта в Ростовской области представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Сравнительные показатели эффективности систем для объекта в Крыму

Показатель	Традиционная система	Тригенерационная система на ВИЭ	Изменение, %
Годовое потребление из сети, кВт*ч	850 000	375 000	-55.9%
Годовое потребление газа, м³	98 500	42 000 (биогаз)	-57.4%
Выбросы CO ₂ , т/год	485	145	-70.1%
PES, %	-	58.5	-
Уровень автономности, %	0	78	-

На рисунке 2 видно, что в летние месяцы система демонстрирует максимальную эффективность за счет высокой производительности PV-панелей и полной загрузки АБХМ для кондиционирования. В зимний период основная нагрузка ложится на биогазовую установку.

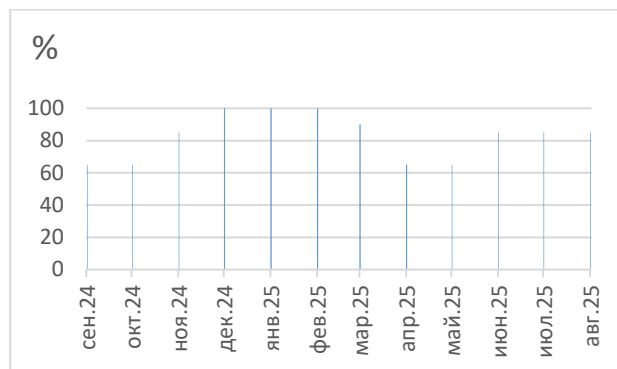


Рис.2. График помесечного распределения потребления электроэнергии в Ростовской области.

Анализ результатов

В таблицах ниже систематизированы итоги анализа (см. таб. 3, 4), которые представляет собой ключевой элемент аналитической части работы.

Значимыми внешними факторами для данных регионов выступают:

- климат – в Крыму он жаркий, продолжительное лето (до $+35...+45^{\circ}\text{C}$), количество солнечных дней больше, мягкая зима; в Ростовской области - умеренно-континентальный, жаркое лето (до $+30...+35^{\circ}\text{C}$), холодная зима (до $-20...-25^{\circ}\text{C}$).
- экология и туризм – в Крыму высокий экологический стандарт из-за курортной специализации; в Ростовской области - промышленно-аграрный регион с менее строгими экологическими требованиями в некурортных зонах.
- топливная инфраструктура – в Крыму магистральный газ (не всегда стабильно), альтернативы: СУГ, дизельное топливо; в Ростовской области - развитая сеть магистрального газа, альтернативы: уголь (для крупных объектов).
- экономика и тарифы - в Крыму высокие тарифы на электроэнергию, изолированная энергосистема, зависимость от генерации внутри полуострова; для Ростовской области тарифы близки к среднероссийским, энергосистема интегрирована в ЕЭС России

[7].

Выше перечисленные факторы делают тригенерацию привлекательной в обоих регионах, но драйверы и ограничения для ее успешного применения — различны.

Полученные результаты убедительно доказывают, что интеграция таких систем в региональные энергокомплексы, особенно в регионах с высокой инсоляцией, позволяет достичь синергетического эффекта.

Таблица 3. Анализ результатов

Наименование показателей	Крым	Ростовская область
Техническая эффективность:	Показатели эффективности оказались выше, чем в базовом сценарии для Юга России. PES составил 62,1%, а уровень автономности достиг 85%. Это объясняется более высоким годовым приходом солнечной радиации (порядка $1400-1500 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$), что обеспечивает большую выработку PV-станцией и, как следствие, более полную загрузку АБХМ в течение 7-8 месяцев в году.	Внедрение тригенерационной системы позволило значительно повысить эффективность использования первичной энергии. PES составил 58.5%, что свидетельствует о более чем двукратном повышении эффективности по сравнению с раздельной выработкой. Высокий уровень автономности (78%) снижает зависимость объекта от внешних сетей.
Экологическая эффективность	Снижение выбросов CO_2 на 73,9% является чрезвычайно значимым результатом для региона, ориентированного на развитие курортно-рекреационного комплекса и экологического туризма.	Основной экологический эффект достигнут за счет замещения природного газа биогазом и электроэнергией из сети – энергией от ВИЭ. Снижение выбросов CO_2 на 70% является значительным вкладом в декарбонизацию региона.
Экономическая эффективность и энергобезопасность	Расчетный срок окупаемости капитальных затрат для условий Крыма составил 5,9 лет. Экономическая привлекательность усили-	Расчетный срок окупаемости капитальных затрат составил 6.8 лет. Несмотря на высокие первоначальные инве-

	вается за счет высоких тарифов на электроэнергию и ее дефицита в пиковые периоды. Внедрение подобных систем напрямую способствует повышению энергетической безопасности полуострова, снижая зависимость от перетоков энергии и покрывая пиковые летние нагрузки за счет собственной генерации холда.	стиции, значительная экономия на энергоносителях и возможность продажи излишков электроэнергии в сеть по "зеленому" тарифу делают проект экономически привлекательным. Чувствительность анализа показала, что срок окупаемости сильно зависит от региональных тарифов на газ и электроэнергию.
--	--	--

Таблица 4. Анализ результатов ключевых показателей эффективности

Наименование показателей	Крым	Ростовская область
Существенном повышении энергоэффективности	(PES > 60%).	(PES > 55%).
Значительном снижении нагрузки на окружающую среду	(снижение выбросов CO ₂ > 70%).	(снижение выбросов CO ₂ > 70%)
Повышении надежности и автономности энергоснабжения	(уровень автономности > 80%), что критически важно для энергодефицитных регионов	(уровень автономности > 70%), что критически важно для энергодефицитных регионов
Достижении приемлемых экономических показателей	(срок окупаемости ~6 лет).	срок окупаемости 5-8 лет

Заключение

Из сравнительного анализа можно сделать вывод, что для Крыма такие системы имеют приемлемое значение, так как они позволяют диверсифицировать энергобаланс, снизить пиковые нагрузки и способствовать устойчивому развитию региона.

В Крыму тригенерация — это скорее необходимость, диктуемая высокой стоимостью и дефицитом электроэнергии, а также пиковыми летними нагрузками. Ее внедрение носит предпочтительный характер. В Ростовской области тригенерация — это в большей степени экономиче-

ская эффективность и надежность энергоснабжения для промышленности и АПК в условиях благоприятной инфраструктуры.

Внедрение гибридных энергокомплексов способно решить целый комплекс проблем регионов, особенно в регионах с высокой инсоляцией: повысить энергоэффективность и надежность снабжения, диверсифицировать топливный баланс, снизить тарифную нагрузку на потребителей и улучшить экологическую обстановку [8].

Список литературы

1. Амиров Д.И., Зацаринная Ю.Н., Гаврилов С.А. Автоматическая система очистки солнечных панелей // В сборнике: Электроэнергетика глазами молодежи. Материалы XI Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. 2020. С. 161-164.
2. Al-Sulaiman, F. A., Hamdullahpur, F., & Dincer, I. (2011). Trigenation: A comprehensive review based on prime movers. International Journal of Energy Research, 35(3), 233-258.
3. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Abd Ali L.M., Krit B.L., Morozova N.V. Studies of the pv array characteristics with changing array surface irradiance // Applied Solar Energy. 2019. Т. 55. № 4. С. 223-228.
4. Гурьев В.В., Какушина Е.Г., Небесный В.В., Найдук М.Р., Асанов А.Б. Оценка потенциала развития возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 3. С. 23-29.
5. Какушина Е.Г. Нормативно-правовое регулирование отношений между государством, предприятием и энергоснабжающей организацией // Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 55-58.
6. Вологдин С.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Абдали Л. М., Какушина, Е. Г. и др. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции // Appl. Sol. Энергия. - 2019. - Т 55, № 4. - С. 229-234. EDN: ТТОУКО
7. Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Тиман Д.И., Жиганов И.Г., Гхашиим М. Оптимизации режимов распределения нагрузки в совмещённой системе с возобновляемыми источниками энергии // Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 1. С. 84-89.
8. Гурьев В.В., Кувшинов В.В., Якимович Б.А., Аль Баирмани А.Г., Какушина Е.Г. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. №

1. С. 108-117.

References

1. Amirov D.I., Zatsarinnaya Yu.N., Gavrilov S.A. Automatic solar panel cleaning system // In the collection: Electric power industry through the eyes of youth. Materials of the XI International Scientific and Technical Conference. In 2 volumes. 2020. pp. 161-164.
2. Al-Sulaiman, F. A., Hamdullahpur, F., & Dincer, I. (2011). Trigeneration: A comprehensive review based on prime movers. *International Journal of Energy Research*, 35(3), 233-258.
3. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Abd Ali L.M., Krit B.L., Morozova N.V. Studies of the pv array characteristics with changing array surface irradiance // *Applied Solar Energy*. 2019. T. 55. № 4. С. 223-228.
4. Guryev V.V., Kakushina E.G., Celestial V.V., Nayduk M.R., Asanov A.B. Assessment of the potential for the development of renewable sources of electricity in the energy system of the Republic of Crimea and Sevastopol // *Energy installations and technologies*. 2020. Vol. 6. No. 3. pp. 23-29.
5. Kakushina E.G. Regulatory and legal regulation of relations between the state, an enterprise and an energy supply organization // *Energy installations and technologies*. 2024. Vol. 10. No. 1. pp. 55-58.
6. Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L. M., Kakushina, E. G. et al. Analysis of various scenarios of energy supply in Crimea, taking into account the operating modes of a solar power plant // *Appl. Sol. Energy*. - 2019. - T 55, No. 4. - PP. 229-234. EDN: TTOYKO
7. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Timan D.I., Zhi-ganov I.G., Ghashim M. Optimization of load distribution modes in a combined system with renewable energy sources // *Energy installations and technologies*. 2022. Vol. 8. No. 1. pp. 84-89.
8. Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Al Bairmani A.G., Kakushina E.G. Investigation of steady-state modes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system // *Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov*. 2022. Vol. 25. No. 1. pp. 108-117.

УДК 620.92

Комплексный подход к снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях Крымской энергосистемы

В.В. Смирнов¹, А.Д. Какушин²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹vvsmirnov@sevsu.ru, ²arta25ty@mail.ru

Статья поступила 06.10.2025 г.; после доработки 08.10.2025 г.

Аннотация

В данной статье проведен анализ проблематики высоких потерь электроэнергии в распределительных сетях энергосистемы Республики Крым. Рассмотрены ключевые факторы, обуславливающие повышенный уровень потерь, в том числе: износ основного оборудования, рост пиковых нагрузок после интеграции с ЕЭС России, климатические особенности и коммерческие потери. На основе анализа предложен комплекс технических и организационных мероприятий, направленных на снижение потерь. В технический блок входят: модернизация сетей с применением самонесущего изолированного провода (СИП), внедрение устройств компенсации реактивной мощности, использование регулируемых трансформаторов и внедрение систем интеллектуального учета (АИИС КУЭ). Организационные мероприятия включают совершенствование методов нормирования и анализа потерь, а также усиление контроля за энергопотреблением. Проведена оценка ожидаемого экономического эффекта от реализации предложенных мер, свидетельствующая о их высокой актуальности и эффективности для стабилизации и развития энергосистемы Крыма.

Ключевые слова: потери электроэнергии, энергосистема Крыма, СИП, компенсация реактивной мощности, интеллектуальный учет, норматив потерь, модернизация сетей

An integrated approach to reducing electricity losses in the distribution networks of the Crimean energy system

V.V. Smirnov¹, A.D. Kakushin²

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹vvsmirnov@sevsu.ru, ²arta25ty@mail.ru

Received 06.10.2025 y.; received in final form 08.10.2025 y.

Abstract

The article analyzes the problems of high electricity losses in the distribution networks of the energy system of the Republic of Crimea. The key factors contributing to the increased level of losses are considered, including: wear of the main equipment, increased peak loads after integration with the UES of Russia, climatic features and commercial losses. Based on the analysis, a set of technical and organizational measures aimed at reducing losses is proposed. The technical block includes: modernization of networks using self-supporting insulated wire (SIP), the introduction of reactive power compensation devices, the use of regulated transformers and the introduction of intelligent metering systems (AIIS KUE). Organizational measures include improving methods of rationing and loss analysis, as well as strengthening control over energy consumption. An assessment of the expected economic effect of the implementation of the proposed measures has been carried out, indicating their high relevance and effectiveness for the stabilization and development of the Crimean energy system.

For citation: electricity losses, Crimean energy system, M&A, reactive power compensation, intelligent accounting, loss rate, modernization of networks.

Введение

Энергетическая безопасность и эффективность функционирования электроэнергетического комплекса Республики Крым являются одними из ключевых факторов его социально-экономического развития [1].

После интеграции полуострова в единую энергосистему России и ввода в эксплуатацию энергомагистралей были решены задачи базового энергоснабжения. Однако сохраняется острая проблема высоких технических и коммерческих потерь электроэнергии в распределительных сетях 0,4-10 кВ.

Уровень потерь в сетях крымских сетевых компаний стабильно превышает среднероссийские показатели, что приводит к значительным финансовым издержкам, перегрузу сетевого оборудования и снижению качества электроэнергии.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью разработки научно обоснованного комплекса мер для снижения потерь, адаптированного к специфическим условиям Крыма [1].

Постановка задачи

Цель – анализ структуры и причин потерь электроэнергии в распределительных сетях Крыма и разработка на этой основе комплексной программы по их снижению.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- Провести анализ текущего состояния распределительного электросетевого комплекса Республики Крым с идентификацией ключевых проблемных зон, обуславливающих высокий уровень потерь электроэнергии.
- Разработать комплекс технических мероприятий по снижению технических потерь, включающий:
 - а) оценку эффективности применения самонесущего изолированного провода (СИП);
 - б) анализ потенциала внедрения устройств компенсации реактивной мощности;
 - в) обоснование замены неэкономичного трансформаторного оборудования.
- Разработать комплекс организационно-технологических мероприятий по снижению коммерческих и условно-постоянных потерь, в том числе [2]:
 - а) оценку эффективности внедрения АИИС

КУЭ;

б) предложения по совершенствованию методик нормирования и анализа потерь.

- Оценить ожидаемую экономическую эффективность и сроки окупаемости предложенного комплекса мероприятий для обоснования целесообразности его практической реализации.

Анализ текущей ситуации и структура потерь в сетях Крыма

Потери электроэнергии в электрических сетях условно делятся на технические и коммерческие.

Технические потери обусловлены физическими процессами в оборудовании и зависят от его состояния, режимов работы и нагрузок. Для Крыма характерны следующие причины высоких технических потерь [2]:

- Физический и моральный износ оборудования: Значительная часть воздушных линий (ВЛ) 0,4-10 кВ выполнена неизолированным проводом, имеет большую протяженность и ветхие опоры. Трансформаторы на подстанциях имеют низкий КПД и высокие потери холостого хода.
- Рост нагрузок и неоптимальные режимы работы: Присоединение к ЕЭС России и развитие туристической инфраструктуры привели к росту пиковых нагрузок, на которые сети не были рассчитаны. Это вызывает перегрузку линий и трансформаторов, что ведет к увеличению потерь на нагрев.
- Низкий коэффициент мощности: Наличие большого количества индуктивных нагрузок (электродвигатели, бытовая техника) приводит к повышенному потреблению реактивной мощности, что увеличивает нагрузку на сети и потери в них.
- Климатические особенности: Высокие температуры летом приводят к увеличению сопротивления проводов, а сильные ветра вызывают короткие замыкания из-за свисания неизолированных проводов [2].

Коммерческие потери связаны с недоучетом электроэнергии, хищениями и погрешностями приборов учета. В Крыму их уровень остается значительным из-за:

1. Большого парка устаревших индукционных счетчиков с низким классом точности.
2. Недостаточного охвата современными системами автоматизированного учета.
3. Прямых несанкционированных подключений к сетям [3].

Комплекс мероприятий по снижению потерь

Технические мероприятия

1. Реконструкция воздушных линий электропередачи с применением СИП.

- Замена неизолированных проводов на самонесущий изолированный провод (СИП) позволяет резко снизить технические потери. СИП имеет меньшее индуктивное сопротивление и практически исключает потери на корону и несанкционированные подключения. По данным применения СИП позволяет снизить технические потери на 30-40% по сравнению с традиционными ВЛ [4].

2. Компенсация реактивной мощности.

- Установка конденсаторных установок (КУ) на шинах 0,4 кВ трансформаторных подстанций и у потребителей позволяет снизить нагрузку на сети и потери в них. Для регулируемых нагрузок целесообразно применение автоматических конденсаторных установок (АКУ), поддерживающих заданный коэффициент мощности.

3. Замена неэкономичных трансформаторов.

- Поэтапная замена трансформаторов ТМ на современные модели серии ТМГ, ТСЗ или аналоги с пониженными потерями холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) [5]. Это особенно актуально для трансформаторов, работающих с недогрузкой.

4. Внедрение регулируемых трансформаторных подстанций.

- Оснащение подстанций трансформаторами с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) позволяет поддерживать оптимальный уровень напряжения в сети, избегая его завышения, что также снижает потери.

Организационно-технологические мероприятия

1. Внедрение Автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ): развертывание системы «умного» учета позволяет в режиме реального времени контролировать потоки мощности, оперативно выявлять очаги максимальных потерь и факты хищения энергии [6]. Это основа для разделения коммерческих и технических потерь.

2. Совершенствование методов нормирования и анализа потерь: необходимо внедрение математических моделей для расчета нормативов потерь с учетом реальных параметров сетей, графиков нагрузки и климатических

условий Крыма. Это позволит более точно оценивать эффективность проводимых мероприятий.

3. Балансировка фаз в сетях 0,4 кВ: регулярное проведение замеров и работ по выравниванию нагрузок по фазам позволяет снизить потери в низковольтных сетях до 15-20% [7].

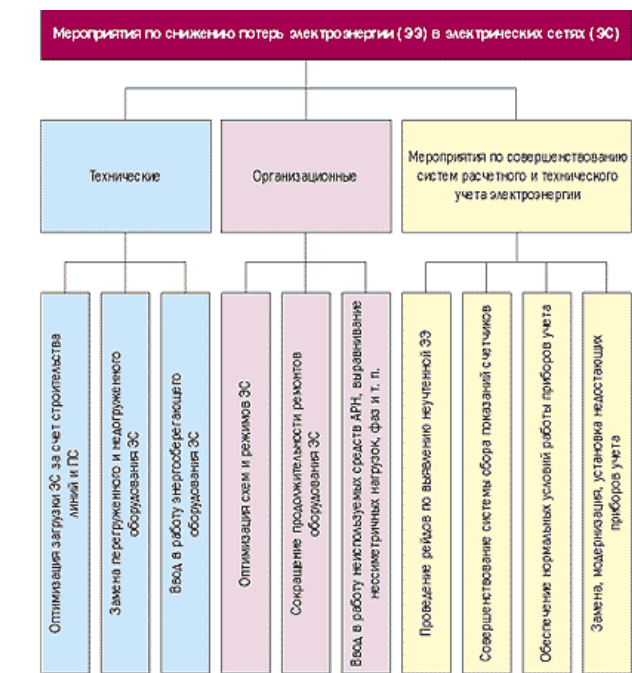


Рис.1. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии (ЭЭ) в электрических сетях (ЭС) [8].

Заключение

Проблема высоких потерь электроэнергии в сетях Крыма носит системный характер и требует комплексного подхода [9]. Предложенная программа, сочетающая техническую модернизацию (СИП, компенсация реактивной мощности, замена трансформаторов) и организационные улучшения (АИИС КУЭ, совершенствование нормирования), является научно обоснованным путем решения данной проблемы.

Реализация этих мероприятий позволит:

- Снизить совокупный уровень потерь на 25-35%.
- Повысить надежность и качество электроснабжения потребителей.
- Снизить финансовую нагрузку на сетевые компании и конечных потребителей.
- Создать технологический задел для дальнейшего развития энергосистемы Крыма.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку детальной цифровой

модели распределительных сетей Крыма для более точного прогнозирования эффекта и оптимизации капиталовложений.

Список литературы

1. Анализ эксплуатационных показателей деятельности сетевых организаций на территории Республики Крым за 2022-2023 гг. // Официальный сайт Госкомцен Республики Крым.
2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии: реактивная мощность, качество электроэнергии, их нормирование и снижение. – М.: НЦ ЭНАС, 2019. – 456 с.
3. Будзко И.А., Левин М.С. Электроснабжение сельского хозяйства. – М.: КолосС, 2018. – 552 с.
4. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение и энергооборудование предприятий и установок. – М.: Академия, 2020. – 400 с.
5. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Abd Ali L.M., Krit B.L., Morozova N.V. Studies of the pv array characteristics with changing array surface irradiance // Applied Solar Energy. 2019. Т. 55. № 4. С. 223-228.
6. Вологдин С.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и др. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции // Appl. Sol. Энергия. - 2019. - Т 55, № 4. - С. 229-234. EDN: TTOYKO
7. Якимович Б.А., Малюк Е.Г., Какушина Е.Г. Перспективы развития распределенной энергетики в условиях полуострова Крым // Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 1. С. 91-98.
8. В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, В.Н. Апрыткин, Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энерго-снабжающих организаций // https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=206
9. Guryev V.V., Kakushina E.G., Yakimovich B.Ya. Frequency control in the power system using solar power plants // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. 2025. № 3 (114). С. 8-16.
- power equipment of enterprises and installations. Moscow: Akademiya, 2020, 400 p.
5. Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Abd Ali L.M., Krit B.L., Morozova N.V. Studies of the pv array characteristics with changing array surface irradiance // Applied Solar Energy. 2019. Т. 55. № 4. С. 223-228.
6. Vologdin S.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L. M., Kakushina, E. G. et al. Analysis of various scenarios of energy supply in Crimea, taking into account the operating modes of a solar power plant // Appl. Sol. Energy. - 2019. - Т 55, No. 4. - PP. 229-234. EDN: TTOYKO
7. Yakimovich B.A., Malyuk E.G., Kakushina E.G. Prospects for the development of distributed energy in the conditions of the Crimean Peninsula // Energy installations and technologies. 2023. Vol. 9. No. 1. pp. 91-98.
8. V. E. Vorotnitsky, M. A. Kalinkina, V.N. Apryatkin, Measures to reduce electricity losses in electric networks of energy-supplying organizations // https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=206
9. Guryev V.V., Kakushina E.G., Yakimovich B.Ya. Frequency control in the power system using solar power plants // Operational management in the electric power industry: personnel training and maintaining their qualifications. 2025. No. 3 (114). pp. 8-16.

References

1. Analysis of operational performance indicators of network organizations in the territory of the Republic of Crimea for 2022-2023 // Official website of the State Committee of the Republic of Crimea.
2. Zhelezko Yu.S. Electricity losses: reactive power, electricity quality, their rationing and reduction. Moscow: NC ENAS, 2019. 456 p
3. Budzko I.A., Levin M.S. Electricity supply to agriculture. Moscow: KolosS, 2018. 552 p.
4. Knyazevsky B.A., Lipkin B.Yu. Power supply and

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (В ЭНЕРГЕТИКЕ)

УДК 502/504(063)

**Актуальные проблемы экологии и природопользования:
хроника конференции**Д.М. СЫТНИКОВ¹¹Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, 299015, Россия, sytnikov@list.ru

Статья поступила 15.09.2025; после доработки 17.09.2025 г.

Аннотация

Подан обзор материалов, представленных на III Студенческой научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования», которая состоялась в Институте ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета 25 апреля 2025 г. Участниками мероприятия представлены пленарные и секционные доклады, рассмотрены вопросы экологического мониторинга, рационального использования природных ресурсов, природообустройства, экологической химии, а также обеспечения экологической безопасности.

Ключевые слова: экологические проблемы, природопользование, природообустройство, водопользование, экологическая химия.

**Current issues of ecology and nature management:
conference chronicle**D.M. Sytnikov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, 299015, Russia, sytnikov@list.ru

Received 15.09.2025 y.; received in final form 17.09.2025 y.

Abstract

An overview of the materials presented at the III Student Scientific and Practical Conference «Current Problems of Ecology and Nature Management», which was held at the Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University on April 25, 2025, is provided. The participants of the event presented plenary and sectional reports, considered issues of environmental monitoring, rational use and management of natural resources, environmental chemistry, as well as ensuring environmental safety.

Keywords: environmental issues, nature management, nature conservation, water management, environmental chemistry.

Введение

В соответствии с планом научных мероприятий ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (приказ № 497-п от 12.03.2025 г.) 25 апреля 2025 года на базе Института ядерной энергии и промышленности состоялась III Студенческая научно-практическая

конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования».

Конференция была организована и проведена одноимённой Секцией студенческого научного общества Института ядерной энергии и промышленности «Актуальные проблемы экологии и природопользования». Староста студенческого объединения – студент третьего курса

(направление подготовки «Экология и природопользование») Васина В.С.

В подготовке мероприятия приняли участие сотрудники кафедры «Радиоэкология и экологическая безопасность», а также «Химия и химические технологии». Ответственный секретарь конференции – старший преподаватель Косовская М.А.

Целью научного мероприятия стало создание площадки для студентов и молодых учёных, позволяющей представить результаты их собственных исследований. Значимой задачей при этом стал обмен опытом и получение обратной связи от научных руководителей.

Важно отметить роль мероприятия в формировании условий для выявления и развития интеллектуальных, познавательных и творческих способностей, содействии обучающимся в подготовке их творческих и выпускных квалификационных работ.

По итогам работы конференции подготовлен сборник материалов [1], который был рекомендован организационным комитетом к изданию и передан для размещения в репозитории Севастопольского государственного университета, а также в российской библиографической базе данных научного цитирования (РИНЦ). Сборник включает научные доклады по результатам работы участников конференции и содержит материалы, которые могут быть рекомендованы к использованию в учебном процессе. Рецензентом сборника выступил профессор кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников», д-р техн. наук, доцент Губарев Ф.А.

Необходимо отметить, что конференция объединила студентов различных направлений подготовки. Это «Экология и природопользование», «Природообустройство и водопользование», «Химическая технология», и «Лечебное дело». В работе мероприятия также приняли участие аспиранты и соискатели, в частности, лаборатории «Радиоэкология и морская радиохимия», представители профессорско-преподавательского состава. В общей сложности были зарегистрированы и приняли участие в работе конференции 126 человек.

Основная часть

Тематика представленных докладов была достаточно разнообразной. Программа мероприятия включила заявленные материалы в логической последовательности и с учётом развития от-

дельных научных проблем. Таким образом выступления участников были заслушаны в рамках пленума молодых учёных и трёх научных секций: «Экология и природопользование», «Вопросы природообустройства и водопользования», «Экологическая химия». Отдельно состоялся круглый стол членов оргкомитета.

Пленарное заседание прошло под руководством канд. хим. наук, доцента Лукиной Л.И. и канд. хим. наук Ткаченко Э.В. Наиболее оживлённая дискуссия развернулась вокруг вопросов, связанных с получением и применением сорбентов. Сотрудниками научно-исследовательской лаборатории «Радиоэкология и морская радиохимия» (руководитель – д-р хим. наук, доцент Бежин Н.А.) получены сорбенты на основе полиакрилонитрильного волокна, содержащие в своей структуре ферроцианиды переходных металлов и оксиды марганца (CoMn-PAN, FeMn-PAN) или гидроксид железа (III) (CoFe-PAN). Изучена селективность полученных сорбентов, а также извлечение ими цезия, бария (как аналога радия), фосфора и бериллия из различных природных сред (речной воды, морской воды различной солёности 18,2 и 33,8 ‰). Установленные данные показали, что полученные сорбенты являются универсальными для извлечения техногенного ^{137}Cs и естественных радионуклидов из природных сред, в том числе сложносолевого состава – морской воды (докладчик Шибецкая Н.А.).

Получен ряд сорбентов на основе ди-трет-бутилдициклогексил-18-краун-6 и новых фторированных разбавителей. Определены оптимальные компоненты и условия их синтеза. Полученные после исследования сорбции данные позволили сделать вывод о том, что изученные сорбенты можно использовать для извлечения ^{210}Pb и ^{210}Po из природных вод (докладчик Разина В.А.).

Кроме того, было рассмотрено применение связующих веществ при получении сорбентов для очистки природных и сточных вод. Представлен анализ влияния различных связующих компонентов на сорбционные, механические и эксплуатационные характеристики материалов.

Определены наиболее эффективные связующие материалы с учётом химической и термической устойчивости, возможности регенерации и экологичности. В частности, показана перспективность использования поливинилового спирта и карбоксиметилцеллюлозы для разработки высокоэффективных сорбционных материалов (докладчик Турянский В.А.).

В одном из пленарных докладов обсуждалось влияние наночастиц металлов и их оксидов на всхожесть семян, физиолого-биохимические особенности роста и развития культурных растений, а также их продуктивность. Показано, что реакция растений на присутствие наночастиц может быть разнонаправленной и зависит от их физико-химических свойств, концентрации и способа введения. В частности было установлено, что содержание в субстрате выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) наночастиц алюминия в концентрации 1000 мг/кг оказывает отрицательное воздействие на продукционный процесс (докладчик – аспирант Томского политехнического университета Мусса А.).

Отдельное внимание участников секции «Экология и природопользование» было уделено вопросам необходимости йодной профилактики после радиационной аварии и ведения животноводства на радиационно-загрязнённой территории, современным методам обращения с радиоактивными отходами и разработке рекомендаций по модернизации систем обращения с РАО для исследовательски реакторов, совершенствованию технологии утилизации отходов недропользования, направлениям эффективного обращения с твёрдыми коммунальными отходами, разработке рекомендаций по использованию отходов винодельческой промышленности, а также вопросам биоиндикации и биотестирования городской среды. Вопросы природообустройства и водопользования обсуждались в рамках одноимённой секции, которая значилась под № 2. Здесь были рассмотрены особенности и преимущества гидрохимических и биологических методов в оценке состояния морской среды и малых рек ГФЗ Севастополя, применение геоинформационных систем для визуализации и анализа данных экологического мониторинга.

В рамках секции обсуждались также принципы работы фотокаталитической очистки воды, ключевые типы фотокатализаторов, их преимущества и недостатки, методы биологической очистки с использованием микроорганизмов, а также эффективность сорбентов на основе кобальта винограда для очистки сточных вод.

Работа секции «Экологическая химия» была сосредоточена на вопросах селективного каталитического восстановления для снижения выбросов промышленных предприятий, изучения каталитических свойств компонентов отходов недропользования, использования глюконовокислого натрия в качестве хелатирующего агента при доочистке сточных вод на этапе физико-химической очистки, принципах дополнительной

очистки сточных вод с помощью адсорбентов на основе хитозана.

Обсуждались также результаты исследования степени влияния различных концентраций нанопорошка оксида вольфрама (VI) на ударную прочность керамических изделий на основе каолиновой глины и результаты улучшения термостойкости, механических свойств цементных композитов посредством добавления наночастиц карбида вольфрама (WC).

Были представлены преимущества биоразлагаемых композитных материалов на основе крахмала и целлюлозы. Не осталось без внимания и решение проблемы утилизации разлитого мазута после крушения танкеров в 2024 г. в Керченском проливе. Представлен альтернативный способ сбора разлитого мазута и технологический процесс его переработки в качестве сырья для получения асфальтного покрытия (докладчик Чусов Т.Д.).

Заключение

Таким образом, участниками мероприятия были представлены доклады, в которых рассматривались вопросы экологического мониторинга, рационального использования природных ресурсов, природообустройства, экологической химии, а также решения экологических проблем и обеспечения экологической безопасности.

На закрытии конференции были подведены итоги состоявшегося пленума и трёх научных секций, объявлены результаты студенческого конкурса «Лучший научный доклад» и благодарности наиболее активным членам Секции студенческого научного общества «Актуальные проблемы экологии и природопользования».

Дипломом первой степени был награждён студент четвёртого курса (направление подготовки «Экология и природопользование») Семёнов В.В. за работу «Геоинформационное моделирование в оценке экологического состояния морских акваторий» (научный руководитель – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. Сытников Д.М.).

Подробная информация о состоявшемся мероприятии и фотоотчёт конференции были размещены на сайте Севастопольского государственного университета, а также в социальных сетях Института ядерной энергии и промышленности.

Список литературы

1. Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник материалов III Студенческой научно-практической конференции, 25 апреля

2025 года / Севастопольский государственный университет; отв. ред. Д.М. Сытников. – Севастополь: СевГУ, 2025. – 145 с.

References

1. *Aktual'nyye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya* [Current problems of ecology and nature management]: collection of materials from the III Student scientific and practical conference, April 25, 2025. Edited by D.M. Sytnikov, Sevastopol, SevSU Publ., 2025, 145 p.

УДК 620.179

Определению оптимального времени экспозиции при проведении радиометрического исследования дефектов стального кольцевого сварного трубопровода

О.В. Ворник¹, Е.А. Магдыч², С.А. Котельникова³, Н.А. Романова⁴¹⁻³ Севастопольский государственный университет, ovvornik@mail.sevsu.ru, eamacduch@mail.sevsu.ru, sakotelnikova@mail.sevsu.ru⁴ АЭС «Руппур», nr2014@yandex.ru

Статья поступила 17.10.2025 г.; после доработки 20.10.2025 г.

Аннотация

Исследование посвящено определению оптимального времени экспозиции при проведении радиационного неразрушающего контроля сварного кольцевого соединения. Радиационный неразрушающий контроль является основным видом контроля сварных соединений на объектах атомной энергетики и позволяет значительно снизить процент отбраковки готовых изделий за счет раннего определения дефектов, что на стадии строительства является определяющим фактором позволяющим сократить как время сооружения объекта, так и его итоговую стоимость.

В рамках исследования проведена серия опытов по определению оптимального времени экспозиции при РК сварного соединения кольцевого трубопровода диаметром 1020 мм с толщиной стенки 10, 20, 30 мм. Результаты эксперимента могут быть использованы при проведении РК сварных соединений в подобных условиях.

Ключевые слова: дефект, неразрушающий контроль, сварное соединение, радиографическая пленка, время экспозиции, оптическая плотность, радиационный контроль.

Determination of the optimal exposure time for radiometric examination of defects in a steel ring-welded pipeline

O.V. Vornik¹, E.A. Magdych², S.A. Kotelnikova³, N.A. Romanova⁴¹⁻³ Sevastopol State University, ovvornik@mail.sevsu.ru, eamacduch@mail.sevsu.ru, sakotelnikova@mail.sevsu.ru⁴ RUPPUR NPP, nr2014@yandex.ru

Received 17.10.2025 y.; received in final form 20.10.2025 y.

Abstract

The study is devoted to determining the optimal exposure time for radiological non-destructive testing of welded ring joints. Radiological non-destructive testing is the main type of testing for welded joints at nuclear power plants, and it significantly reduces the rejection rate of finished products by early detection of defects, which is crucial during the construction phase to reduce both the construction time and the final cost of the facility.

As part of the study, a series of experiments was conducted to determine the optimal exposure time for the RK of a welded joint of a circular pipeline with a diameter of 1020 mm and a wall thickness of 10, 20, and 30 mm. The results of the experiment can be used in the RK of welded joints under similar conditions.

Keywords: defect, non-destructive testing, weldment, radiographic film, exposure time, optical density, radiological testing.

Введение

Трубопроводы первичного контура атомной

электростанции играют ключевую роль в обеспечении безопасной и надежной работы реакторной

установки. Они предназначены для транспортировки теплоносителя, который отводит тепло от активной зоны ядерного реактора и передает его парогенераторам.

Основной особенностью трубопроводов первичного контура является их эксплуатация в условиях высокого давления, повышенной температуры и радиационного излучения. Сварные соединения трубопроводов, как наиболее уязвимые элементы, подвержены развитию дефектов вследствие механических, термических и радиационных нагрузок, а также старения материалов в процессе длительной эксплуатации.

Сварные швы обеспечивают герметичность и прочность конструкции трубопроводной системы. Нарушение целостности сварных соединений может привести к разгерметизации системы первичного контура, что представляет угрозу для безопасной эксплуатации АЭС. Поэтому именно сварные соединения трубопроводов первичного контура являются приоритетным объектом для систематического неразрушающего контроля.

При строительстве трубопроводов необходимо производить сварку большого количества кольцевых сварных соединений, качество которых оценивается путем проведения визуального и измерительного контроля (ВИК), радиационного контроля (РНК) и ультразвукового контроля (УЗК) в объеме 100% [1], причем УЗК, как правило, проводится двумя методами: эхо-импульсным или эхо-зеркальным в зависимости от типа разделки кромок, а также дифракционно-временным методом (ДВМ) [1].

Для оценки качества сварных соединений МГ сегодня, как правило, используются инженерные критерии [2]. Для применения инженерных критериев оценки качества необходимо прогнозировать размеры дефектов, а также знать величину ошибки данного прогноза. Если не удастся точно прогнозировать размеры дефекта, то необходимо производить отбраковку соединения из соображений безопасности. При отсутствии информации о типе дефекта в прочностные расчеты закладывается самый опасный случай – трещина, выходящая на поверхность, растущая в неблагоприятном направлении для нагрузки сварного шва [3].

Отсутствие информации о типе дефекта и неточная оценка его размеров при неразрушающем контроле (НК) приводит к применению жестких норм, следовательно, к увеличению перебраковки, что в итоге приводит к сильному уменьшению темпа строительства, связанного с частыми

ремонтами. Поэтому необходима методика, позволяющая максимально достоверно и точно прогнозировать типы и параметры дефектов сварных швов, опираясь на данные НК.

Целью настоящего исследования является рассмотрение применимости методов неразрушающего контроля применительно объектам атомной энергетики в соответствии с основными отраслевыми руководящими документами.

Классификация методов неразрушающего контроля производственных объектов

2.1. Типы дефектов объектов технического контроля

Техническая диагностика с использованием методов неразрушающего контроля в настоящее время является одним из способов снизить риск возникновения нештатных ситуаций при работе оборудования производственных объектов.

Согласно действующей документации, регламентирующей проведение КН сварных соединений трубопроводов, все сварные соединения подвергаются ВИК, РНК и УЗК в объеме 100%, с целью отбраковки заведомо некачественных деталей.

В нормативно-технической документации под термином «дефект» подразумевается:

- в соответствии с ГОСТ 15467–79 «каждое отдельное несоответствие продукции требованиям» [4];
- в соответствии с ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.4.2) «каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией» [5];
- в соответствии с ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.4.3) «повреждение (degraded state) – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния» [5];
- согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2011 (п. 3.6.3) «дефект – это невыполнение требования, связанного с предполагаемым или установленным использованием» [6].

Любое повреждение или дефект в стыковом соединении может быть причиной полного или частичного отказа оборудования и как следствие ведет к возникновению нештатных ситуаций, сопровождающихся ресурсными и экономическими потерями.

Под несоответствием (nonconformity) [7] понимают невыполнение требования (requirement),

т. е. документально изложенного критерия, который должен быть выполнен, если требуется соответствие документу, и по которому не разрешены отклонения.

Различие между понятиями «дефект» и «несоответствие» является важным, так как имеет подтекст юридического характера, особенно связанный с вопросами ответственности за качество продукции. Следовательно, термин «дефект» следует использовать чрезвычайно осторожно.

Использование, предполагаемое потребителем, может зависеть от характера информации, такой как инструкции по использованию и техническому обслуживанию, предоставляемые поставщиком.

Но при классификации дефектов и описании отказов оборудования, обычно, четкого соответствия терминологии всех действующих ГОСТов не наблюдается. При описании брака оборудования чаще всего дефекты распределяются на две категории, такие как допустимые и недопустимые дефекты в соответствии с нормативно-технической документацией.

В зависимости от происхождения дефекты могут быть производственно-технологические, их возникновение продиктовано нарушением норм технологических режимов при производстве оборудования и материалов, а также эксплуатационными, возникающими в результате не правильной эксплуатации, а также вследствие вторичных пагубных процессов в результате использования оборудования (коррозия, усталость металла и т.п.).

Дефекты могут быть явными и скрытыми, исправимыми и неисправимыми, критическими, значительными и малозначительными.

Явные дефекты как правило определяются сразу по средством визуального контроля, все остальные виды дефектов, обнаружение которых неподвластно человеческому взгляду могут быть обнаружены с использованием методов неразрушающего контроля.

Все выявленные в результате контроля дефекты по степени влияния на рабочие характеристики деталей и оборудования могут быть малозначительными, значительными и критическими. В процессе отнесения дефекта к той или иной категории учитывается месторасположение, размер, характер возникновения последнего, а также параметры работы дефектной детали.

Придерживаясь подобной классификации,

под термином критический дефект нужно подразумевать такое нарушение целостности механизма или детали, при наличии которого использование дефектного оборудования по прямому назначению невозможно. Соответственно, значимый дефект – это дефект, который вследствие его наличия может оказать значимое влияние на процесс эксплуатации оборудования, а незначимый дефект – это дефект, наличие которого в целом на технологический процесс влияние не оказывает [8].

В зависимости от объекта вся совокупность объектов и систем может быть разбита на группы, для которых характерны однотипные дефекты, рис. 1.

На рис. 2 приведены основные типы дефектов характерных для силовых металлоконструкций.

Для различных аппаратов и сосудов основными типами дефектов является негерметичность оборудования вследствие различных причин и уменьшение проходного диаметра как следствие отложений на стенках труб.

Для механизмов и различного машинного оборудования существенными являются эксплуатационные дефекты вследствие износа.

Для автоматики и средств управления, а также различного кабельного оборудования основные типы дефектов связаны с потерей электрического контакта, пробоем изоляции и уменьшением сопротивления.

Строительные сооружения характеризуются наличием трещин, нарушением армирования и т.п. дефектами.

Для объектов с радиоактивными веществами под дефектом подразумевается состояние объекта активность которого превышает установленные нормы.

ВИК обычно проводится квалифицированным дефектоскопистом. Однако долгая и утомительная работа часто приводит к тому, что в связи с усталостью дефектоскописта достоверность контроля ухудшается. В связи с этим сегодня все чаще появляются системы, реализующие автоматизированный ВИК. Для автоматизации ВИК используются телевизионные камеры и лазерные триангуляционные датчики. При телевизионном контроле сварной шов снимают одна или несколько камер как правило с осветительным устройством. Цифровые изображения формируются на устройстве захвата кадров и передаются на персональный компьютер.



Рис. 1. Совокупность систем по группам дефектов

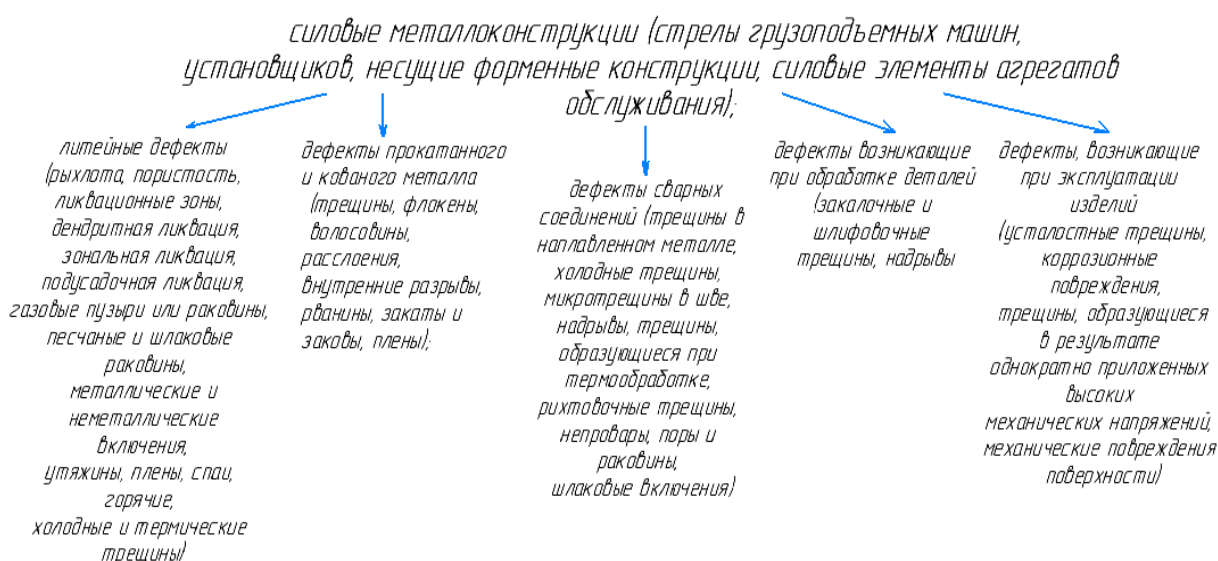


Рис. 2. Основные типы дефектов характерных для силовых металлоконструкций

ВИК позволяет обнаруживать поверхностные дефекты сварного соединения, а также оценивать отклонения его геометрических параметров профиля сварного соединения. Однако данный метод, не позволяющий выявлять плоскостные дефекты с очень маленьким раскрытием, также он не позволяет выявлять внутренние дефекты.

2.2.2. Радиационный метод НК. Радиографический контроль (РК) — это один из ведущих методов неразрушающего контроля, применяемый для дефектоскопии.

Метод радиографического контроля основан на зависимости интенсивности рентгеновского (гамма) излучения, прошедшего через изделие, от материала поглотителя и его толщины.

Радиографический контроль работает следующим образом: если объект неразрушающего контроля имеет дефекты, то излучение поглощается неравномерно и, регистрируя его распределение на выходе, позволяет судить о внутренней структуре объекта контроля.

Радиографический контроль используется для выявления недоступных для внешнего осмотра объектов, а также для выявления в сварных соединениях пор, непроваров, шлаковых включений, превышений проплава.

Дефекты, которые выявляет радиографический контроль

Радиографический метод позволяет выявлять отклонения сварных швов и стыков труб, находящихся на поверхности, а также дефекты, возникающие внутри объекта.

Среди них могут быть:

- посторонние включения (вольфрамовые, окисные, шлаковые);
- трещины, поры, непровары;
- подрезы;
- вогнутые и выпуклые корневые деформации шва в труднодоступных местах;
- излишки наплавленного металла;
- коррозионные изъяны с геометрическими нарушениями (язвы, питтинги);

Недостатки радиографического неразрушающего контроля

Радиографический контроль не может обнаружить следующие типы дефектов:

- изъяны, размер которых меньше стандартных значений (например, трещины с открытием менее 0,1 мм при толщине проникаемого материала до 40 мм);
- трещины и непровары, чья плоскость открытия не совпадает с направлением проникновения рентгеновских лучей;
- если изображение дефектов и включений на

снимке совпадает с изображением посторонних элементов, острых углов или резких перепадов толщин свариваемых деталей.

Кроме того, радиографический метод достаточно сложен в применении и для обследования требует непосредственного доступа к самому объекту неразрушающего контроля. Любые ошибки, связанные с выбором мощности просвечивания и времени экспозиции могут испортить результат радиографического контроля сварных соединений, поэтому к проведению радиографической дефектоскопии требуется отнестись с особой тщательностью.

Постановка исследования

Цель настоящего исследования заключается в выборе оптимальных режимов радиографического контроля трубопроводов диаметром 1020 мм с толщиной стенки 10, 20, 30 мм.

Объектом контроля является кольцевое сварное соединение труб следующих типоразмеров:

- диаметр 1020 мм, толщина стенки 10 мм;
- диаметр 1020 мм, толщина стенки 20 мм;
- диаметр 1020 мм, толщина стенки 30 мм.

Требования к контролю качества сварных соединений, следующие:

- категория сварного соединения по ПНАЭ Г-010-89 III категория;
- абсолютная чувствительность по ПНАЭ Г-010-89 $K=0,3$ мм;
- оптическая плотность почернения снимка по ГОСТ-7512-82 не менее 1,5 е.о.п.;

Для проведения эксперимента схема просвечивания выбрана по ГОСТ 7512-82 [9], черт. 5г — фронтальное просвечивание через две стенки, так как предполагается, что дальнейший контроль будет производиться на эксплуатируемых трубопроводах.

Выбор энергии и источника излучения

В ГОСТ 20426-82 предусмотрены источники излучения для проведения радиографического контроля. При проведении контроля по выбранной схеме просвечиваемые толщины будут равняться (двойной номинальной толщине околошовной зоны) 20, 40, 60 мм.

Для этого требуется аппарат, у которого напряжение на рентгеновской трубке не более 250 кВ. Учитывая, что контроль трубопроводов производится в полевых условиях, стоит обра-

тить внимание на следующие факторы как габариты, вес, а также цену аппарата. В связи с этим выбрали гамма дефектоскоп Delta880.

Определение фокусного расстояния

Выбор фокусного расстояния при просвечивании диктуется следующими соображениями:

- «с уменьшением фокусного расстояния возрастает геометрическая нерезкость, ухудшающая выявляемость дефектов и качество снимка.
- с другой стороны, чрезмерное увеличение фокусного расстояния неоправданно увеличивает экспозицию и ухудшает производительность контроля» [10].

Поэтому ясно, что существует оптимальная область фокусных расстояний, в которой чувствительность контроля уже не зависит от фокусного расстояния (определяется другими факторами - пленкой), а экспозиция не выходит за пределы разумного. Исходя из условий ограничения геометрической нерезкости и геометрического увеличения размеров дефектов, можно указать нижний предел фокусных расстояний:

$$F_n = 5d, \text{ при } K \geq \Phi/2 \quad (1)$$

или

$$F_n = d(1 + 2\Phi/K), \text{ при } K \leq \Phi/2, \quad (2)$$

где: K - требуемая абсолютная чувствительность контроля 0,3 мм; Φ - диаметр фокусного пятна трубки 2,5 мм; d - толщина контролируемого материала 10, 20, 30 мм.

$$F_n = 30(1 + 2 \cdot 2,5/0,3) = 530 \text{ мм}$$

Нижний предел фокусного расстояния $F_n = 530$ мм, а схема просвечивания через две стенки, следовательно, фокусное расстояние принимаем $F = 1030$ мм. Указанные критерии (1) и (2) соответствует требованиям ГОСТ 7512-82.

Выбор пленки и усиливающих экранов

Для контроля сварных соединений труб диаметром 1020×10 мм, 1020×10 мм, 1020×10 мм по III категории необходимо использовать радиографическую пленку III класса. При выборе пленок учитывались факторы: требуемая чувствительность и производительность контроля, а также плотность материала, толщина детали, универсальность, скорость проявления и соотношение цена/качество. Выбор усиливающих пленок зависит от напряжения на рентгеновской трубке.

Выбрали новую пленку «Kodak Industrex HS800 и флуорометаллический экран AGFA

Structurix RCF. Так как Kodak Industrex HS800 среднезернистая пленка использовать с ней флуорометаллический экран AGFA Structurix RCF нецелесообразно, в связи с тем, что экраны с люминофором значительно уменьшают чувствительность» [6]. Поэтому с пленкой Kodak Industrex HS800 будет использован свинцовый экран. Рекомендуемая толщина свинцового экрана 0,02-0,09 мм. С флуорометаллическим экраном AGFA Structurix RCF будем использовать пленку III класса Agfa Structurix F8.

Выбор эталона чувствительности

Выбор эталонов чувствительности зависит от значения абсолютной чувствительности. Абсолютная чувствительность $K = 0,3$ мм, поэтому из таблицы 3 ГОСТ 7512-82 выбираем канавочный эталон №1, а из таблицы 2 ГОСТ 7512-82 выбираем проволоочный эталон №2.

Процесс фотообработки

Фотообработка радиограмм включает проявление, промежуточную промывку, фиксирование, промывку и сушку. Обработка осуществлялась ручным способом в специальных рамках. Режимы фотообработки и составы проявляющих и фиксирующих растворов указаны заводом - изготовителем на каждой пачке радиографической пленки.

Необходимое условие качественной фотообработки радиограмм постоянство поддержания температур и концентрации обрабатывающих растворов, температуры сушки, обеспечение необходимой освещенности помещений с использованием красных фонарей.

Для ручного процесса фотообработки время проявления обычно 2-6 мин при температуре 16-24°C, время фиксирования равно удвоенному времени проявления при температуре 15-18°C, время промывки 20-25 мин. Время сушки составляет 20-25 мин при температуре 35°C.

Как было показано выше, в соответствии с нормативной документацией по проведению радиографического контроля сварных соединений оптическая плотность потемнения на снимках должна быть выше 1,5 единиц оптической плотности (е.о.п.), а чувствительность не ниже третьего класса.

С целью определения оптимального времени экспозиции был проведен ряд экспериментов на примере модельных образцов из стали марки 09Г2С сварных соединений частей трубопровода диаметром 1020 мм с толщиной стенки

10, 20 и 30 мм. Просвечивание производили с помощью гамма дефектоскопа Delta880 (рис. 3).



Рис. 3. Гамма дефектоскоп Delta880

Гамма дефектоскоп Delta880 - портативный, легкий и компактный промышленный гамма-дефектоскоп. Запатентованное устройство радиационной головки состоит из рабочего канала - трубки, изготовленной из карбида титана и защитного слоя из обедненного урана. Наружный корпус радиационной головки в форме цилиндра с приваренными доньшками изготовлен из нержавеющей стали 300 серии. Доньшки корпуса утоплены для обеспечения защиты заднего механизма блокировки и выходного окна на передней панели.

Горизонтально ориентированная конструкция позволяет легко управлять механизмом блокировки, носителем источника и выходным окном, упрощая соединение носителя источника и пульта дистанционного управления.

Корпус радиационной головки, содержащий биологическую защиту из обедненного урана, блокирующий механизм, выходное окно, защитные крышки и обязательную предупредительную маркировку, соответствует упаковке типа В (U) для транспортируемых радиоактивных веществ.

Ориентировочная радиационная толщина объекта контроля по стали 3-29 мм, 12-63 мм, 50-150 мм, 2-20 мм

Определение времени экспозиции

Просвечивание производили с помощью гамма дефектоскопа Delta880 меняя время экспозиции. Просвечивание производили в соответствии с ПНАЭ Г-7-017-89 через две стенки. Дозу, полученную пленками Agfa Structurix F8; Kodak Industrex HS800 замеряли дозиметром ДДГ-01Д. Оптическую плотность потемнения фотообработанных снимков, измеряли с помощью цифрового денситометра ДП 5004.

Результаты исследования

Результаты измерений представлены в таблицах 1-4.

По полученным экспериментальным данным строим графические зависимости плотности потемнения пленки, мощности дозы излучения, в зависимости от времени экспозиции. Полученные графические зависимости представлены на рис. 4-8.

Как показывают полученные результаты во всех случаях наблюдается линейная зависимость плотности потемнения пленки от времени выдержки, что доказывает тот факт, что степень потемнения радиографической пленки находится в прямом пропорциональной зависимости от экспозиционной дозы.

По полученным графическим зависимостям можно определить время экспозиции, в течение которого потемнение радиографической пленки более 1,5 единиц оптической плотности. Полученные данные сведем в табл. 4.

Таблица 1. Результаты просвечивания $F=1030$ мм, $s=20$ мм

Время экспозиции, с	Доза излучения, mrad	Оптическая плотность, е.о.п.	Чувствительность, %	
			Канавочный эталон	Проволочный эталон
Пленка Agfa Structurix F8				
60	12	0,74	1,56	1,38
90	21	1,36	0,74	0,81
120	29	2,24	0,31	0,32
150	38	2,96	0,3	0,31
Пленка Kodak Industrex HS800				
60	10	0,44	1,96	1,76
90	16	1,15	1,38	1,24
120	23	1,5	0,31	0,31
150	29	2,36	0,3	0,3

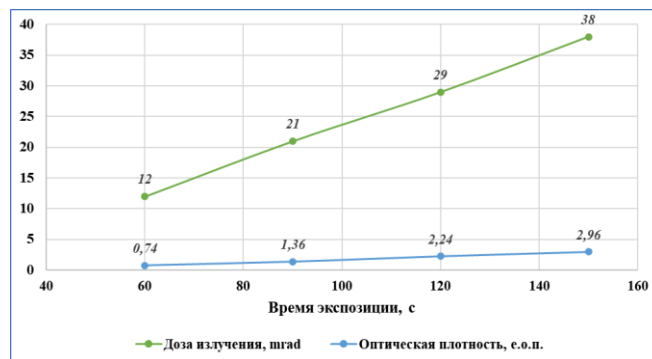


Рис. 4. Графическая зависимость мощности дозы и оптической плотности от времени выдержки для F8+RCF, $F=1030$ мм, $s=20$ мм

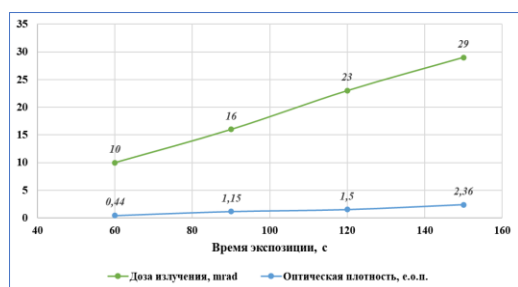


Рис. 5. Графическая зависимость мощности дозы и оптической плотности от времени выдержки просвечивания (HS800+Pb, $F=1030$ мм, $s=20$ мм)

Таблица 2. Результаты просвечивания $F=1030$ мм, $s=40$ мм

Время экспозиции, с	Доза излучения, mrad	Оптическая плотность, е.о.п.	Чувствительность, %	
			Канавочный эталон	Проволочный эталон
Пленка Agfa Structurix F8				
120	16	1,27	0,66	0,7
150	23	1,63	0,32	0,32
180	28	2,14	0,32	0,32
210	34	2,58	0,3	0,3
Пленка Kodak Industrex HS800				
120	12	0,93	0,87	120
150	17	1,42	0,34	150
180	25	1,98	0,32	180
210	29	2,49	0,3	210

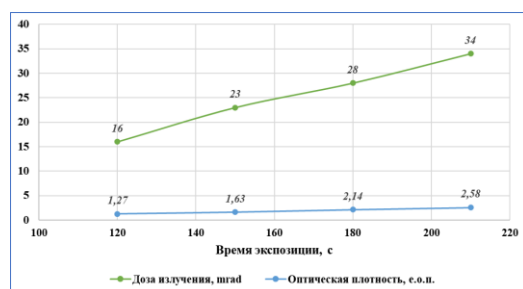


Рис. 6. Графическая зависимость мощности дозы и оптической плотности от времени выдержки просвечивания (F8+RCF, $F=1030$ мм, $s=40$ мм)

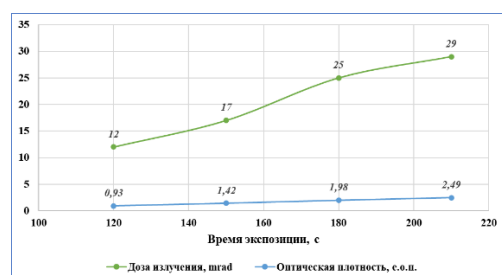


Рис. 7. Графическая зависимость мощности дозы и оптической плотности от времени выдержки просвечивания (HS800+Pb, $F=1030$ мм, $s=40$ мм)

Таблица 3. Результаты просвечивания $F=1030$ мм, $s=60$ мм

Время экспозиции, с	Доза излучения, mrad	Оптическая плотность, е.о.п.	Чувствительность, %	
			Канавочный эталон	Проволочный эталон
Пленка Agfa Structurix F8				
180	20	0,83	0,92	1,12
210	23	1,29	0,46	0,55
240	27	1,78	0,33	0,35
270	31	2,44	0,31	0,3
Пленка Kodak Industrex HS800				
180	17	0,52	1,58	1,59
210	20	0,97	1,12	1,13
240	23	1,49	0,38	0,38
270	26	1,94	0,33	0,33
300	29	2,36	0,31	0,3

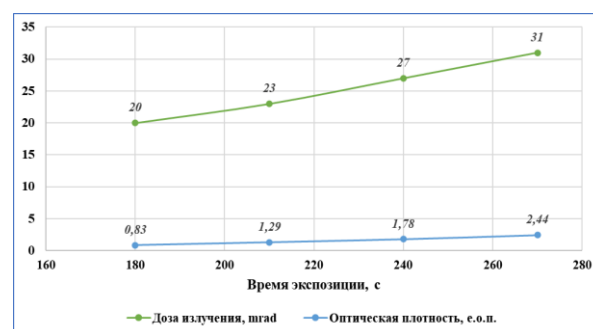


Рис. 8. Графическая зависимость мощности дозы и оптической плотности от времени выдержки просвечивания (F8+RCF, $F=1030$ мм, $s=60$ мм)

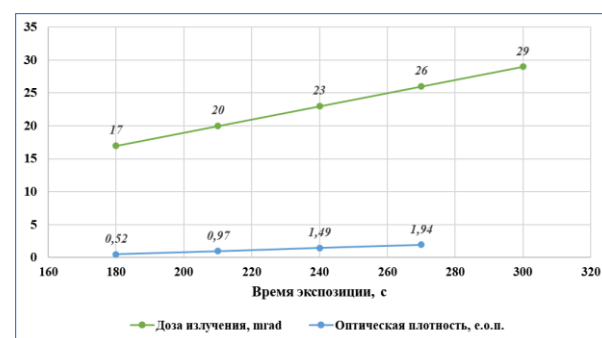


Рис. 9. Графическая зависимость мощности дозы и оптической плотности от времени выдержки просвечивания (HS800+Pb, $F=1030$ мм, $s=60$ мм)

Таблица 4. Оптимальное время экспозиций

Толщина просвечивания, мм	F8+RCF	HS800+Pb
20	101	120
40	139	160
60	239	241

Заключение

Визуальный и измерительный контроль (ВИК) эффективен для выявления поверхностных дефектов и геометрических отклонений, но не способен обнаружить внутренние дефекты. Радиационный контроль (РК) является ключевым методом для выявления внутренних дефектов (поры, включения, непровары), но имеет ограничения, такие как неспособность надежно обнаруживать трещины, плоскость которых не совпадает с направлением лучей.

Разработана и обоснована методика выбора параметров радиографического контроля для труб диаметром 1020 мм с толщиной стенки 10, 20 и 30 мм. В рамках методики:

1. Выбрана схема фронтального просвечивания через две стенки, соответствующая условиям эксплуатационного контроля.
2. В качестве источника ионизирующего излучения выбран портативный гамма-дефектоскоп Delta880, как оптимальный для полевых условий по сочетанию энергетических параметров, габаритов и массы.
3. Рассчитано минимальное фокусное расстояние (530 мм) и принято рабочее расстояние 1030 мм, что обеспечивает требуемую абсолютную чувствительность не хуже 0,3 мм и минимизирует геометрическую нерезкость.
4. Подобраны пары радиографических пленок и усиливающих экранов (Kodak Industrex HS800 со свинцовым экраном и Agfa Structurix F8 с флуорометаллическим экраном AGFA Structurix RCF) для достижения требуемой оптической плотности (не менее 1,5 е.о.п.) и чувствительности.
5. Определены эталоны чувствительности (канавочный №1 и проволоочный №2) в соответствии с требованиями нормативной документации.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная методика позволяет стандартизировать процесс радиационного контроля, повысить достоверность и точность определения размеров и типов дефектов. Это, в свою очередь, позволит перейти от жестких отбраковочных критериев, ведущих к увеличению объемов ремонта и замедлению темпов строительства, к более обоснованным инженерным подходам, основанным на точном прогнозировании поведения дефектов под нагрузкой.

Таким образом, реализация данной методики на практике будет способствовать повышению безопасности, надежности и экономической

эффективности как строительства, так и эксплуатации атомных электростанций.

Список литературы

1. ПНАЭ Г-7-008-89. Сварка и наплавка при изготовлении и монтаже оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
2. Макаров Е.Л. Инженерные методы оценки надежности сварных конструкций. – М.: Машиностроение, 1982.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86).
4. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
5. ГОСТ Р 27.002-2015 (ИСО 9000-2011). Надежность в технике. Термины и определения.
6. ГОСТ Р ИСО 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
7. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. — Взамен ГОСТ Р ИСО 9000-2011. — Москва : Стандартинформ, 2015. — 139 с
8. Потапов А.И. Дефекты и повреждения металлоконструкций. – М.: Стройиздат, 1990.
9. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.
10. ГОСТ 20426-82. Контроль неразрушающий. Источники ионизирующего излучения для радиографического контроля. Требования к основным параметрам.
11. ПНАЭ Г-7-017-89. Правила контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — Введ. 1990-01-01. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 120 с.
12. ПНАЭ Г-010-89. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации. — Введ. 1990-07-01. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 60 с.

References

1. PNAEH G-7-008-89. Svarka i naplavka pri izgotovlenii i montazhe oborudovaniya i truboprovodov atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok.
2. Makarov E.L. Inzhenernye metody ocenki nadezhnosti svarnykh konstrukcij. – M.: Mashinostroenie, 1982.
3. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok (PNAEH G-7-002-86).
4. GOST 15467-79. Upravlenie kachestvom produkcii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya.
5. GOST R 27.002-2015 (ISO 9000-2011). Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya.

6. GOST R ISO 9000-2011. Sistemy menedzh-menta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'.
7. GOST R ISO 9000-2015 Sistemy menedzh-menta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'. — Vza-men GOST R ISO 9000-2011. — Moskva : Stan-dartinform, 2015. — 139 s
8. Potapov A.I. Defekty i povrezhdeniya metal-lokon-strukcij. — M.: Strojizdat, 1990.
9. GOST 7512-82. Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Radiograficheskij metod.
10. GOST 20426-82. Kontrol' nerazrushayushchij. Istochniki ioniziruyushchego izlucheniya dlya radiogra-ficheskogo kontrolya. Trebovaniya k osnovnym para-metram.
11. PNAEH G-7-017-89. Pravila kontrolya osnov-nykh materialov (polufabrikatov), svarnykh soedi-nenij i naplavki oborudovaniya i truboprovodov atomnykh ehnergeticheskikh ustanovok. — Vved. 1990-01-01. — Moskva : Ehnergoatomizdat, 1990. — 120 s.
12. PNAEH G-010-89. Obshchie polozheniya obespe-cheniya bezopasnosti atomnykh stancij pri proekti-rovanii, sooruzhenii i ehkspluatacii. — Vved. 1990-07-01. — Moskva : Ehnergoatomizdat, 1990. — 60 s.

УДК: 662.8.057.25

Получение древесного полукокса в пиролизной установке роторного типа непрерывного действия

Горшков А.С.¹, Ивлев П.Н.¹, Калтаев А.Ж.¹, Губин А.В.², Ларионов К.Б.¹¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: avgubin@mail.sevsu.ru

Статья поступила 08.10.2025 г.; после доработки 09.10.2025 г.

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса пиролиза древесных отходов (щепы лиственных пород) в лабораторной установке роторного типа непрерывного действия. Результаты работы демонстрируют возможность управления свойствами полукокса путем варьирования температурного режима и параметров работы роторного реактора, что важно для оптимизации процессов переработки биомассы в энергетических и технологических целях.

Ключевые слова: Древесный отходы, пиролиз, роторная печь, древесный полукокс, содержание углерода, теплота сгорания, морфология, текстурные характеристики.

Obtaining wood semi-coke in a continuous rotary pyrolysis plant

Gorshkov A.S.¹, Ivlev P.N.¹, Kaltaev A.Zh.¹, Gubin A.V.², Larionov K.B.¹¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30² Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: avgubin@mail.sevsu.ru

Received 08.10.2025 y.; received in final form 09.10.2025 y.

Abstract

This paper presents the results of an experimental study of wood waste pyrolysis (hardwood chips) in a laboratory-scale continuous rotary reactor. The results demonstrate the feasibility of controlling the properties of semi-coke by varying the temperature and operating parameters of the rotary reactor, which is important for optimizing biomass processing for energy and industrial purposes.

Keywords: Wood waste, pyrolysis, rotary kiln, wood semi-coke, carbon content, combustion heat, morphology, textural characteristics.

Введение

Современная энергетика сталкивается с острой необходимостью снижения зависимости от ископаемых углеводородных ресурсов, истощение которых ведет к росту цен и геополитической нестабильности. Получение топлив из альтернативных типов сырья, в частности биомассы (древесных отходов), является одним из решений для снижения зависимости от ископаемых

энергоносителей, уменьшения выбросов парниковых газов и минимизации экологического ущерба.

В последнее десятилетие наблюдается рост интереса к использованию биомассы как возобновляемого источника энергии и углеродсодержащих материалов. При этом фокус исследований от непосредственного сжигания биомассы для получения тепла или её газификации в топ-

ливный газ смещается на технологии термической конверсии в полупродукты с высокой добавленной стоимостью в виде твердого углеродного остатка. Основой таких технологий является пиролиз — нагрев в бескислородной среде [1]. Несмотря на кажущуюся простоту процесса, пиролиз может осуществляться в очень разнообразных условиях. Например, для целевого получения жидких углеводородов применяют быстрый пиролиз, суть которого заключается в нагреве обрабатываемого сырья до температуры порядка 500–600 °С за несколько секунд [2]. В этом случае летучие продукты распада биомассы не успевают подвергнуться термическому крекингу и могут быть сконденсированы. Для целевого получения древесного полукокса применяются решения с обеспечением медленного нагрева [3] и формирования вторичных реакций и как следствие выхода большего количества целевого продукта [4]. Для обеспечения экономической эффективности технологии пиролиза древесных отходов с получением полукокса, важно чтобы процесс был непрерывным и исключал циклические нагревы и охлаждение установок, как это организовано для реторт [5]. Наиболее распространенными аппаратами на рынке, позволяющими обеспечить непрерывный процесс пиролиза являются реакторы шнекового и роторного типа [6]. При этом выбор технологического способа определяется типом сырья, в частности его фракционным составом. Для шнековых реакторов преимущественно используется опилка, в то время как для роторных — опилка и щепа [7]. Акцентируем внимание на реакторах роторного типа, преимуществом которых являются: доступность и уровень готовности технологии, возможность использования широкого фракционного состава сырья, регулируемость процесса и простота эксплуатации системы в целом.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса пиролиза древесных отходов с получением полукокса в печи роторного типа при различных значениях температуры реактора и расхода сырья.

Экспериментальная и аналитическая часть

В качестве исследуемого сырья использовалась щепа преимущественно лиственных пород деревьев, собранных после очистки лесополосы в пригороде г. Томска. Спиленные деревья подвер-

гались измельчению в специализированном оборудовании — измельчителе щепы. Далее сырье сушалось в сухом помещении в течение нескольких недель и подвергалось последующему фракционированию с помощью вибросита с отделением частиц размером 3–5 мм. Перед проведением исследований образцы биомассы подвергались сушке с помощью сушильного шкафа при температуре 105 °С до постоянной массы.

Определение технических характеристик осуществлялось в соответствии со стандартными методиками: ГОСТ Р 54211-2010 «Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием», ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности», ГОСТ 32990-2014 «Биотопливо твердое. Определение выхода летучих веществ». Элементный состав определен с использованием анализатора Micro Vario Cube (Elementar, Германия). В таблице 1 представлены технические характеристики и элементный состав фракционированных образцов опилок лиственных пород деревьев. Видно, что сырье характеризуется повышенной зольностью в диапазоне 1,0–2,3 %, что связано с большим содержанием коры: измельчению в основном подвергались мелкие кусты и ветки, с диаметром сучьев менее 20 мм.

Таблица 1. Технические характеристики и элементный состав исследуемого образца древесных опилок.

Технические характеристики, мас. %	Влажность W^r	9,0
	Зольность A^d	1,0
	Летучие V^{daf}	85,7
Насыпная плотность, кг/м ³		171,8
Элементный состав ^d , мас. %	C	44,5
	H	7,2
	N	0,2
	S	-
	O	46,7
^r — рабочая масса. ^d — сухая масса. ^{daf} — сухое беззольное состояние. * — определено как: 100% – CHNS – A^d		

Исследование процесса пиролиза древесных отходов было выполнено с помощью лабораторной установки роторного типа непрерывного действия, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

Реактор пиролиза древесных отходов роторного типа (7) размещен на металлической раме с возможностью регулировки угла его наклона. Установка состоит из приемного бункера (2) с дозатором (3), в который загружается исходное сырье в виде древесных опилок (таблица 1). Дозатор трубопроводом соединен с цилиндрическим корпусом шнекового транспортера (4),

шнек которого соединен с электроприводом. Другой конец корпуса шнекового транспортера соединен с промежуточной емкостью. При помощи шнекового транспортера (4) сырье подается в реакционную зону реактора (7), представляющий собой горизонтальную двустенную трубу, в зазоре между стенками которой, на равном расстоянии друг от друга, последовательно размещены три электрических нагревательных элемента, где в заданном диапазоне, с помощью электронагревателя с возможностью регулирования, поддерживается рабочая температура.

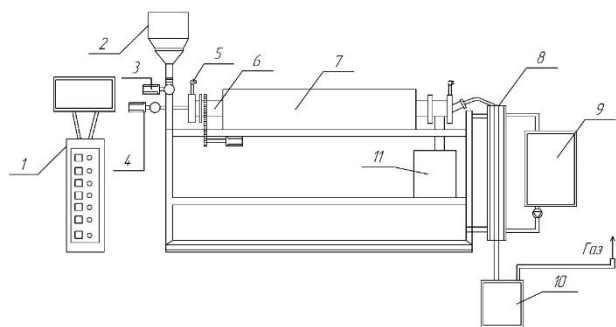


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки пиролиза древесных отходов: 1 - Блок управления реактором; 2 - приемный бункер; 3 - привод-дозатор; 4 - привод; 5 - термопара; 6 - труба реактора; 7.1, 7.2, 7.3 – объединенные реакционные зоны реактора пиролиза; 8 - конденсатор; 9 - охладитель; 10 - бункер приема жидких углеводородов, 11 – бункер приема полукокса.

Образующийся в процессе полукокс за счет вращения реактора поступает в приемный бункер целевого продукта (11), размещенной в хвостовой части установки. Газофазные продукты пиролиза, образующиеся в процессе разложения древесных отходов, поступают по патрубкам в систему конденсации. Система конденсации состоит из конденсатора (7), выполненного по типу труба в трубе с водяным охлаждением (рубашкой). Температура охлаждающей воды составляла 20 °С. Сверху конденсатор соединен с емкостью (8), наполненной водой, которая в нижней части трубопроводом через циркуляционный насос соединена с конденсатором. Нижнее отверстие конденсатора соединено с баком накопителем жидких углеводородов (9), оснащенный патрубком для отвода газов на аналитический отбор и в окружающую среду через систему вентиляции (вентиляция при этом находится в отключенном состоянии для исключения присосов воздуха через неплотности сальниковых уплотнений).

Управление параметрами установки (температуры нагрева зон реактора, скорости вращения приводов узла питания, скорость вращения роторного реактора) происходит с помощью персонального компьютера (1). К блоку управления подключены нагревательные элементы, датчики температур (термопары) и электроприводы для регулирования системы подачи и вращения реактора. Регулирование температур на нагревательных ТЭНах реактора лабораторной установки осуществляется ПИД-регуляторами.

В таблице 2 представлены технические характеристики лабораторной установки.

Таблица 2. Технические характеристики лабораторной установки пиролиза древесных отходов роторного типа.

Характеристика	Значение
Суммарная электрическая мощность установки, кВт	6,7
Внутренний диаметр реактора, мм	83
Толщина стенки реактора, мм	2,5
Тип и марка стали ротора (реактора)	Нержавеющая, 12Х18Н9
Длина реактора, мм	1250
Длина реакционной зоны, мм	1000
Объем реактора, м ³	0,007
Объем реакционной зоны реактора, м ³	0,005
Тип конденсатора газофазных продуктов пиролиза	Трубчатый, водоохлаждаемый
Длина конденсирующего устройства, мм	1250
Диаметр трубчатого конденсатора, мм	40
Угол наклона реактора, °	1,5
Температура сырья в бункере, °С	20
Температура в шнековом питателе, °С	60-80 в зависимости от температурного режима работы установки

Перед проведением эксперимента реактор нагревался до заданной температуры 400 – 550 °С (с шагом 50 °С) при непрерывном вращении на заданной скорости (таблица 2). По достижению заданной температуры в реакторе (по данным внутренних термопар камеры нагрева) следовал ввод сырья в реакционную зону реактора с установленной подачей 360 и 900 г/ч и скоростью вращения реактора 1,3 до 4 об/мин.

Определение параметров влажности, зольности, выхода летучих веществ и теплоты сгорания для полученных образцов полукокса было

выполнено в соответствии со стандартными методиками [8]. Содержание углерода, водорода, азота и серы определяли с использованием анализатора Micro Vario Cube (Elementar, Германия). Исследование морфологических характеристик было выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM JSM-6000C (JEOL, Япония). Удельная поверхность и пористость была определена с помощью анализатора 3P sync 220A (3P Instruments, Германия).

Исследование термического разложения полученных образцов полукокса осуществлялось с помощью дифференциального-термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany). Анализ проводился при скорости нагрева 10 °C/мин в корундовом тигле с перфорированной крышкой до температуры 800 °C в среде воздуха со скоростью потока 100 мл/мин.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлена зависимость изменения массового значения полученных продуктов процессе пиролиза древесных опилок при различных значениях температур и расходов.

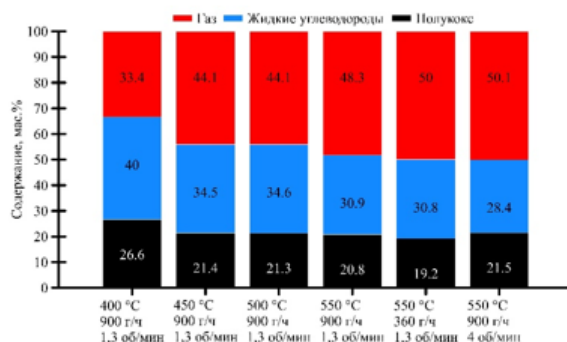


Рис. 2. Материальный баланс полученных продуктов пиролиза при различных температурах и расходе сырья.

С ростом температуры греющей среды наблюдается снижение массы образующегося в процессе пиролиза твердого остатка (полукоксы) с 26,6 до 20,8 мас. %, а также увеличение выхода газообразных продуктов (на 14,9 мас.%). Это связано с интенсификацией высвобождения летучих соединений и повышением карбонизации получаемого полукоксы в процессе пиролиза за счет увеличения подводимой энергии, обеспечивающей разрыв функциональных связей биомассы [9]. Повышение выхода неконденсируемых газообразных продуктов с ростом температуры греющей среды может быть связано с участием вторичных реакций крекинга парогазовой смеси [10]. При этом наиболее значительное изменение материального баланса наблюдается при переходе температуры процесса с 400 на 450 °C. При этом снижение расхода с 900 до 360 г/ч не привело к существенному изменению материального баланса, что отразилось на снижении значения выхода полукоксы с 21,5 до 19,2 мас%. Это связано с увеличением удельного потока тепла на единицу подводимой массы сырья, что привело к интенсификации процесса термического разложения биомассы.

В таблице 3 представлены результаты определения физико-химических характеристик и элементного состава полученных образцов древесного полукоксы после проведения процесса пиролиза

При увеличении температуры в реакторе от 400 до 550 °C наблюдается снижение выхода летучих соединений (с 20,63 до 13,72 мас.%) и увеличение зольности (с 7,00 до 8,51 мас.%). Теплота сгорания с ростом температуры увеличивается незначительно и сопоставима с полукоксом, полученным из других видов биомассы [5].

Таблица 3. Физико-химические характеристики исследуемых образцов древесного полукоксы

Образец	W^r	A^d	V^{daf}	Q_i^r	$S_{уд}$	$V_{уд}$	C^d	H^d	N^d	S^d	O^d
	мас. %			МДж/кг	м ² /кг	см ³ /г	мас. %				
Значение температуры реакционной зоны, °С (расход сырья составлял 900 г/ч, скорость вращения реактора 1,3 об/мин)											
400	4,06	7,00	20,63	28,26	1,31	0,006	71,63	2,06	0,81	0	19,31
450	3,72	7,34	18,09	28,42	1,63	0,008	71,82	2,89	1,07	0	17,95
500	2,37	7,63	16,87	28,61	1,74	0,009	73,17	1,64	1,64	0	17,56
550	2,70	8,51	13,72	28,72	2,06	0,010	79,62	2,14	0,64	0	9,73
Значение расхода, г/ч (температура в реакционной зоне 550 °С, скорость вращения реактора 1,3 об/мин)											
360	2,15	8,96	10,43	28,79	3,44	0,008	81,88	2,49	1,05	0	6,67
Скорость вращения реактора, об/мин (температура в реакционной зоне 550 °С, расход сырья 900 г/ч)											
4.0 об/мин	2.30	7.68	16.66	28.52	1.87	0.008	76.58	2.56	0.60	0	13.18

Увеличение содержания углерода с ростом температуры указывает на более глубокую карбонизацию полученного продукта. Так содержание углерода возросло с 71,63 до 79,63 мас. %.

При уменьшении значения расхода древесных отходов (360 г/ч) прослеживается увеличение содержания углерода до 81,88 мас. %, что говорит о его более высокой степени карбонизации. При этом повышается зольность полученного полукокса (до 8,96 мас. %) с уменьшением количества остаточных летучих соединений (10,43 мас. %). При повышении скорости вращения реактора наблюдается обратный эффект, выраженный в снижении зольности (относительно образца 550 °C) до 7,68 мас. % и повышении содержания остаточных летучих соединений до 16,66 мас. %. Содержание углерода также снижается до значения 76,58 мас. %. Обнаруженные эффекты связаны с изменением удельного потока тепла на единицу массы загружаемого сырья, а также интенсификации перемешиваемого слоя.

Также отметим, что с повышением температуры в реакторе наблюдается незначительное увеличение удельной площади поверхности полученных образцов полукокса.

На рисунке 3 представлены микрофотографии частиц образцов древесного полукокса, полученных после проведения процесса пиролиза.

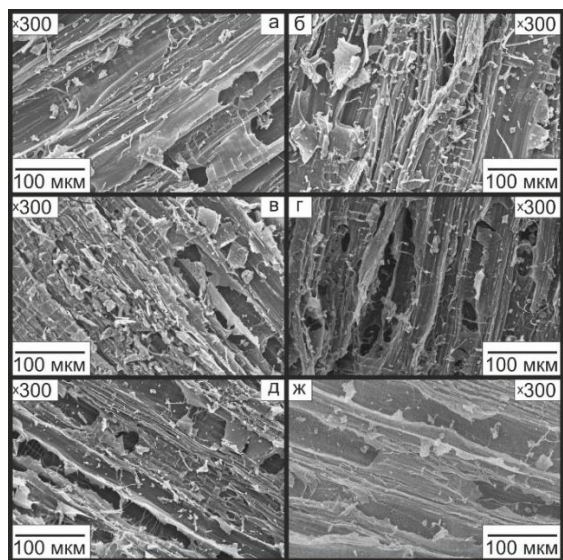


Рис. 3. Снимки РЭМ частиц исследуемых образцов: а – частицы полукокса полученные при 400 °C, б – частицы полукокса полученного при 450 °C, в – частицы полукокса полученного при 550 °C, г – частицы полукокса полученного при Tg = 550 °C, д – частицы полукокса полученного при Tg = 550 °C 360 г/ч, ж – частицы полукокса полученного при Tg = 550 °C 4,0 об/мин.

В результате проведения процесса пиролиза (рисунок 3) частицы полукокса имеют аморфный вид с большим числом пор и каналов. При этом общая форма частиц описывается цилиндрическим видом. Наиболее яркие изменения прослеживаются для образцов полукокса, полученных при Tg = 450 и 550 °C, что выражается в неоднородности поверхности частиц и увеличении количества и размера пор и каналов.

На рисунке 4 представлены результаты термического анализа исследуемых образцов древесного полукокса в окислительной среде. В таблице 4 представлены параметры процесса окисления.

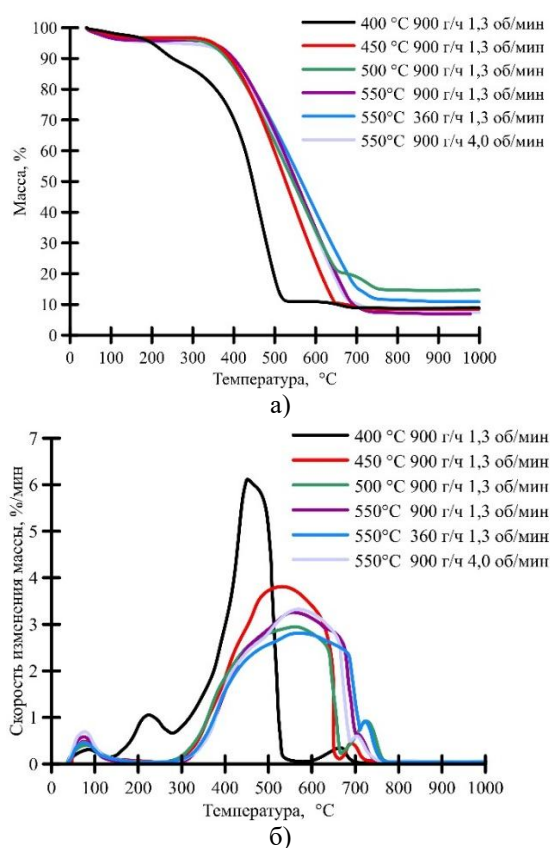


Рис. 4. Данные ТГ (а) и ДТГ (б) для процесса термического разложения исследуемых образцов древесного полукокса в окислительной среде. Воздух 150 мл/мин, скорость нагрева 10 °C/мин, масса навески ≈15 мг.

Анализ данных позволяет выявить зависимость параметров окисления от условий получения образцов. Согласно табличным данным, повышение температуры пиролиза, а также изменение расхода сырья и скорости вращения реактора существенно влияет на термическую стабильность получаемого древесного полукокса.

Наблюдается повышение температуры начала интенсивного окисления с повышением температуры пиролиза. Так, значение параметра T_i изменяется с 369 до 413 °С, а T_f - с 510 до 711 °С. Смещение в область более высоких температур сопровождается снижением максимальной скорости реакции, которая изменяется в интервале значений от 6,1 до 2,8 %/мин. Это обусловлено меньшим количеством летучих соединений в характерных образцах (таблица 3). Также можно наблюдать смещение температуры соответствующей максимальной температуре реакции от 80 до 115 °С. На полученных профилях ДТГ можно выделить четыре стадии термического преобразования (окисления) исследуемых образцов полукокса. На первой стадии процесса (до ~120 °С) происходит удаление адсорбированной влаги и легколетучих соединений, остающихся в пористой структуре полукокса. На второй стадии процесса (150~280 °С) можно наблюдать выход остаточных летучих соединений (в явном виде видно только у образца, полученного при $T=400$ °С). Третья стадия наблюдается на основном пике в интервале температур 400-650 °С. Данная стадия связана с активным окислением основной массы углерода. Четвертая стадия наблюдается в интервале 540-780 °С и выражается в виде пика на ДТГ профиле. Данная стадия характеризуется окислением связного углерода. Данный углерод имеет высокоупорядоченную близкую к графиту структуре.

Таблица 4. Параметры процесса окисления исследуемых образцов древесного полукокса.

Образец	Температура начала интенсивного окисления T_i , °С	Температура окончания интенсивного окисления T_f , °С	Максимальная скорость реакции $W_{\max}$, мас. %/мин	Температура при максимальной скорости реакции $T_{\max}$, °С
Значение температуры реакционной зоны, °С (расход сырья составлял 900 г/ч, скорость вращения реактора 1,3 об/мин)				
400	369	510	6,1	453
450	385	646	4,1	533
500	373	673	2,9	558
550	400	700	3,3	553
Значение расхода, г/ч (температура в реакционной зоне 550 °С, скорость вращения реактора 1,3 об/мин)				
360 г/ч	395	711	3,4	569
Скорость вращения реактора, об/мин (температура в реакционной зоне 550 °С, расход сырья 900 г/ч)				
4,0 об/мин	413	682	2,8	568

Заключение

Выполненное экспериментальное исследование процесса пиролиза древесных отходов в установке роторного типа непрерывного действия позволило получить комплексные данные о влиянии ключевых технологических параметров на выход и характеристики целевого продукта – древесного полукокса. Анализ результатов подтверждает, что варьирование температуры в реакторе и скорости подачи сырья является эффективным инструментом для управления как материальным балансом процесса, так и физико-химическими характеристиками получаемого древесного полукокса.

Установлена зависимость выхода продуктов пиролиза от температуры процесса. Повышение температуры с 400 до 550 °С приводит к интенсификации термического разложения биомассы, что выражается в снижении выхода полукокса с 26,6 до 20,8 % и соответствующем увеличении доли газообразных продуктов с 33,4 до 48,3 %. Наиболее значительные изменения материального баланса наблюдаются в интервале 400–450 °С, что свидетельствует о интенсивном разложении гемицеллюлоз и целлюлозы в данном температурном диапазоне. Снижение расхода сырья с 900 до 360 г/ч при температуре 550 °С способствует дальнейшему увеличению выхода газовой фазы (до 50 %) и снижению выхода полукокса (до 19,2 %), что объясняется увеличением удельного теплового потока на единицу массы сырья и, как следствие, более глубокой карбонизацией продукта.

С ростом температуры наблюдается ожидаемое снижение выхода летучих веществ (с 20,63 до 13,72 %) и увеличение зольности (с 7,00 до 8,51 %) вследствие концентрирования минеральной составляющей. При этом низшая теплота сгорания полукокса демонстрирует незначительный рост с 28,26 до 28,79 МДж/кг, которая подтверждает энергетический потенциал получаемого продукта, который можно использовать в качестве твердого биотоплива.

Исследование морфологических характеристик методом сканирующей электронной микроскопии выявило, что частицы полукокса имеют структуру с большим количеством пор и каналов. С повышением температуры пиролиза наблюдается увеличение неоднородности поверхности и размеров пор, что связано с интенсификацией выхода летучих соединений. Однако значения удельной поверхности, определенные методом БЭТ, для всех полученных образцов остаются крайне низкими (в диапазоне

1,3 – 3,4 м²/г). Этот факт однозначно указывает на то, что использованный режим медленного пиролиза в роторном реакторе не приводит к формированию развитой микропористой структуры. Основной вклад в площадь поверхности вносят макропоры и мезопоры, образованные в результате разрушения химических связей биомассы.

Данные термогравиметрического анализа в окислительной среде показали, что термическая стабильность полукокса существенно зависит от условий его получения. Повышение температуры пиролиза сырья закономерно смещает процесс окисления полученного полукокса в область более высоких температур. При этом снижение максимальной скорости окисления коррелирует с уменьшением содержания летучих соединений. Наличие на профилях ДТГ нескольких стадий окисления подтверждает гетерогенность химического состава полукокса, включающую остаточные летучие вещества, аморфный углерод и более упорядоченные углеродные структуры.

Таким образом, работа демонстрирует потенциал роторных пиролизных реакторов непрерывного действия для конверсии древесных отходов в энергетический полукокс с регулируемыми свойствами. Основными преимуществами данной технологии являются непрерывность процесса, возможность работы с сырьем переменного фракционного состава и гибкость в управлении параметрами. Найденные оптимальные условия (температура 550 °С, меньшее значение расхода (360 г/ч)) позволяют получать полукокс с более высоким содержанием углерода и теплотой сгорания, пригодной для использования в качестве возобновляемого твердого топлива. Перспективными направлениями для будущих исследований являются оптимизация режимов в реакторе, изучение влияния типа биомассы и ее предварительной подготовки.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2025-0003).

Список литературы

1. Liu, Q. Biomass Treatment Strategies for Thermochemical Conversion / Q. Liu, S. C. Chmely, N. Abdoulmoumine // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – № 4. – P. 3525-3536.
2. Influence of Pyro-Gasification and Activation

Conditions on the Porosity of Activated Biochars: A Literature Review / F. L. Braghiroli, H. Bouafif, C. M. Neculita, A. Koubaa // *Waste and Biomass Valorization*. – 2020. – Vol. 11. – № 9. – P. 5079-5098.

3. RETRACTED: Biochar production: Recent developments, applications, and challenges / P. Danesh, P. Niaparast, P. Ghorbannezhad, I. Ali // *Fuel*. – 2023. – Vol. 337. – P. 126889.
4. Varma, A. K. A Review on Pyrolysis of Biomass and the Impacts of Operating Conditions on Product Yield, Quality, and Upgradation / A. K. Varma, R. Shankar, P. Mondal // *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization*. – Singapore : Springer Singapore, 2018. – P. 227-259.
5. Получение брикетированного полукокса из древесных отходов методом стадийного низкотемпературного пиролиза / К. Б. Ларионов, С. А. Янковский, В. Е. Губин [et al.] // *Кокс и химия*. – 2020. – № 12. – P. 40-48.
6. Jerzak, W. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis / W. Jerzak, E. Acha, B. Li // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – № 20. – P. 5082.
7. Screw reactors and rotary kilns in biochar production – A comparative review / K. Moser, E. Wopienka, C. Pfeifer [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 174. – P. 106112.
8. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis / R. Tabakaev, I. Kanipa, A. Astafev [et al.] // *Fuel*. – 2019. – Vol. 245. – P. 29-38.
9. Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern United States / E. Amini, M. S. Safdari, J. T. DeYoung [et al.] // *Fuel*. – 2019. – Vol. 235. – P. 1475-1491.
10. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products / A. E. Pütün, N. Özbay, E. P. Önal, E. Pütün // *Fuel Processing Technology*. – 2005. – Vol. 86. – № 11. – P. 1207-1219.

References

1. Liu, Q. Biomass Treatment Strategies for Thermochemical Conversion / Q. Liu, S. C. Chmely, N. Abdoulmoumine // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – No. 4. – P. 3525-3536.
2. Influence of Pyro-Gasification and Activation Conditions on the Porosity of Activated Biochars: A Literature Review / F. L. Braghiroli, H. Bouafif, C. M. Neculita, A. Koubaa // *Waste and Biomass Valorization*. – 2020. – Vol. 11. – No. 9. – P. 5079-5098.
3. RETRACTED: Biochar production: Recent developments, applications, and challenges / P. Danesh, P. Niaparast, P. Ghorbannezhad, I. Ali // *Fuel*. – 2023. – Vol. 337. – P. 126889.

4. Varma, A. K. A Review on Pyrolysis of Biomass and the Impacts of Operating Conditions on Product Yield, Quality, and Upgradation / A. K. Varma, R. Shankar, P. Mondal // *Recent Advancements in Bio-fuels and Bioenergy Utilization*. – Singapore : Springer Singapore, 2018. – P. 227-259.
5. Production of briquetted semi-coke from wood waste by staged low-temperature pyrolysis / K. B. Larionov, S. A. Yankovsky, V. E. Gubin [et al.] // *Coke and Chemistry*. – 2020. – No. 12. – P. 40-48.
6. Jerzak, W. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis / W. Jerzak, E. Acha, B. Li // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – No. 20. – P. 5082.
7. Screw reactors and rotary kilns in biochar production – A comparative review / K. Moser, E. Wopienka, C. Pfeifer [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 174. – P. 106112.
8. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis / R. Tabakaev, I. Kanipa, A. Astafev [et al.] // *Fuel*. – 2019. – Vol. 245. – P. 29-38.
9. Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead native vegetation to the southern United States / E. Amini, M. S. Safdari, J. T. DeYoung [et al.] // *Fuel*. – 2019. – Vol. 235. – P. 1475-1491.
10. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products / A. E. Pütün, N. Özbay, E. P. Önal, E. Pütün // *Fuel Processing Technology*. – 2005. – Vol. 86. – No. 11. – P. 1207-1219.

УДК 691.32: 661.96

Оценка влияния наночастиц карбида вольфрама на температурную стойкость цементных композитов

Н.М. Королькова¹, О.П. Гавриш², Н.И. Черкашина³, Д.М. Дербасова⁴ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, nastyakushner2002@gmail.com¹ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) Российский университет транспорта, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9²

Статья поступила 08.10.2025 г.; после доработки 10.10.2025 г.

Аннотация

В рамках исследования было изучено влияние наночастиц карбида вольфрама (WC) на термостойкость цементных композитов. В ходе эксперимента анализировалось воздействие различных концентраций наночастиц при воздействии термических нагрузок в диапазоне от 300 до 800 °C. Полученные результаты продемонстрировали значительное повышение прочностных характеристик материала при введении наночастиц WC, особенно в условиях экстремальных температур. Методика проведения исследования соответствовала установленным нормативным требованиям. Исследование подтвердило, что вольфрам, благодаря своим уникальным термостойким и механическим характеристикам, значительно превосходит такие материалы, как нанокремнезем и нанотитан. Его способность заполнять микропоры цементной матрицы обеспечивает высокую устойчивость материала к экстремально высоким температурам.

Ключевые слова: цементные композиты, наночастицы, карбид вольфрама, термостойкость.

Evaluation of the influence of nanoparticles of tungsten carbide nanoparticles on temperature resistance of cement composites

N.M. Korolkova¹, O.P. Gavrish², N.I. Cherkashina³, D.M. Derbasova⁴¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, Sevastopol, 299053, Russia, nastyakushner2002@gmail.com¹
Russian University of Transport, GSP-4, Moscow, Russia⁴

Received 08.10.2025 y.; received in final form 10.10.2025 y.

Abstract

In this study, the effect of tungsten carbide (WC) nanoparticles on the thermal resistance of Ce composites was investigated. The experiment analysed the effect of different concentrations of nanoparticles when subjected to thermal loads in the range from 300 to 800 °C. The results obtained demonstrated a significant increase in the strength properties of the material when WC nanoparticles were introduced, especially at extreme temperatures. The methodology of the study complied with the established regulatory requirements. The study confirmed that tungsten, due to its unique thermal and mechanical characteristics, significantly outperforms materials such as nanosilica and nanotitanium. Its ability to fill the micropores of the cement matrix ensures high resistance to extreme temperatures.

Keywords: cement composites, nanoparticles, tungsten carbide, heat resistance

Введение

Цементные композиционные материалы представляют собой неотъемлемую основу со-

временной строительной индустрии, обладая выдающимися характеристиками прочности и долговечности. Однако их эксплуатационные свойства существенно ухудшаются под воздействием

высоких температур, что может привести к возникновению таких дефектов, как трещины, деформация, отслоение и даже обрушение конструкций. Эти негативные явления не только нарушают структурную целостность объектов, но и создают потенциальную угрозу безопасности жизни и имущества.

Особую значимость данная проблема приобретает для стратегически важных объектов инфраструктуры, таких как стартовые комплексы ракет, взлетно-посадочные полосы аэродромов, ядерные установки, мостовые переходы и склады горюче-смазочных материалов. Эксплуатация таких объектов требует применения материалов, способных выдерживать экстремальные температурные нагрузки и сохранять свои эксплуатационные характеристики в широком диапазоне условий окружающей среды.

Для повышения технологических и эксплуатационных характеристик цементных растворов и бетонов достаточно часто используются различные модифицирующие добавки.

В последние годы все более широкое распространение для повышения реологических характеристик бетонов приобретают пластификаторы на основе соединений вольфрама,

обладающие чрезвычайно высокой термостойкостью. Однако применение данных модификаторов, учитывая их высокую стоимость, приводит к значительному росту цен на готовую продукцию.

Результаты ранее проведенных авторами исследований свидетельствуют о возможности достижения высоких прочностных и реологических характеристик вяжущих цементных бетонов без существенного возрастания себестоимости за счет снижения расхода добавки при модификации их аддуктами нанокластеров.

Целью работы является оценка влияния наночастиц карбида вольфрама (WC) на термостойкость цементных композитов.

Результаты работы

С целью получения информации был проведен анализ ряда научных публикаций как российских, так и зарубежных источников. В журнале «Fibers» представлено исследование, посвященное диагностике трещин в фибробетонных конструкциях, проведенное в Греции [1]. Исследование показало, что фибровое армирование снижает вероятность возникновения дефектов и повышает механическую прочность строительных конструкций. В журнале «Fire Technology»

опубликованы исследования, посвященные влиянию высоких температур на цементные материалы. Результаты показывают значительное снижение прочности при температурах до 800 °C и подчеркивают важность использования добавок для повышения огнестойкости [2].

Наноматериалы, такие как нанокремнезем, нанотитан и нанокальций, демонстрируют потенциал для улучшения свойств цементных композитов [3–4]. Однако их термостойкость значительно уступает вольфраму, что обуславливает его высокую значимость в условиях экстремальных температур.

На основании проведенного анализа вольфрам был выбран в качестве основного наноматериала для данного исследования ввиду его высокой температурной стойкости, отличной теплопроводности, устойчивости к химическим воздействиям и способности улучшать механические характеристики цементных композитов. Эти свойства делают вольфрам оптимальным материалом для использования в условиях высоких термических нагрузок.

Экспериментальная часть исследования включала изготовление образцов цементных композитов с различной концентрацией наночастиц карбида вольфрама (WC) в диапазоне от 0% до 5%. Образцы подвергались термической обработке при температурах 300, 600 и 800 °C в течение 2 часов. Результаты испытаний показали, что добавление наночастиц WC существенно повышает механическую прочность цементных композитов. В частности, при температуре 300°C предел прочности увеличился на 37,04% у образцов с 5% содержанием WC, а при температуре 800 °C - на 85,09%. Анализ показал, что наночастицы WC заполняют микропоры в цементной матрице, предотвращая термическое расширение и снижая вероятность разрушения материала.

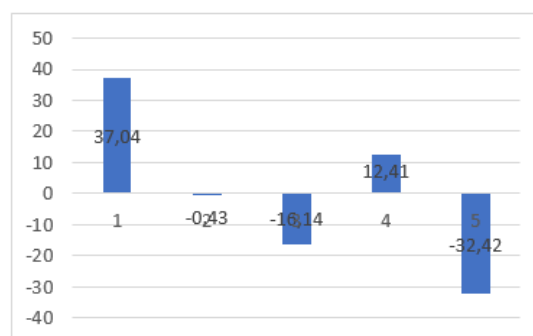


Рис. 1. Процентное соотношение изменения прочности образцов при отсутствии обжига от содержания в них карбида вольфрама

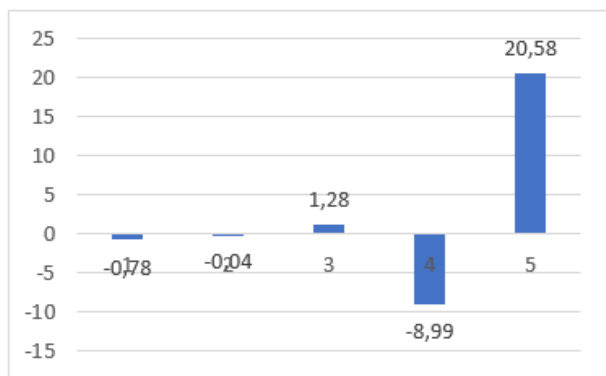


Рис. 2. Процентное соотношение изменения прочности образцов при обжиге в 300°C от содержания в них карбида вольфрама

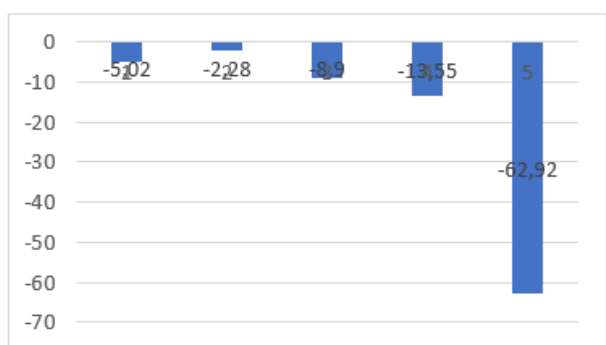


Рис. 3. Процентное соотношение изменения прочности образцов при обжиге в 600°C от содержания в них карбида вольфрама

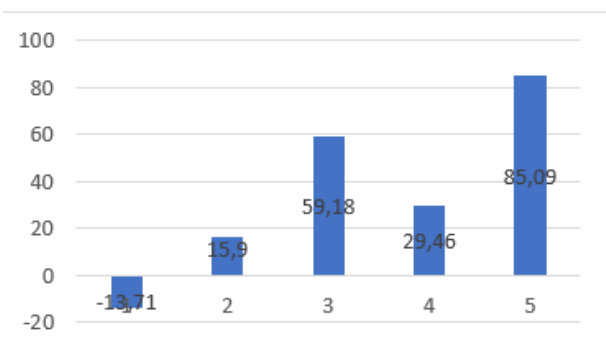


Рис. 4. Процентное соотношение изменения прочности образцов при обжиге в 800°C от содержания в них карбида вольфрама

Отрицательный прирост прочности при обжиге на 600°C может быть обусловлено фазовыми трансформациями и деградацией связующего компонента.

При температуре 300°C происходит структурная консолидация, при которой компоненты сохраняют свою стабильность, а прочностные

характеристики материала возрастают.

При достижении 600°C наступает термическое разложение связующего вещества, что сопровождается снижением прочности. В этот период образуются микротрещины, увеличивается пористость и ослабляются межфазные связи в композите.

При температуре 800°C возможны процессы спекания или химической стабилизации, в результате которых формируются новые, более прочные фазовые соединения, что приводит к повышению прочностных характеристик материала.

Заключение

В результате проведенного комплексного исследования было установлено, что механические характеристики цементных композитов демонстрируют значительную зависимость от концентрации наночастиц карбида вольфрама (WC). Эта зависимость является нелинейной и подвержена влиянию термических условий.

Отсутствие термической обработки композитов приводит к увеличению предела прочности на разрыв, что свидетельствует о позитивном влиянии наночастиц WC на микроструктурные параметры материала.

При температуре 300°C наблюдается снижение предела прочности композитов, содержащих 5% наночастиц WC, до 20,58% относительно исходных значений. Это может быть связано с начальными процессами рекристаллизации и фазовых превращений в матрице композита.

Повышение температуры до 600°C вызывает дальнейшее снижение прочностных характеристик, что указывает на деградацию структуры материала при достижении пороговых значений термической нагрузки.

Максимальный эффект увеличения предела прочности на 85,09% достигается при температуре 800°C для композитов с содержанием 5% наночастиц WC. Этот результат подчеркивает синергетическое взаимодействие между наночастицами WC и цементной матрицей при оптимальных температурных условиях.

Таким образом, исследование выявило, что термическая обработка оказывает значительное влияние на механические свойства цементных композитов, содержащих наночастицы WC. Оптимальные условия термического воздействия позволяют достичь максимального повышения прочности, что открывает перспективы для разработки высокоэффективных строительных материалов с улучшенными эксплуатационными

характеристиками.

Применение нанотехнологий не только решает задачу повышения термостойкости строительных материалов, но и оптимизирует их характеристики для использования в строительстве. Это способствует минимизации рисков и повышению безопасности инфраструктуры. Внедрение инновационных материалов, таких как карбид вольфрама, является ключевым шагом в развитии строительной отрасли, направленным на создание более надежных и долговечных конструкций, способных выдерживать самые сложные условия эксплуатации.

Инновационные материалы на основе наночастиц карбида вольфрама обладают значительным потенциалом для применения в аэрокосмической промышленности и строительстве. Их использование позволяет существенно повысить показатели безопасности и долговечности, что особенно важно для объектов инфраструктуры, работающих в условиях экстремальных нагрузок. Однако дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение экологических аспектов применения таких материалов, включая вопросы устойчивого производства и минимизации экологического воздействия.

Список литературы

1. Voutetaki M.E., Naoum M.C., Papadopoulos N.A. et al. Cracking Diagnosis in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2022;
2. Flores-Vivian I. et al. Влияние SiO₂-наночастиц на свойства цементных материалов. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018;
3. Cao M. et al. Effect of High Temperature on Compressive Strength of Cement Paste. *Fire Technology*. 2022;
4. Hafiz W.I. et al. Влияние графитовых микропластинок на характеристики бетона. *Construction and Building Materials*. 2020;
5. Сатыбалдиев А.К. Влияние минеральных добавок на свойства портландцемента. *Молодой ученый*. 2020.
6. Gavrish V., Chayka T., Baranov G., Gavrish O. Investigation of the influence of nanomodifying additives on the strength properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Pp. 1433–1436.
7. Gavrish V., Cherkashina N., Chayka T. Investigations of the influence of tungsten carbide and tungsten oxide nanopowders on the radiation protection properties of cement matrix-based composite materials. *J. of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1652(1), 012008.
8. Chernishov E., Artamonova O.V., Slavcheva G. Nano-Modification of Building Composite Structures. *Strength of Materials*. 2020 10.5772.
9. Liu Changjiang, He Xin, Deng Xiaowei, Zheng Zhoulian, Liu Jian, Hui David. Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: A review. *Nanotechnology Reviews*. 2020. Vol. 9(1). Pp. 1427–1444.

References

1. Voutetaki M.E., Naoum M.C., Papadopoulos N.A. et al. Cracking Diagnosis in Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2022
2. Flores-Vivian I. et al. Influence of SiO₂-nanoparticles on the properties of cement materials. *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018;
3. Cao M. et al. Effect of High Temperature on Compressive Strength of Cement Paste. *Fire Technology*. 2022;
4. Hafiz W.I. et al. Effect of graphite microplaques on the performance of concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;
5. Satybaldiev A.K. Influence of mineral additives on the properties of Portland cement. *Young Scientist*. 2020.
6. Gavrish V., Chayka T., Baranov G., Gavrish O. Investigation of the influence of nanomodifying additives on the strength properties of concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Pp. 1433–1436.
7. Gavrish V., Cherkashina N., Chayka T. Investigations of the influence of tungsten carbide and tungsten oxide nanopowders on the radiation protection properties of cement matrix-based composite materials. *J. of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1652(1), 012008.
8. Chernishov E., Artamonova O.V., Slavcheva G. Nano-Modification of Building Composite Structures. *Strength of Materials*. 2020 10.5772.
9. Liu Changjiang, He Xin, Deng Xiaowei, Zheng Zhoulian, Liu Jian, Hui David. Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: A review. *Nanotechnology Reviews*. 2020. Vol. 9(1). Pp. 1427–1444.

УДК 620.178.742.4

Изучение влияния наночастиц оксида вольфрама на ударопрочность керамических изделий, изготовленных из каолиновой глины

Н.М. Королькова¹, О.П. Гавриш², Н.И. Черкашина³, Д.М. Дербасова⁴ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, nastyakushner2002@gmail.com¹ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) Российский университет транспорта, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9²

Статья поступила 20.10.2025 г.; после доработки 21.10.2025 г.

Аннотация

В данном исследовании представлены результаты анализа влияния различных концентраций нанопорошка триоксида вольфрама (WO_3) на ударную прочность керамических изделий, изготовленных на основе каолиновой глины. Полученные данные свидетельствуют о том, что введение нанопорошка WO_3 в керамическую матрицу приводит к значительному повышению ее сопротивления ударным воздействиям. Это обусловлено армированием внутренней структуры керамического материала, что способствует улучшению его механических характеристик. В ходе исследования применялись стандартные методики производства керамических изделий и тестирования их на ударную прочность в соответствии с действующими нормативными требованиями. Определена ударная прочность образцов с различной концентрацией нанопорошка оксида вольфрама: 0, 1, 2, 3, 4 и 5%. Анализ полученных в ходе испытаний данных показали, что нанопорошок оксида вольфрама (VI), армируя внутреннюю структуру керамического изделия на основе каолиновой глины, повышает сопротивляемость динамическим нагрузкам (ударным воздействиям).

Ключевые слова: керамика, ударная прочность, наночастицы, оксид вольфрама.

Study of the effect of tungsten oxide nanoparticles on the impact resistance of ceramic products made of kaolin clay

N.M. Korolkova¹, O.P. Gavrish², N.I. Cherkashina³, D.M. Derbasova⁴¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, Sevastopol, 299053, Russia, nastyakushner2002@gmail.com¹
Russian University of Transport, GSP-4, Moscow, Russia⁴

Received 20.10.2025 y.; received in final form 21.10.2025 y.

Abstract

This study presents the results of analysing the effect of different concentrations of tungsten trioxide nanopowder (WO_3) on the impact strength of kaolin clay-based ceramics. The data obtained indicate that the introduction of WO_3 nanopowder into the ceramic matrix leads to a significant increase in its impact resistance. This is due to the reinforcement of the internal structure of the ceramic material, which contributes to the improvement of its mechanical characteristics. In the course of the study, standard methods for the production of ceramic products and their testing for impact resistance in accordance with the current regulatory requirements were used. The impact strength of samples with different concentrations of tungsten oxide nanopowder was determined: 0, 1, 2, 3, 4, and 5%. The analysis of the test data showed that tungsten oxide nanopowder (VI), by reinforcing the internal structure of a kaolin-based ceramic product, increases its resistance to dynamic loads (impacts).

Keywords: ceramics, impact strength, nanoparticles, tungsten oxide.

Введение

Изделия из каолиновой глины, обладающие уникальными физико-химическими характеристиками, имеют долгую историю применения. Они нашли широкий спектр применения в различных видах промышленности такие как: медицинская, военная, строительная, санитарно-бытовая промышленности, и не смотря на свои преимущества в виде влаго-, жаро- и химической стойкости, керамические изделия имеют существенный недостаток – низкий показатель сопротивляемости динамическим нагрузкам (ударным воздействиям), что существенно или снижает срок службы, или вовсе ведет к отказу использования данного материала, а также ведет к увеличению массогабаритности изделий.

В настоящее время, благодаря внедрению современных технологий и модификации состава, их актуальность и востребованность только возросли.

Однако керамические материалы характеризуются недостаточной устойчивостью к ударным нагрузкам, что может существенно сократить срок их эксплуатации, увеличить массогабаритные параметры изделий или сделать их использование нецелесообразным. Для минимизации данного вида разрушений предлагается модификация структуры керамики путем введения наночастиц триоксида вольфрама WO_3 .

Одним из направлений нанотехнологий является создание керамики из наноразмерных порошков, в которой удастся сохранить очень малые размеры зерна. Предполагается, что нанокерамика будет обладать дополнительными особыми свойствами (например, сверхпластичностью [1]). Известно, что чем меньше размер зерен и чем больше развита зернистая структура, тем прочнее и тверже керамика. В то же время, в нанопорошках, используемых для получения керамики, существуют устойчивые трудноразрушаемые агломераты наночастиц [3], что требует применения нестандартных методов компактирования, например горячего прессования.

Целью работы является оценка влияния добавки триоксида вольфрама на ударную прочность керамических изделий, изготовленных из каолиновой глины.

Результаты работы

На основании анализа базы данных Роспатента за период с 70-х годов прошлого столетия по настоящее время установлено отсутствие патентов на составы или технологии производства

керамики с использованием триоксида вольфрама.

Среди последних запатентованных разработок в данной области выделяются патенты №2718682 и №2697987.

Патент №2718682. Производилось добавление тонкодисперсного порошка карбида кремния (SiC) с дальнейшим спеканием керамики методом горячего прессования. Результат работы дал высокие показания значений прочности и твердости, низкий коэффициент термического расширения, а также высокую износостойкость композитного материала. Но недостатком разработки стала возможность образования вторичных фаз при спекании, что существенно может повлиять на физико-механические свойства полученной керамики [1].

Патент №2697987. При добавлении нитрида кремния (Si_3N_4) и нитрида титана (TiN), с дальнейшим спеканием керамики методом горячего прессования, был получен результат в виде повышения показателей прочности и микротвердости, низкий коэффициент термического расширения, повышена износостойкость и электрическая проводимость керамики, но также есть возможность загрязнения состава материала в процессе изготовления и, как следствие, снижение его физико-механических свойств [2].

Помимо базы данных Роспатента был произведен поиск и анализ в системе eLIBRARY.RU. Наиболее близкими к области исследования стали работы В.И. Лысенко, в особенности работа «Создание и свойства керамики из нанопорошка оксида вольфрама». В данном случае использовался интересующий нас оксид вольфрама (VI) – WO_3 , спекание проводилось методом SPS (метод искрового плазменного спекания, является модифицированной версией метода горячего прессования с непосредственным пропусканием электрического тока через прессформу в прессуемую заготовку), результатом стало создание мелкозернистая, плотной, прочной керамики [3].

Как следует из анализа представленных исследований, ни в одном из них не были проведены испытания на ударопрочность материала. Вследствие этого отсутствует информация о поведении керамического материала при возникновении ударных нагрузок.

В рамках настоящего исследования был использован нанопорошок оксида вольфрама (VI), WO_3 , синтезированный в научно-образовательном центре «Перспективные технологии и материалы» Севастопольского государственного университета по оригинальной технологии из

вольфрамсодержащих промышленных отходов. Поскольку данный материал не является коммерчески доступным продуктом массового производства, его физико-химические характеристики были определены в лабораторных условиях научно-образовательного центра. Гранулометрический анализ порошка показал наличие частиц в диапазоне от 20 нанометров до 2 микрометров, при этом 90% частиц имеют размеры в нанометрическом диапазоне (до 100 нанометров).

Нанопорошок оксида вольфрама (VI) представляет собой перспективный полупроводниковый материал, обладающий следующими характеристиками:

- высокая фотокаталитическая активность;
- хорошая химическая стабильность;
- высокая фотокоррозионная стойкость;
- низкая себестоимость производства.

Методика проведения эксперимента была разработана в соответствии с требованиями ГОСТ 26407-84 «Посуда фарфоровая и фаянсовая. Метод определения сопротивления удару». Экспериментальные процедуры включали пять последовательных этапов [5].

Этап №1. Изготовление образцов. Образцы изготавливались с концентрациями оксида вольфрама (VI) в 0, 1, 2, 3, 4 и 5% шликерным методом в гипсовые формы с последующей естественной сушкой. После изъятия из форм, образцы вновь проходили естественную сушку и направлялись на обжиг в муфельную печь.

Этап №2. Отбор образцов. Отбор происходил следующим способом: выбирались образцы диаметром $10,0 \pm 0,5$ мм, высотой $80,0 \pm 1,0$ мм и стрелой прогиба не более 1 мм. На одну серию (концентрацию) было взято не менее 10 керамических образцов из каолиновой глины.

Этап №3. Подготовка образцов к испытанию. Подготовка состояла в том, что для верного измерения находилась середина образца по длине, куда в дальнейшем приходился удар маятникового копера.

Этап №4. Проведение испытания. Испытание проводилось на маятниковом копере.

Этап №5. Анализ полученных данных (рис.1.).

Результаты проведенных испытаний образцов с различной концентрацией нанопорошка оксида вольфрама (VI) демонстрируют значимое увеличение показателя по сравнению с контрольными образцами без добавления нанопорошка. Процентный прирост зафиксирован во всех исследованных концентрациях (рис. 2).

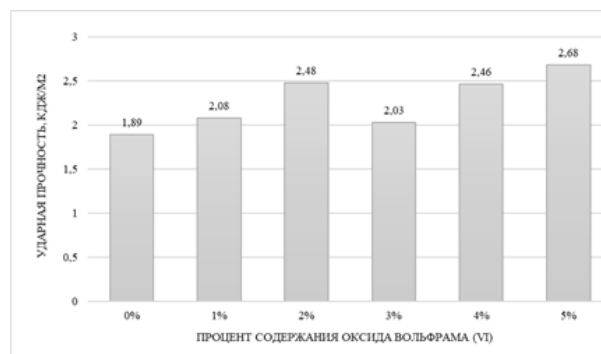


Рис. 1. Результаты испытаний на ударную прочность керамических образцов

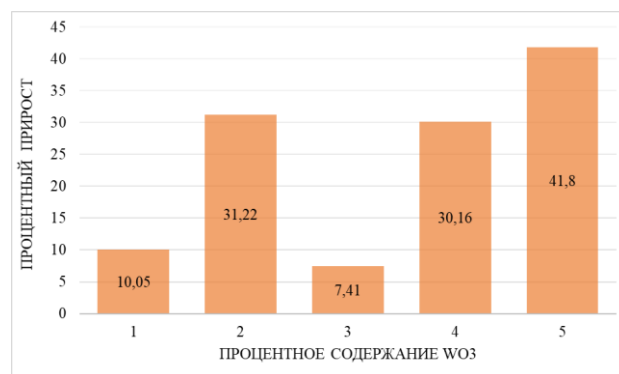


Рис. 2. Процентный прирост ударной прочности образцов

Заключение

Результаты проведенных испытаний демонстрируют повышение ударной прочности керамических образцов при введении в их состав наночастиц оксида вольфрама (VI). В частности, в образцах с содержанием 5% нанопорошка зафиксировано увеличение прочности на 41,8% в сравнении с контрольными образцами, не содержащими наночастиц.

Представленная инновационная рецептура, характеризующаяся повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, обладает значительным потенциалом для применения в различных отраслях промышленности. Данная технология позволяет снизить массу керамических изделий или производить продукцию с улучшенными характеристиками ударопрочности.

Полученные экспериментальные данные открывают новые перспективы для расширения области применения керамических материалов, повышая их долговечность и устойчивость к внешним воздействиям, и служат основой для дальнейших научных исследований в данной области.

Полученные в ходе исследовательской работы данные открывают новые возможности использования керамических изделий на основе каолиновой глины, а также прокладывают дорогу для дальнейших исследований в данной области. Содержание нанопорошка оксида вольфрама в смеси увеличивает ударную прочность материала почти в два раза.

Список литературы

1. Патент №2718682. Способ изготовления керамики на основе карбида кремния, армированного волокнами карбида кремния : №2018132426 : заявл. 12.09.2018 : опубл. 13.04.2020 / Фролова М. Г., Лысенков А. С., Каргин Ю. Ф., Титов Д. Д., Ким К. А., Перевислов С. Н., Истомина Е. И.; заявитель, патентообладатель ФГБУ науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) – 7 с;
2. Патент №2697987. Способ изготовления керамики на основе композита нитрид кремния - нитрид титана : №2018138560 : заявл. 01.11.2018 : опубл. 21.08.2019 / Титов Д. Д., Лысенков А. С., Фролова М. Г., Каргин Ю. Ф., Ким К. А., Ивичева С. Н.; заявитель, патентообладатель ФГБУ науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) – 7 с;
3. Лысенко В. И. Создание и свойства керамики из нанопорошка оксида вольфрама // НАНОИНДУСТРИЯ – 2017 - № 3 (73) - С. 68-71;
4. Нарбекова Д. Д., Дербасова Н. М., Гавриш В. М. Исследование применения нанопорошка оксида вольфрама для очистки сточных вод // Энергетические установки и технологии - 2021 – Т. 7 - № 1 - С. 142-145;
5. ГОСТ 26407-84. Посуда фарфоровая и фаянсовая. Метод определения сопротивления удару. (утв. постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28 декабря 1984 г. N 4989) : межгосударственный стандарт : дата введения 30.06.1987 / государственный стандарт союза ССР. - Государственный комитет СССР по стандартам. - Изд. официальное. – Москва : Издательство стандартов. – 1985. – 7 с.
6. Gavrish V., Chayka T., Baranov G., Gavrish O. Investigation of the influence of nanomodifying additives on the strength properties of concrete. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. Pp. 1433–1436.
7. Gavrish V., Cherkashina N., Chayka T. Investigations of the influence of tungsten carbide and tungsten oxide nanopowders on the radiation protection properties of cement matrix-based composite materials. J. of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1652(1), 012008.
8. Chernishov E., Artamonova O.V., Slavcheva G. Nano-Modification of Building Composite Structures. Strength of Materials. 2020 10.5772.
9. Liu Changjiang, He Xin, Deng Xiaowei, Zheng Zhoulian, Liu Jian, Hui David. Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: A review. Nanotechnology Reviews. 2020. Vol. 9(1). Pp. 1427–1444.

References

1. Patent No. 2718682. Method of manufacturing silicon carbide-based ceramic-mics reinforced with silicon carbide fibres : #2018132426 : applied for. 12.09.2018 : published. 13.04.2020 / Frolova M. G., Lysenkov A. S., Kargin Yu. F., Titov D. D., Kim K. A., Perevislov S. N., Istomina E. I.; applicant, patentee FGBU Science Institute of Metallurgy and Materials Science named after A.A. Baikov, Russian Academy of Sciences. A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (IMET RAS) - 7 p;SR 2.6.1.2612-10 Sanitary rules and regulations "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (BSRERS)", 21.08.2019;
2. Patent No. 26697987. Method of manufacturing ceramics based on silicon nitride - titanium nitride-nitride composite : №2018138560 : applied. 01.11.2018 : published 21.08.2019 / Titov D. D., Lysenkov A. S., Frolova M. G., Kargin Yu. F. F., Kim K. A., Ivicheva S. N.; applicant, patentee FGBU Science Institute of Metallurgy and Materials Science named after A. A. Baikov. A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (IMET RAS) - 7 p;
3. Lysenko V. I. Creation and properties of ceramics from tungsten oxide nanopowder // NANOINDUSTRIA - 2017 - № 3 (73) - P. 68-71;
4. Narbekova D. D., Derbasova N. M., Gavrish V. M. Research of application of tungsten oxide nanopowder for wastewater treatment // Energy Installations and Technologies - 2021 - Vol. 7 - No. 1 - P. 142-145;
5. GOST 26407-84. Porcelain and faience tableware. Method of determination of resistance to impact. (approved by the USSR State Committee for Standards from 28 December 1984 N 4989) : interstate standard : date of introduction 30.06.1987 / State Standard of the Union of Soviet Socialist Republics. - USSR State Committee for Standards. - Ed. official. - Moscow : Izdatelstvo.
6. Gavrish V., Chayka T., Baranov G., Gavrish O. Investigation of the influence of nanomodifying additives on the strength properties of concrete. Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 38. Pp. 1433–1436.
7. Gavrish V., Cherkashina N., Chayka T. Investigations of the influence of tungsten carbide and tungsten oxide nanopowders on the radiation protection

- properties of cement matrix-based composite materials. J. of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1652(1), 012008.
8. . Chernishov E., Artamonova O.V., Slavcheva G. Nano-Modification of Building Composite Structures. Strength of Materials. 2020 10.5772.
 9. Liu Changjiang, He Xin, Deng Xiaowei, Zheng Zhouliao, Liu Jian, Hui David. Application of nano-materials in ultra-high performance concrete: A review. Nanotechnology Reviews. 2020. Vol. 9(1). Pp. 1427–1444.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск № 3, Том 11 2025 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность; 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике); 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Адрес редакции:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7.

Телефон редакции: 8(692) 710164

<https://old.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1272-njeut>

e-mail: nauchnyy_zhurnal@mail.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

Главный редактор: Якимович Борис Анатольевич

Подписано к печати 25.11.2025 Заказ 26/25. Дата выхода в свет: Тираж 30 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 17,15.

Севастополь, 2025