

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 № 1

**Севастополь
2025**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2025. – Т. 11. - № 1. – 143 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 Словацкий 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»!

Предлагаем Вашему вниманию первый номер журнала в 2025 году, который традиционно посвящен рассмотрению актуальных вопросов современной энергетики и смежных с ней областей науки и техники, таких как радиационная и техносферная безопасность, процессы и аппараты химических технологий, методы и приборы контроля и диагностики.

Мы благодарим авторов за проявленный интерес к журналу. Особенно благодарны уважаемым рецензентам за стремление сделать статьи и журнал лучше. Ваши замечания очень важны авторам и редколлегии. Просим не стесняться в критической оценке рецензируемых вами работ.

Современная энергетика тесно связана и включает в себя такие физико-технические и технологические вопросы как взаимодействие интенсивного лазерного, рентгеновского, микроволнового излучения и потоков заряженных частиц с веществом, экспериментальные методы генерации и диагностики экстремальных состояний вещества, физика плазмы, физика ударных волн, детонация и горение. Этим и другим смежным вопросам посвящена ежегодная Фортовская международная конференция "Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом" (ПЕФМ), проводимая Объединенным институтом высоких температур РАН. Конференция является уникальной дискуссионной площадкой, которая привлекает ведущих российских и зарубежных ученых в области высоких энергий, применения лазерной и плазменной техники, материаловедения. В 2025 году мне представилась возможность выступить на ПЕФМ 2025 с докладом, посвященным применению лазерной техники скоростной визуализации для исследования плазменных процессов и процессов горения высокоэнергетических материалов. Часть представленных на конференции материалов опубликованы ранее в первом и четвертом выпусках журнала «Энергетические установки и технологии» за 2024 год.

Уважаемые коллеги! Рады вам сообщить, что третий номер журнала «Энергетические установки и технологии» будет посвящен Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2025», которая состоится в г. Севастополе 15–18 сентября текущего года. Направления работы конференции: экологические проблемы и комплексное управление ресурсами; мониторинг и средства контроля состояния окружающей среды; техносферная безопасность и промышленный контроль; современная электроэнергетика, электротехника и электротранспорт; химические технологии и материалы в энергетике; ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика; влияние энергетики на окружающую среду. Конференция проходит при поддержке ПАО «Россети» – Магистральные электрические сети Юга. Будем рады видеть Вас в числе участников конференции!

*С уважением, заместитель главного редактора журнала «Энергетические
установки и технологии», доктор технических наук
Ф.А. Губарев*

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетические системы и комплексы	10
<i>Аль-Руфаи Ф.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Шаповаленко В.В., Рыбонька А.И.</i> Волновая энергетическая установка на основе пьезоэлектрических преобразователей для питания морских буев	10
<i>Аль-Руфаи Ф.М., Якимович Б.А., Владимиров А.С., Скидан А.А., Буренков М.В.</i> Оценка выработки электрической энергии от солнечных батарей, расположенных на защитных экранах автомагистралей	16
<i>Какушина Е.Г., Гурьев В.В., Якимович Б.А.</i> Регулирование частоты в энергосистеме при помощи солнечных электростанций	25
<i>Муртазаев Э.Р., Якимович Б.А., Нагирняк А.А., Шаповаленко В.В., Коломийченко В.П.</i> Установка преобразования энергии морских волн для потребителей Крымского региона	32
<i>Янковский С.А., Крутенко Д.С., Лавриненко С.В., Губин В.Е., Матузаев К.Б., Цибульский С.А.</i> Анализ термальных вод юрского водоносного горизонта Томской области для выработки электроэнергии	40
Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды	45
<i>Кузнецова Н.И., Стрыкова А.В., Жигайло А.Д.</i> Электромагнитные методы диагностики при диагностировании технического объекта	45
<i>Кузнецова Н.И., Стрыкова А.В., Жигайло А.Д.</i> Магнитографический метод диагностирования энергетического оборудования	52
Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность	57
<i>Браславский Ю.В., Сукрушев А.В., Губин А.В.</i> Исследование работы реакторной и турбинной установок в переходных режимах при сбросе паровой и электрической нагрузок	57
<i>Котельникова С.А., Акимов А.М.</i> Оценка воздействия на окружающую среду кучного выщелачивания урана из отвалов уранодобывающих предприятий	65
<i>Самошина Л.В., Гавриш О.П., Королькова Н.М.</i> Организация и ведение радиоэкологического мониторинга на Российских атомных электростанциях	72
<i>Сукрушев А.В., Браславский Ю.В., Губин А.В., Губина Е.Д.</i> Оценка влияния работы системы гидроемкостей второй и третьей ступени на безопасность работы ЯЭУ АЭС	78
Электротехнические комплексы и системы	85
<i>Малюк Е.Г.</i> Мониторинг технического состояния изоляции кабелей 6-10 кВ в сетях с изолированной нейтралью	85
<i>Скрябина Е.В., Михайлова О.С.</i> Устройство для измерения и обработки первичной информации	90
Теоретическая и прикладная теплотехника	94
<i>Довгаленко В.В., Чернобаев С.С., Кукуруз Д.В.</i> Исследование ширины интерференционных полос	94

Техносферная безопасность (в энергетике)	100
<i>Контылева Е.А., Маврин С.А.</i> Эффективность применения модулярной арифметики в информационных системах	100
<i>Контылева Е.А.</i> Разработка метода повышения помехоустойчивости и пропускной способности радиоканалов с ограниченными частотными и энергетическими ресурсами на основе применения фазочастотных модулированных сигналов	105
<i>Сафонова Е.Г., Егорова А.О., Маврин С.А.</i> Вопрос актуальности проблемы целенаправленных кибератак на критическую информационную инфраструктуру	110
<i>Тверская С.Е.</i> Повышение экологической безопасности судна путем модернизации установки по обработке сточных вод	117
Процессы и аппараты химических технологий	122
<i>Ведищева О.В., Ворник О.В., Магдыч Е.А.</i> Сравнительная оценка использования наноструктурированного SiO ₂ для очистки модельных сред, содержащих Pb ²⁺ , Ni ²⁺ и Co ²⁺	122
<i>Львов А.В., Черкашина Н.И.</i> Дезинфицирующие хлорсодержащие препараты: анализ активного хлора и расчет экономической эффективности использования	130
<i>Пичугова Л.Н., Корнеева Н.К., Вишняков А.Н.</i> Анализ способов разделения элементов бинарных труб	134
<i>Ткаченко Э.В., Яковлев Л.А., Федорова С.А., Русяев С.В.</i> Изучение возможности применения инкапсулированных сорбентов на основе хитозана	137

CONTENTS

Energy systems and complexes	10
<i>Al-Rufae F.M., Yakimovich A.B., Kuvshinov V.V., Shapovalenko V.V., Rybonka A.I.</i> Wave energy plant based on piezoelectric converters for powering marine buoys	10
<i>Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A. Vladimirov A.S., Skidan A.A., Burenkov M.V.</i> Estimation of electrical energy production from solar panels located on highway protective screens	16
<i>Kakushina E.G., Guriev V.V., Yakimovich B.A.</i> Frequency control in the power system using solar power plants	25
<i>Murtazaev E.R., Yakimovich A.B., Nagirnyak A.A., Shapovalenko V.V., Kolomiychenko V.P.</i> Sea wave energy conversion Installation for consumers in the Crimean region	32
<i>Yankovsky S.A., Krutenko D.S., Lavrinenko S.V., Gubin V.E., Matuzaev K.B., Tsibulskiy S.A.</i> Analysis of thermal waters of the Jurassic aquifer of the Tomsk region for power generation	40
Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment	45
<i>Kuznetsova N.I., Strykova A.V., Zhigailo A.D.</i> Electromagnetic diagnostic methods when diagnosing a technical object	45
<i>Kuznetsova N.I., Strykova A.V., Zhigailo A.D.</i> Magnetographic method of power equipment diagnostics	52
Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety	57
<i>Braslavskiy Y.V., Sukrushev A.V., Gubin A.V.</i> Study of the operation of reactor and turbine units in transient modes during the discharge of steam and electrical loads	57
<i>Kotelnikova S.A., Akimov A.M.</i> Environmental impact assessment of heap leaching of uranium from the dumps of uranium mining enterprises	65
<i>Samoshina L.V., Gavrish O.P., Korolkova N.M.</i> Organization and maintenance of radioecological monitoring at Russian nuclear power plants	72
<i>Sukrushev A.V., Braslavskiy Y.V. Gubin A.V., Gubina E.D.</i> Assessment of the impact of the operation of the second and third stage hydroaccumulator system on the safety of the nuclear power plant	78
Electrical engineering complexes and system	85
<i>Malyuk E.G.</i> Monitoring of the technical condition of insulation of 6-10 kV cables in networks with insulated neutral	85
<i>Skryabina, E.V., Mikhailova O.S.</i> A device for measuring and processing primary information	90
Theoretical and applied heat engineering	94
<i>Dovgalenko V.V., Chernobaev S.S., Kukuruz D.V.</i> Investigation of the width of interference fringes	94
Technosphere safety (in the energy sector)	100

<i>Kontyleva E.A., Mavrin S.A.</i> The effectiveness of modular arithmetic in information systems	100
<i>Kontyleva E.A.</i> Development of a method to increase the noise immunity and bandwidth of radio channels with limited frequency and energy resources based on the use of phase-frequency modulated signals	105
<i>Safonova E.G., Egorova A.O., Mavrin S.A.</i> The issue of relevance of the problem of targeted cyberattacks on critical information infrastructure	110
<i>Tverskaya S.E.</i> Improving the environmental safety of the vessel by modernizing the sewage waters treatment plant	117
 Processes and devices of chemical technologies	 122
<i>Vedishcheva O.V., Vornik O.V., Magdych E.A.</i> Efficiency of sorption of Cu^{2+} and Fe^{3+} cations with KU-2-8 cationite modified with fullerene	122
<i>Lvov A.V., Cherkashina N.I.</i> Chlorine-containing disinfectants: analysis of active chlorine and calculation of economic efficiency of use	130
<i>Pichugova L.N., Korneeva N.K., Vishnykov A.N.</i> Analysis of methods for separating elements of binary pipes	134
<i>Tkachenko E.V., Yakovishin L.A., Fedorova S.A., Rusyaev S.V.</i> Studying the possibility of using encapsulated sorbents based on chi-tosan	137

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.92

Волновая энергетическая установка на основе пьезоэлектрических преобразователей для питания морских буйев

Аль-Руфай Ф.М.¹, Якимович Б.А.¹, Кувшинов В.В.¹, Шаповаленко В.В.¹
Рыбонька А.И.²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия,

²АО "Центр судоремонта "Звездочка"

vvkuvshinov@mail.sevsu.ru, bayakimovich@mail.sevsu.ru

Статья поступила 10.02.2025 г.; после доработки 12.02.2025 г.

Аннотация

В данной работе разработана и подтверждена экспериментальными результатами имитационная модель системы ПЭ для использования энергии волн. Определена максимальная мощность, достижимая пьезоэлектрическим элементом, и показано, что выходная мощность устройства для сбора энергии достаточна для обеспечения требуемой электрической мощности для малоомощных датчиков в буйях. В предлагаемом решении используется устройство, состоящее из пьезоэлектрических элементов, предназначенное для преобразования энергии морских волн. Работа пьезоэлектрических элементов была смоделирована с помощью программного пакета COMSOL, что позволило подобрать оптимальный вариант конструкции для проведения натурных испытаний. Экспериментальное тестирование пьезоэлементов было проведено с целью исследования выходной мощности устройства. Показанные результаты эксперимента, соответствовали данным, полученным на стадии моделирования. Пьезоэлементы продемонстрировали способность генерировать электрическую энергию, достаточную для передачи в различные накопители энергии и последующего питания устройств.

Ключевые слова: пьезоэлектрический элемент (ПЭ), Comsol Multiphysics, энергия волн, поток воды, буй, малоомощный энергетический системы

Wave energy plant based on piezoelectric converters for powering marine buoys

Al-Rufae F.M.¹, Yakimovich A.B.¹, Kuvshinov V.V.¹, Shapovalenko V.V.¹,
Rybonka A.I.²

¹Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, ²Ship Repair Center "Zvezdochka"

vvkuvshinov@mail.sevsu.ru, bayakimovich@mail.sevsu.ru

Received 10.02.2025 y.; received in final form 12.02.2025 y

Abstract

In this paper, a simulation model of a PE system for harnessing wave energy is developed and validated with experimental results. The maximum power achievable by the piezoelectric element is determined and it is shown that the output power of the energy harvesting device is sufficient to provide the required electrical power for low-power sensors in buoys. The proposed solution uses a device consisting of piezoelectric elements designed to convert the energy of sea waves. The operation of piezoelectric elements was simulated using the COMSOL software package, which made it possible to select the optimal design option for full-scale testing. Experimental testing of piezo elements was carried out to study the output power of the device. The experimental results shown were consistent with the data obtained at the modeling stage. Piezoel-ements have demonstrated the ability to generate electrical energy sufficient to be transferred to various energy storage

devices and subsequently power devices.

Key words: piezoelectric element (PE), Comsol Multiphysics, wave energy, water flow, buoy, low-power energy systems

Введение

Пьезоэлектрические материалы (ПЭ) могут использоваться в различных приложениях малой мощности благодаря своей способности преобразовывать механические колебания или деформации в электрическую энергию [1]. Пьезоэлектрические материалы можно использовать для сбора энергии из природных источников, таких как ветер или потоки воды. Кроме того, извлечение энергии из естественных источников, в частности мирового океана, — это безуглеродный процесс, который является перспективным видом получения возобновляемой энергии [2,3]. Данный процесс реализуется за счет волновой энергии, которую получают морские буи, расположенные на поверхности воды. Именно в области морских буйов осуществляется сбор и использование энергии волн. Собранная энергия может быть применена для питания небольших беспилотных морских судов. На рис. 1 продемонстрировано, какие возобновляемые источники энергии используются для выработки необходимой энергии и какие виды буйов необходимы для данного процесса [4,5].

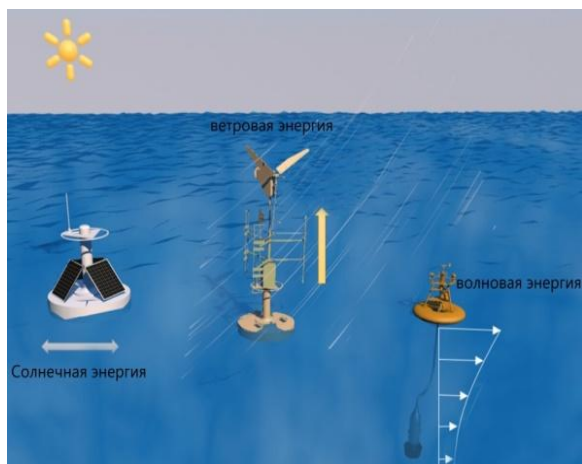


Рис. 1. Возобновляемые источники энергии для различных энергосистем на буйах

Было доказано, что буй испытывает постоянное движение под воздействием морских волн [6]. Поэтому если встроить пьезоэлектрические материалы в конструкцию буйа, механическое движение, вызванное воздействием волн, возможно преобразовать в электрическую энергию. Полученная энергия может быть использована

для питания датчиков на буйе, которые отслеживают условия окружающей среды: высоту волн, температуру воды и ее соленость. Кроме того, энергия может использоваться для систем связи на буйе, позволяя передавать данные в режиме реального времени на береговые объекты.

Постановка цели и задач научного исследования

В данной исследовательской работе проведены эксперименты и выполнено моделирование пьезоэлектрического элемента с целью извлечения энергии из волн и потока жидкости и обеспечения питания низкомощных устройств.

Для этой цели в системах с потоком жидкости, включая открытые каналы, были использованы различные пьезоэлектрические материалы, такие как PVDF. В процессе моделирования пьезоэлектрических элементов и сбора энергии применялись инженерные программы, включая COSMOL Multiphysics. Кроме того, использовались морские информационные буйа, оборудованные датчиками для мониторинга водных и метеорологических данных. Например, водный буй Nexans CB-25 на рисунке 2, который потребляет 4 Вт энергии [7].



Рис. 2. Информационные буйа Nexans CB-25 [7]

Теория пьезоэлектрических материалов

Пьезоэлектрические материалы демонстрируют прямой пьезоэлектрический эффект, генерируя электричество при механической деформации. Этот эффект широко применяется в производстве датчиков и устройств для сбора энергии. С другой стороны, обратный пьезоэлектрический эффект возникает, когда эти материалы механически деформируются под действием электрического напряжения. Поэтому уравнение пьезоэлектрической связи может быть использовано для описания обоих указанных эффектов [8]:

$$S = s^E T + dE \quad (1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2)$$

где S - механическая деформация; D - электрическое смещение; T - механическое напряжение; E - электрическое поле; s^E - упругое соответствие; ε - диэлектрическая проницаемость; d - матрица пьезоэлектрических коэффициентов деформации.

Модель конечных элементов (МКЭ)

COMSOL Multiphysics предоставляет широкие возможности для моделирования и анализа трехмерных конечно-элементных моделей (3D МКЭ). Это передовое программное обеспечение, предназначенное для решения сложных инженерных задач, позволяет моделировать различные физические процессы [9]. Следовательно, COMSOL Multiphysics облегчает моделирование пьезоэлектрического эффекта, давая точные результаты для проектирования и оптимизации пьезоэлектрических устройств. Модель пьезоэлектрического устройства для сбора энергии потоков воды или волн содержит пьезоэлектрический элемент, закрепленный на нижней поверхности корпуса, как показано на рисунке 3.

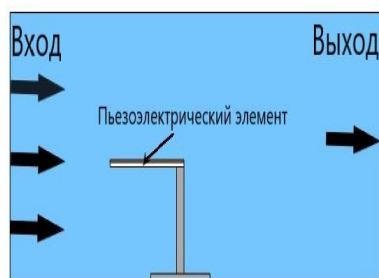


Рис. 3. Модель пьезоэлектрического энергетического комбайна, разработанная в COMSOL

На рисунке 4 приведена блок-схема последовательных этапов работы в программе COMSOL.

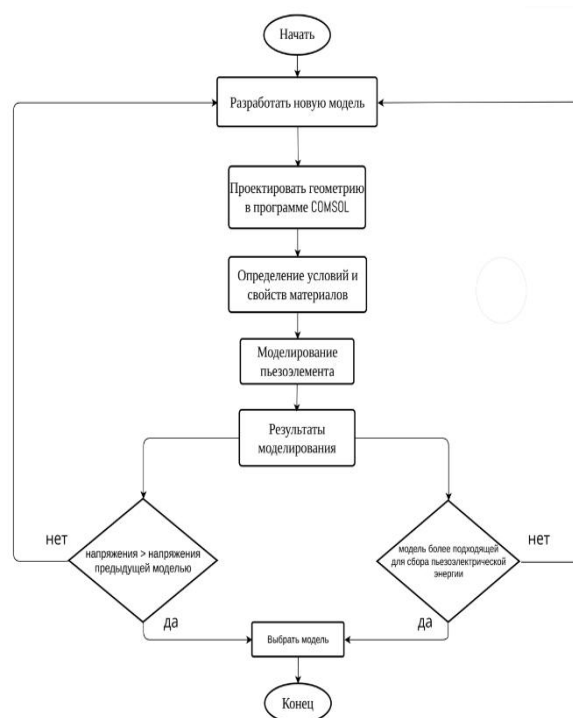


Рис. 4. Модель пьезоэлектрического энергетического комбайна, разработанная в COMSOL

Пьезоэлектрический материал

Эффективность и долговечность пьезоэлектрических устройств тесно зависят от материала и конструкции, используемых в их создании. В данном исследовании для сбора энергии из потока воды был выбран материал поливинилиденфторид (PVDF). Этот выбор обусловлен уникальными характеристиками PVDF, такими как высокая гибкость, способность выдерживать высокое давление, легкость, устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения и высокая прочность [10]. Рисунок 5 наглядно демонстрирует применение PVDF в качестве пьезоэлектрического материала для сбора энергии.

Элемент PVDF имеет размеры 45x10 мм и толщину 0,25 мм. Пьезоэлектрическая полоса закреплена на опоре, которая выходит вниз в волновой резервуар, что обеспечивает электрическое соединение и фиксацию ее положения. Входным отверстием является левая граница резервуара для воды, а выходным отверстием — правая сторона. Предполагается, что параметры водной среды остаются постоянными в течение исследования, включая температуру и давление. Для учета интерфейсов, включая поверхность

пьезоэлектрического элемента, в данной модели использовалась сетка, основанная на физических принципах. В общей сложности было использовано около 10000 элементов сетки. Исследование решаемой модели проводилось в течение временного интервала от 0 до 0,6 секунды, что соответствует одному полному циклу волны, проходящей через волновой резервуар.



Рис. 5. Пьезоэлектрический материал и устройство, используемое в исследовании

Полученные результаты указывают на потенциал использования данного метода для сбора энергии с мощностью на уровне милливатт, что делает его подходящим для приложений с низким энергопотреблением.

Результаты моделирования в COMSOL MULTIPHYSICS

Для того, чтобы сократить время сходимости моделирования было принято решение ограничиться двумерным (2D) анализом вместо трехмерного (3D), с допущением ламинарного потока для упрощения математической модели. Пьезоэлектрический компонент был подвергнут моделированию в двух различных ориентациях. В первом сценарии компонент был размещен горизонтально при угле наклона 0 градусов, в то время как во втором сценарии он был установлен вертикально с углом наклона 90 градусов, как проиллюстрировано на рисунке 6.

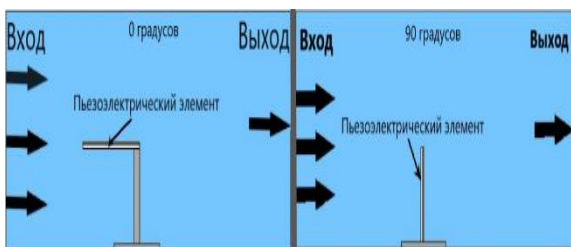


Рис. 6. ПЭ Модели, анализируемые в Comsol

В ходе эксперимента отмечается увеличение скорости потока воды с нулевой начальной

скорости до 1,8 м/с в течение времени от 0 до 0,38 с. Затем скорость потока постепенно уменьшается и достигает нуля к моменту времени 0,6 с. Это изменение скорости приводит к формированию пика напряжения, который наблюдается приблизительно через 0,38 с после начала эксперимента. Выходная мощность пьезоэлектрических элементов изменяется аналогичным образом, как показано на рисунке 7.

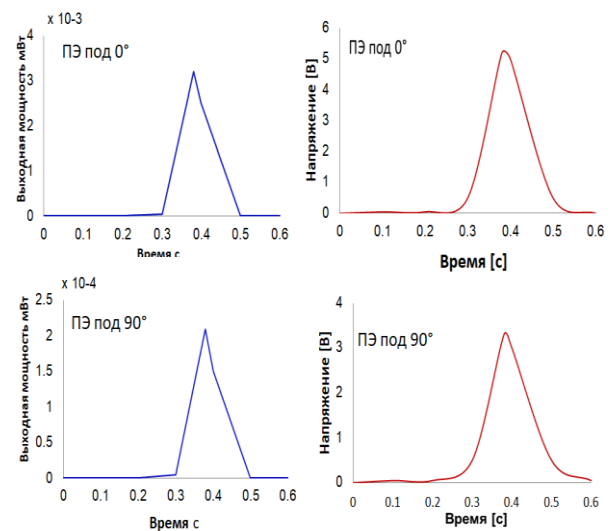


Рис. 7. Выходная мощность и напряжение пьезоэлектрического элемента при различных ориентациях

Таким образом, можно сделать вывод, что при одинаковых условиях пьезоэлектрический элемент, расположенный горизонтально под углом 0°, превосходит элемент, расположенный вертикально под углом 90°, как по напряжению, так и по выходной мощности.

Экспериментальное исследование

Для того, чтобы подтвердить результаты моделирования, проведенного в программе COMSOL для пьезоэлектрических (ПЭ) элементов, был организован экспериментальное испытание проточного канала. Процесс проиллюстрирован на рисунке 5. Предложенная механическая система (модель Hamburg NM 150) включала в себя резервуар для воды, проточный канал, циркуляционную трубу для воды и элемент из поливинилиденфторида (PVDF). Вода, имеющая температуру и давление окружающей среды, была подана в резервуар, создавая волновой фронт, который распространялся по всей длине резервуара и воздействовал на пьезоэлектрический элемент, вызывая его деформацию. Затем вода вытекала из отверстия в конце резервуара после прохождения через канал.

Полученные экспериментальные данные, включая напряжение и выходную мощность пьезоэлектрического элемента, представлены на рисунке 8.

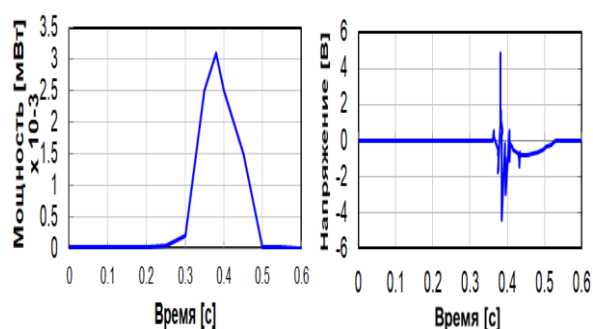


Рис. 8. Экспериментальные результаты ПЭ

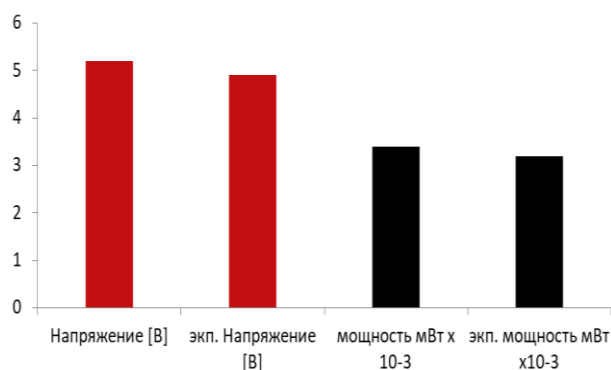


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами

Таким образом, при использовании этого метода мощность фиксируется на уровне мВт, что делает его подходящим только для приложений с очень низким энергопотреблением.

Заключение

В данном исследовании разработана и подтверждена экспериментальными данными имитационная модель системы пьезоэлектрических (ПЭ) элементов для преобразования энергии волн. Результаты моделирования были подвергнуты анализу и сравнению с экспериментальными данными ПЭ. Наблюдается согласованность между полученными модельными и практическими результатами. Таким образом, COMSOL Multiphysics предоставляет возможность проводить детальное моделирование пьезоэлектрического эффекта и получать точные результаты, которые могут быть использованы для проектирования и оптимизации пьезоэлектрических устройств.

Кроме того, была определена максимальная

выходная мощность, которую может достичь пьезоэлектрический элемент, и показано, что его выходная мощность достаточна для удовлетворения электроэнергетических потребностей низкомощных датчиков, установленных в морских бухах. Полученные результаты также указывают на то, что в настоящее время пьезоэлектрические материалы не всегда конкурентоспособны по стоимости и эффективности по сравнению с другими источниками возобновляемой энергии, такими как солнечные батареи. Следовательно, требуется дальнейшее исследование и разработка альтернативных гибких пьезоэлектрических композитных материалов, способных обеспечить более высокую выходную мощность.

Список литературы

1. Аль-Руфай Ф. М.М. Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Основные положения методики оценки эффективности пьезопреобразователей// Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023. – Т. 26, № 1. – С. 28-34.
2. Benjamin Drew, Andrew R. Plummer, Mehmet Sahinkaya. A review of wave energy converter technology. Journal of Power Energy, 2009, Vol. 223, No. 8, pp. 887-902.
3. McLeod I, Ringwood J V. Powering data buoys using wave energy: A review of possibilities. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2022, 8(3), pp. 417-432.
4. Xu M, Zhao T, Wang C, et al. High power density tower-like triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional water wave energy. ACS nano, 2019, 13(2), pp. 1932-1939.
5. Seyedeh Fatemeh Nabavi, Anooshiravan Farshidianfar, Aref Afsharfard. Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys. Applied Ocean Research, 2018, Vol.76, pp. 174-183
6. Nan Wu, Quan Wang, XiangDong Xie. Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure. Applied Ocean Research, 2015, Vol. 50, pp.110-118.
7. NexSens technology, Drifting Buoys, text available online: <https://www.nexsens.com/systems/drifting-buoys>
8. Priya s.Jeba, Song Hyun-Cheol, ZhouYuan, at el. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. Energy Harvesting and Systems, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 3-39.
9. Mourched B, Hoxha M, Abdelgalil A, at el. Piezoelectric-Based Sensor Concept and Design with Machine Learning-Enabled Using COMSOL Multiphysics. Applied Sciences. 2022, 12(19),9798.
10. K. Malhotra, M.U. Kumari, G. Shireesha, at el. Design and simulation of stacked PVDF layers with ZnO for piezoelectric nanodevices. Materials

Today: Proceedings, 2021, Vol. 42 (2), pp. 951-954,

References

1. Al-Rufae F. M.M. Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V. Osnovnyye polozheniya metodiki otsenki effektivnosti p'yezopreobrazovateley// Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2023. – Т. 26, № 1. – S. 28-34.
2. Benjamin Drew, Andrew R. Plummer, Mehmet Sahinkaya. A review of wave energy converter technology. Journal of Power Energy, 2009, Vol. 223, No. 8, pp. 887-902.
3. McLeod I, Ringwood J V. Powering data buoys using wave energy: A review of possibilities. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2022, 8(3), pp. 417-432.
4. Xu M, Zhao T, Wang C, et al. High power density tower-like triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional water wave energy. ACS nano, 2019, 13(2), pp. 1932-1939.
5. Seyedeh Fatemeh Nabavi, Anooshiravan Farshidianfar, Aref Afsharfard. Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys. Applied Ocean Research, 2018, Vol.76, pp. 174-183.
6. Nan Wu, Quan Wang, XiangDong Xie. Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure. Applied Ocean Research, 2015, Vol. 50, pp.110-118.
7. NexSens technology, Drifting Buoys, text available online: <https://www.nexsens.com/systems/drifting-buoys>
8. Priya s.Jeba, Song Hyun-Cheol, ZhouYuan, at el. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. Energy Harvesting and Systems, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 3-39.
9. Mourched B, Hoxha M, Abdelgalil A, at el. Piezoelectric-Based Sensor Concept and Design with Machine Learning-Enabled Using COMSOL Multiphysics. Applied Sciences. 2022, 12(19),9798.
10. K. Malhotra, M.U. Kumari, G. Shireesha, at el. Design and simulation of stacked PVDF layers with ZnO for piezoelectric nanodevices. Materials Today: Proceedings, 2021, Vol. 42 (2), pp. 951-954

УДК 620.92, 621.31

Оценка выработки электрической энергии от солнечных батарей, расположенных на защитных экранах автомагистралей

Аль-Руфай Ф.М., Якимович Б.А., Владимиров А.С., Скидан А.А.,
Буренков М.В.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 03.02.2025 г.; после доработки 05.02.2025 г.

Аннотация

В работе исследованы солнечные панели для выработки энергии на дорогах, причем солнечные системы показывают большую эффективность. Интеграция фотоэлектрических систем на защитные экраны обеспечивает дополнительное производство энергии. Было проведено исследование автодороги Таврида в Крыму для оценки эффективности этих технологий, что может помочь в выборе оптимальных методов сбора энергии на автомагистралях.

Ключевые слова: солнечный батарей, защитные экраны, автомагистраль "Таврида", возобновляемая энергетика, солнечное излучение.

Estimation of electrical energy production from solar panels located on highway protective screens

Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A. Vladimirov A.S., Skidan A.A., Burenkov M.V.
Sevastopol state university, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

Received 03.02.2025 y.; received in final form 05.02.2025 y.

Abstract

The work examines solar panels for generating energy on roads, and solar systems show greater efficiency. Integration of photovoltaic systems into protective screens provides additional energy production. A study was conducted on the Tavrida highway in Crimea to evaluate the effectiveness of these technologies, which can help in choosing optimal energy harvesting methods on highways.

Key words: solar panels, protective screens, Tavrida highway, renewable energy, solar radiation.

Введение

Автомагистраль "Таврида", протяженностью 250,75 км, пересекающая полуостров Крым, отличается инновационным подходом к энергетическому обеспечению. Солнечные панели, установленные на защитных экранах, конвертируют солнечный свет в электричество. Это создает источник возобновляемой энергии, который не только уменьшает зависимость от традиционных форм энергии, но и снижает выбросы

углекислого газа. Энергия, собираемая с этих панелей, используется для питания различных элементов автомагистрали, включая системы освещения, знаки и сигнальные системы.

Это дополнительно подчеркивает устойчивый подход к инфраструктуре, используемый при создании автомагистрали "Таврида". Таким образом, использование солнечной энергии на защитных экранах является значительным шагом вперед в области зеленых технологий и

устойчивого развития, делая Крым одним из первых в этом направлении [1-4].

Методы и материалы

В этом исследовании был разработан метод проектирования, который интегрирует технологию солнечной энергии, отобранную в Крыму с защитным экраном. В исследовании рассматривается автомагистраль с интенсивным движением транспортных средств. Предлагаемый метод для тематического исследования можно разделить на две фазы (модель ФЭУ, излучения, модель затрат и выгод), и блок-схема, показывающая шаги, представлена на рисунке 1.

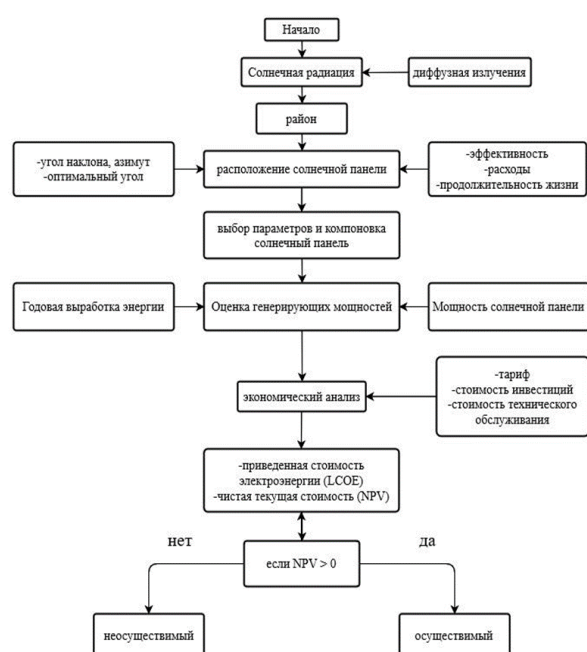


Рис. 1 Блок-схема предлагаемого метода, разработанного в исследовании.

Географические и метеорологические данные играют критически важную роль в планировании и реализации солнечных фотоэлектрических систем (ФЭУ) [5]. Конкретно для Крыма эти данные особенно важны, учитывая уникальные географические и климатические условия региона.

Крымский полуостров, расположенный в Черном море, обладает значительным потенциалом для использования солнечной энергии. Географические координаты Крыма находятся между 44°N и 46°N широтами, что делает его идеальным местом для установки ФЭУ из-за умеренной угловой высоты солнца в течение большей части года [4].

Анализ метеорологических данных для

Крыма являются ключевыми факторами для эффективного применения ФЭУ. Данные, такие как уровень солнечной радиации, количество солнечных дней в году, температура воздуха и ветер, важны для определения потенциальной эффективности ФЭУ [5]. На основании анализа метеорологических данных за последние годы, Крым демонстрирует впечатляющий уровень солнечной радиации, достигающий в среднем 1800 кВтч/м² в год. Также отмечается, что Крым имеет более 250 солнечных дней в году, что создает уникальные условия для эффективного использования солнечной энергии [4-7].

На рисунке 2 показаны данные о среднемесячной солнечной радиации, температуре окружающей среды и индексе ясности в Крыму. Можно заметить, что среднемесячная солнечная радиация колеблется от 44 до 205 кВтч/м²/месяц.



Рис. 2. Солнечное излучение.

Прямое солнечное излучение — это свет, который приходит от Солнца и достигает поверхности земли в прямом направлении без значительных изменений. Когда небо ясное и безоблачное, прямое солнечное излучение составляет основную часть солнечной энергии, которая достигает поверхности земли. Оно имеет высокую интенсивность и носит прямую направленность [8]. Диффузное солнечное излучение — это свет, который рассеивается и рассеивается в атмосфере и приходит к поверхности Земли из разных направлений. Диффузное излучение образуется благодаря рассеянию света в атмосферных частицах, а также отражению света от облаков и других поверхностей. Диффузное излучение имеет более равномерную интенсивность по сравнению с прямым излучением и способствует освещению окружающей среды [8, 9]. На рисунке 3 показаны типы солнечной радиации Крыма в июле. В таблице 1 приведены результаты прямого рассеянного излучения под углом 35°С

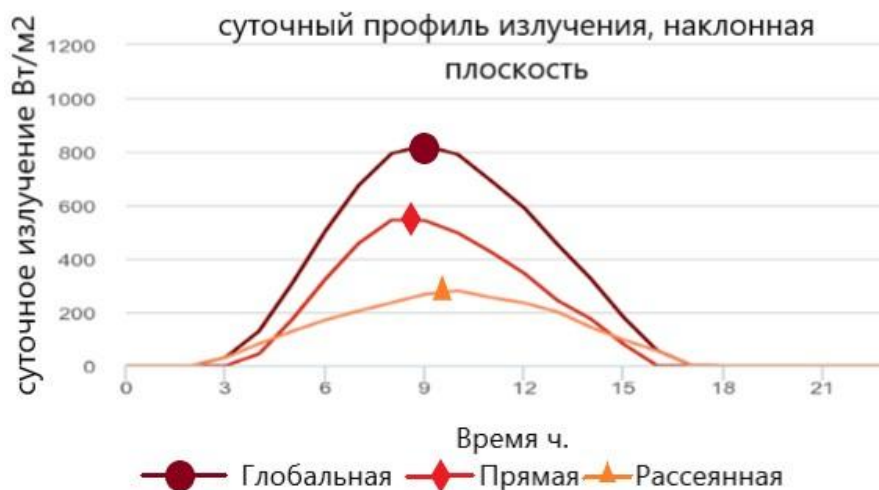


Рис. 3. Солнечная радиация для Крыма в июле

Таблица 1. Солнечная радиация в Крыму.

	Солнечное излучение при 35° [кВтч/м²] /день	Солнечное излучение при 35° [кВтч/м²] /месяц	диффузное излучение [кВтч/м²] /день	Среднемесячная температура	Среднее диффузное отношение к глобальному	Дни
Январь	2.15	66.5	1.2	0.3	0.57	31
февраль	3.05	85.3	1.67	1.1	0.55	28
Март	5.05	156.6	2.17	6	0.43	31
Апрель	6.94	208.3	2.3	7.7	0.33	30
Май	5.53	171.5	2.6	12.8	0.47	31
Июнь	6.08	182.5	2.4	19.2	0.39	30
Июль	6.49	201.1	2.33	21.3	0.36	31
Август	6.98	209.3	2.3	20.6	0.33	30
сентябрь	6.08	188.4	2.07	18.3	0.34	31
Октябрь	4.46	133.9	1.96	14.2	0.44	30
Ноябрь	2.42	74.9	1.38	4.7	0.57	31
Декабрь	2.03	60.8	1.3	3	0.64	30

Солнечное излучение от поверхности под углом 35° было получено для каждого места из фотогальванической географической информационной системы (PVGIS). В расчетах используется эффективность 20%, и следующее уравнение (1) используется для расчета общей выработки энергии без затенения эффект [10]:

$$G = A \cdot G_{35^\circ} \cdot \eta \cdot (1 - \vartheta) \quad (1)$$

где A (м²) — площадь поверхности солнечного элемента;

G_{35° — суммарное солнечное излучение с углом 32° (кВтч/м²);

η — КПД (%);

ϑ — связь между диффузной радиацией и солнечной радиацией.

Поскольку определенные части установки полностью затенены в течение части года, необходимо рассчитать потери в этих случаях. Пониженная генерация в затенении создается

прямым солнечным излучением. Поэтому необходимо рассчитать соотношение между прямым и рассеянным излучением. Распределение между прямой и рассеянной солнечной радиацией и ее значения для исследуемого участка, и соответствующего месяца взяты из базы данных PVGIS. Диффузное излучение рассчитывается следующим образом [10]:

$$G_{DIF} = G_{GHI} \cdot \vartheta \quad (2)$$

где G_{DIF} — диффузное излучение (кВтч/м²);

G_{GHI} — глобальное горизонтальное излучение (кВтч/м²).

Отношение суммарного излучения на поверхности под углом 32° рассчитывается как [10]:

$$G_{DFI(35^\circ)} = 0,5 \cdot (1 + \cos \cos 35^\circ) \cdot G_{DFI} \quad (3)$$

Поскольку общее излучение на поверхности является суммой прямого и диффузного излучения, чтобы рассчитать прямое излучение на поверхности с углом 35°, вычтите DFI из GHI:

$$G_{DNI(35^\circ)} = G_{35^\circ} - G_{DFI(35^\circ)} \quad (4)$$

В заключение географические и метеорологические данные Крыма указывают на большой потенциал использования ФЭУ в регионе. Эффективное использование этих данных в планировании и реализации солнечных проектов может привести к значительным экономическим и экологическим преимуществам для региона.

Параметры и характеристики выбранного модуля солнечных батарей

В процессе исследования был выбран монокристаллический модуль GPNE-S144/FNH с мощностью 450 Вт для применения в расчетах. Основные параметры и характеристики модуля приведены ниже:

Выбор этого модуля был обоснован его высоким КПД и мощностью. Температурное влияние было учтено в расчетах, а температурный коэффициент мощности составляет -0,37%/°C. В результате производительность модуля будет снижаться при повышении температуры выше номинальной рабочей температуры 42 ± 2 °C.

Этот монокристаллический модуль также характеризуется длительным сроком службы (25 лет), что делает его экономически привлекательным для инвесторов, стремящихся минимизировать затраты на замену оборудования на протяжении всего срока эксплуатации системы ФЭУ.

Таблица 2. Характеристики модуля GPNE-S144/FNH [11].

Парметр	Значение
Тип	Монокристаллический
Мощность	450 Вт
Коэффициент снижения	80%
Срок службы	25 лет
Температурный Коэффициент мощности	-0,37%/°C
Номинальная рабочая температура	42±2°C
КПД панели	20,4% при стандартных условиях испытаний

Интегрированная солнечной панели в защитных экранах

Интеграция солнечных панелей в защитные экраны является одним из возможных способов использования солнечной энергии для получения дополнительной выгоды. Эта концепция предполагает внедрение фотоэлектрических модулей непосредственно в материалы или структуры защитных экранов, чтобы они могли генерировать электричество из солнечного излучения.

Интегрированные солнечные панели в защитных экранах могут иметь несколько преимуществ [1, 11]:

- Генерация электричества. Солнечные батареи могут преобразовывать солнечную энергию в электричество, которое можно использовать для питания различных устройств или систем, например, освещение или зарядка устройств.
- Оптимизация использования пространства. Защитные экраны уже занимают пространство и имеют доступ к солнечному свету, поэтому интеграция солнечных панелей позволяет использовать эту поверхность для дополнительной функции, не требуя дополнительных пространственных ресурсов.
- Устойчивость и экологичности. Использование солнечной энергии снижает зависимость от традиционных источников энергии и помогает сократить выбросы парниковых газов, способствуя более экологичному и устойчивому образу жизни.
- Защита и безопасность. Интеграция солнечных панелей в защитные экраны может обеспечить дополнительную защиту от нежелательных элементов, например, повреждений или грозových разрядов, благодаря

прочности и электрическим характеристикам панелей.

Наиболее распространенная модель имеет простую конструкцию, в которой солнечные элементы устанавливаются на существующем защитном экране и где солнечные элементы интегрированы в звуковой барьер (см. рисунок 4).

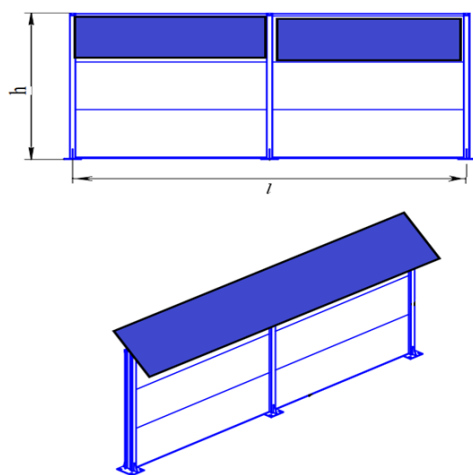


Рис. 4. Фотоэлектрическая батарея, интегрированная в защитные экраны.

Производство электроэнергии без теневого эффекта

Для оптимальной организации и эффективного применения солнечных панелей на защитных экранах автомагистрали "Таврида", был разработан детальный расчет. Этот расчет был создан с учетом шести этапов, в зависимости от угла азимута и угла наклона панелей. Разработанный план учитывает повороты трассы и изменение угла азимута, что позволяет максимизировать использование солнечной энергии в разных сегментах трассы в течение дня.

Рисунок 4 визуализирует расположение солнечных панелей на разных участках трассы "Таврида" с учетом этих данных.

Результаты показали, что при угле наклона в 35 градусов суммарная выработка энергии на всей протяженности автодороги (250,75 км) составила 47000 МВт*ч в год. Однако при угле наклона в 90 градусов выработка энергии значительно снизилась, достигнув 31000 МВт*ч в год. Вследствие изменения угла наклона с 35 до 90 градусов произошли потери более 33% выработанной энергии (см. рисунок 5).

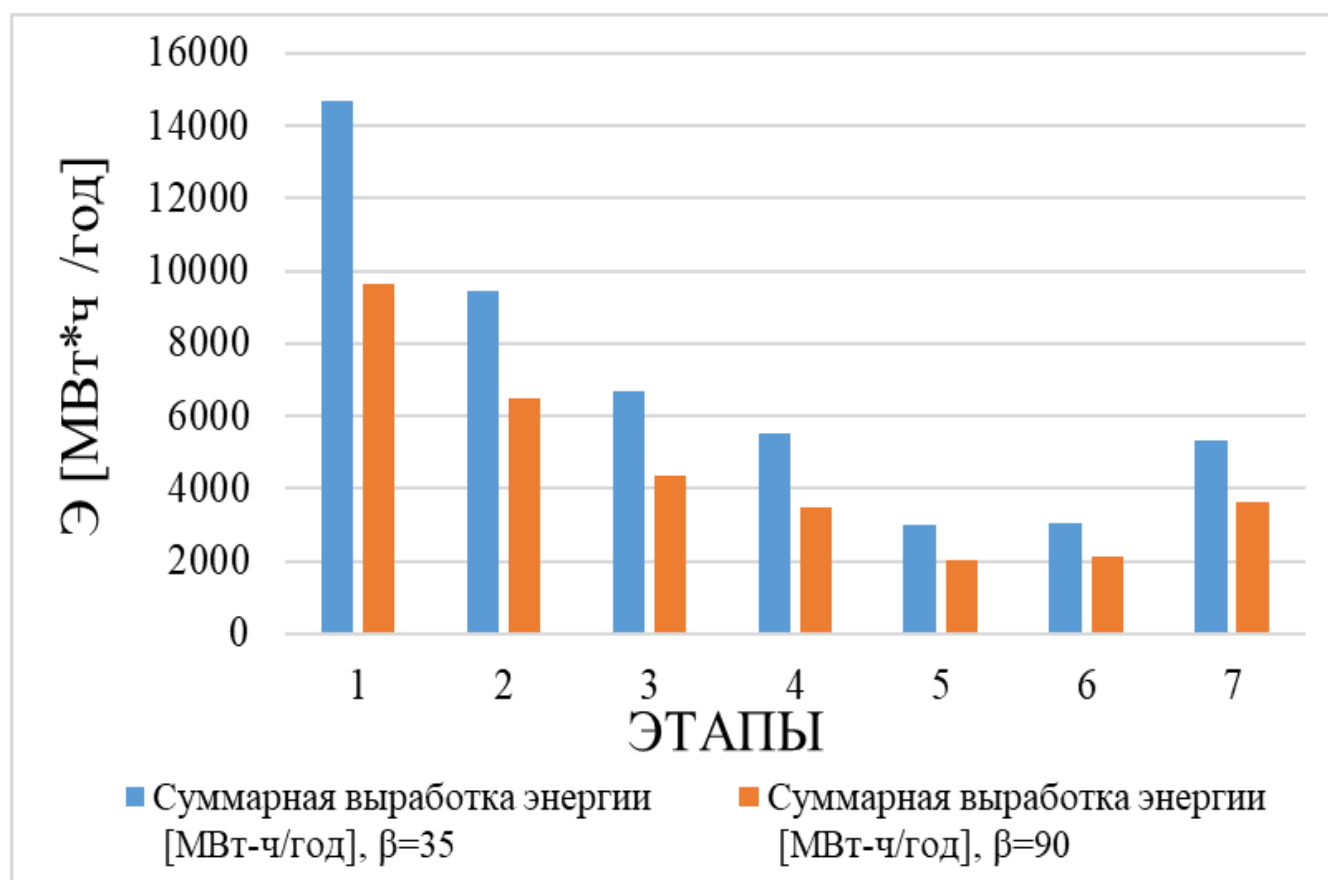


Рис. 5 Распределение общей выработки энергии.

Таблица 3. Энергия, вырабатываемая фотоэлектрической системой.

Месяца	выработка энергии (Э) [МВт-ч]						
	1 ЭТАП $\alpha=-10^\circ$	2 ЭТАП $\alpha=0^\circ$	3 ЭТАП $\alpha=0^\circ$	4 ЭТАП $\alpha=0^\circ$	5 ЭТАП		6 ЭТАП $\alpha=-30^\circ$
	76 км	50 км	35 км	29 км	$\alpha=+40^\circ$ км	$\alpha=-40^\circ$ км	29 км
Январь	506.8	380.7	270.9	223.6	114.2	116.8	211.1
февраль	764.6	478.07	356.3	294.1	155.7	154.4	281.5
Март	1206.6	743.8	528.9	436.6	238.6	236	412.4
Апрель	1515.5	955.4	671.9	554.6	305.7	312.2	535.8
Май	1633.3	1048.6	712	587.7	331.1	340.2	581.5
Июнь	1675.5	1068.7	736.1	607.6	346.1	357.2	595.6
Июль	1732.4	1106.8	763.3	630	354.7	369.7	634
Август	1775.1	1153.2	792.3	653.9	362.3	371.8	630.3
сентябрь	1495.7	941.2	665.8	549.5	295.9	303	523.5
Октябрь	1128.5	718.4	528.6	436.3	228.8	230.6	413.1
Ноябрь	726.8	469.7	366.7	302.7	156.1	153.9	279.5
Декабрь	541.1	361.1	282.5	233.2	117.8	118.4	212.9
Суммарная выработка энергии [МВт-ч/год], $\beta=35$	14702.04	9425.32	6675.34	5509.807	3006.96	3064.2	5311.235
Общее выработка энергии [МВт-ч/год]					47694.92		
Суммарная выработка энергии [МВт-ч/год], $\beta=90$	9662.4509	6469.77	4374.88	3472.129	2019.51	2112.3	3652.187
Общее выработка энергии [МВт-ч/год]					31763.24		

Оценки экономической эффективности проекта

Для оценки рентабельности и осуществимости инвестиций существуют различные финансовые инструменты, включая NPV (чистый дисконтированный доход) и LCOE (нормированную стоимость электроэнергии). NPV представляет собой метод оценки рентабельности инвестиций, который учитывает дисконтированный поток денежных средств в течение инвестиционного периода. Поэтому будущие денежные потоки учи-

тываются с учетом стоимости капитала и дисконтированы до настоящего времени. Если NPV положительный, то проект приносит положительную стоимость и рентабелен. В таком случае рекомендуется рассмотреть реализацию проекта. Если NPV отрицательный, это указывает на нерентабельность проекта, и его реализация может быть неоправданной. LCOE, с другой стороны, является инструментом для оценки стоимости производства единицы электроэнергии из определенного источника. Он учитывает инвестиционные затраты, операционные расходы, срок эксплуатации и ожидаемую генерацию

электроэнергии проекта. LCOE выражается в стоимости производства электроэнергии за единицу, обычно в долларах за киловатт-час. LCOE позволяет сравнить стоимость производства электроэнергии от различных источников и оценить их конкурентоспособность на рынке энергетики. Использование NPV и LCOE при оценке инвестиций в солнечные энергетические проекты позволяет принять информированное решение о рентабельности и осуществимости проекта, учитывая финансовые факторы и временную стоимость денег. По формуле (4.18) можно рассчитать NPV:

$$NPV_t = \frac{C_t}{(1+r)^t} - \text{Инв} \quad (5)$$

где C_t — представляет чистый денежный поток на момент времени t , включая доходы и расходы от проекта;

Инв. — инвестиционный капитал;

r — является дисконтной ставкой, которая отражает стоимость капитала или требуемую норму доходности инвестора;

t — представляет момент времени, обычно измеряется в годах.

Чистый денежный поток (C_t) рассчитывается путем вычитания операционных расходов, налогов и других затрат от генерируемых доходов на момент времени t . Формула для расчета чистого денежного потока может быть представлена следующим образом:

$$C_t = \text{Доход}_t - \text{Расход}_t, \quad (6)$$

где Доход_t — приток денежных средств от продажи произведенной электроэнергии (\$);

Расход_t — расходы (\$).

$$\text{Доход}_t = \Phi_{\text{ФЭУ}} \cdot E_{\text{ц}} \quad (7)$$

где $\Phi_{\text{ФЭУ}}$ — представляет выходную мощность фотоэлектрических модулей на момент времени t . Это может быть выражено в киловаттах (кВт) или других единицах мощности;

$E_{\text{ц}}$ — представляет цену электроэнергии на

рынке на момент времени t . Это может быть выражено в долларах за киловатт-час (\$/кВтч).

Выходная мощность фотоэлектрических модулей ($\Phi_{\text{ФЭУ}}$) может быть рассчитана с использованием следующей формулы [127]:

$$\Phi_{\text{ФЭУ}} = \Phi_{\text{н}} \cdot f_d \cdot (1 + K_T \cdot (T_{\text{ФЭУ}} - T_{\text{с}})) \cdot \frac{G}{G_{\text{с}}} \quad (8)$$

где $\Phi_{\text{н}}$ — представляет номинальную мощность фотоэлектрического модуля при стандартных условиях испытаний (в ваттах);

f_d — представляет коэффициент снижения номинальных характеристик (%), который учитывает влияние температуры на работу модуля;

$T_{\text{ФЭУ}}$ — представляет температуру фотоэлектрических модулей (в градусах Цельсия);

$T_{\text{с}}$ — представляет температуру фотоэлектрических модулей при стандартных условиях испытаний (25 °C);

K_T — представляет температурный коэффициент фотоэлектрических модулей (%/°C), который указывает, как изменение температуры воздуха влияет на работу модуля;

G — представляет суммарную солнечную радиацию на поверхности фотоэлектрических модулей (в киловаттах на квадратный метр);

$G_{\text{с}}$ — представляет солнечную радиацию при стандартных условиях испытаний (1 кВт/м²).

Эта формула учитывает влияние температуры фотоэлектрических модулей и солнечной радиации на выходную мощность модулей. Температурный коэффициент (K_T) учитывает изменение мощности модулей в зависимости от изменения температуры, а коэффициент снижения (f_d) учитывает снижение номинальных характеристик модуля при отклонении от стандартных условий испытаний.

$$L_{\text{COE}} = \frac{\text{Сумма всех затрат на проект за период эксплуатации \$}}{\text{Суммарная генерируемая энергия за период эксплуатации кВтч}} = \frac{\sum L_{\$t}}{\sum \Phi_{\text{ФЭУ}t}} \quad (9)$$

и другие расходы, связанные с проектом.

Формула LCOE учитывает все затраты на проект за период эксплуатации и делит их на общую сумму электроэнергии, сгенерированную проектом за тот же период времени. Результатом является стоимость производства одного кВтч электроэнергии.

Затраты на проект могут включать инвестиционные затраты, операционные расходы, обслуживание и техническую поддержку, амортизацию, страхование, налоги, обслуживание долга

Суммарная генерируемая энергия за период эксплуатации определяется как общий объем электроэнергии, произведенной или ожидаемой к производству проектом за указанный период времени.

После вычета основных инвестиций из чистой текущей стоимости проекта, получается стоимость капитала. NPV рассчитывается путем

суммирования дисконтированных денежных потоков и остаточной стоимости.

Дисконтирование платежных излишков осуществляется путем применения дисконтирования денежных потоков, что отражает временную стоимость денег. Следовательно, денежные потоки уменьшаются с течением времени, так как деньги, полученные в будущем, имеют меньшую стоимость по сравнению с деньгами, полученными сегодня. Дисконтирование выполняется с использованием ставки, которая отражает требуемую норму доходности инвестиций.

Остаточная стоимость представляет собой оценку стоимости активов или проекта после окончания его жизненного цикла или инвестиционного периода. Она учитывает возможные доходы от продажи активов, оставшуюся их цену или рыночную стоимость.

NPV позволяет оценить прибыльность инвестиционного проекта, учитывая временную стоимость денег и величину денежных потоков. Если NPV имеет положительное значение, то проект потенциально приводит к прибыли. При отрицательном значении проект, скорее всего, нерентабелен и нецелесообразен для реализации.

Расчет текущей стоимости инвестиций является важным инструментом для оценки финансовой целесообразности инвестиционных проектов и принятия решений о их реализации.

Эти базовые значения представляют собой наиболее вероятные финансовые результаты (см. таблицу 4) [10].

Таблица 4. Значения, использованные для экономической оценки.

Установленная стоимость	600	\$/кВт
Стоимость эксплуатации и обслуживания O&M	13	кВт/год
Цена электроэнергии	0.067	\$/кВтч
Инвестиционная стоимость	850	кВт
Ставка дисконтирования	5	%

Соответствующий сценарий, представленный в таблице 4, рассматривается с помощью анализа приведенной стоимости и составляет диаграмму, описывающую изменение стоимости капитала за 25 лет. Результаты показаны на рисунке 6.

При рассмотрении ожидаемого срока

службы завода в 25 лет и затрат капитала в размере 38080000 долларов при расчетной процентной ставке 5%, период выплаты составляет 13 лет. Эффективность выработки энергии зависит от интенсивности излучения, температуры и затенения, что в свою очередь влияет на затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и стоимость электроэнергии.

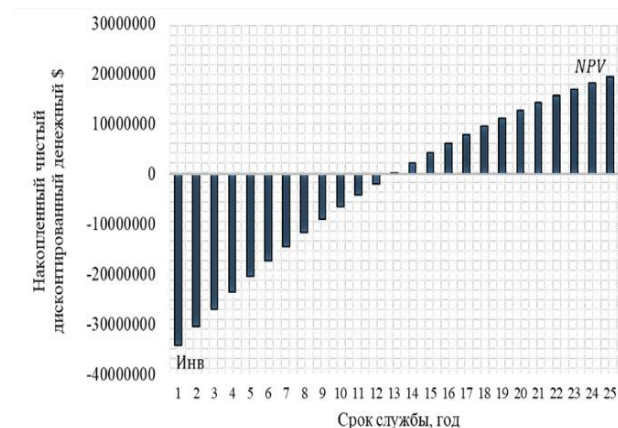


Рис. 6 Накопленный чистый дисконтированный денежный поток рассмотренной СФЭ.

Проведенный анализ показывает, что рассматриваемый проект солнечной энергетики (СФЭ) имеет положительное чистое текущее значение (NPV) через 25 лет, составляющее 19453781 долларов. Учитывая вышеуказанные показатели, срок окупаемости проекта составит 13 лет. Предполагается, что при реализации предложенной модели производства ожидается, что будет производить около 47,6 ГВтч энергии в год. Стоимость производства энергии (LCOE) оценивается в 0,044 доллара за киловатт-час.

Заключение

Солнечные системы используются для сбора энергии на дорогах, причем последние показывают большую эффективность. Интеграция фотоэлектрических систем на защитные экраны обеспечивает дополнительное производство энергии. На основе данных литературы, было проведено исследование автодороги Таврида в Крыму для оценки эффективности этих технологий, что может помочь в выборе оптимальных методов сбора энергии на автомагистралях.

Анализ показывает, что рассматриваемая СФЭ имеет положительный NPV и через 25 лет составляет 19453781.51 долларов. Учитывая вышеуказанные показатели, срок окупаемости данного проекта составит 13 лет. Если объект будет

построен по предложенной модели, ожидается, что он будет давать около 47694920 кВтч энергии в год. LCOE оценивается в 0.044 \$/кВтч.

Список литературы

1. Poe, C.; Plovnick, A.; Hodges, T.; Hastings, A.; Dresley, S. Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers. 2017. Available online: <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/32521>.
2. Кувшинов В. В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок для использования в энергетике Крыма / В. В. Кувшинов, Н. В. Морозова; Севастоп. гос. ун-т, Ин-т ядер. энергии и пром-сти. - Москв : Спутник+, 2017. - 174 с.
3. Kuvshinov, V. V. The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region / V. V. Kuvshinov, F. M. Al-Rufae // *Applied Solar Energy*. – 2019. – Vol. 55, No. 4. – P. 252-255.
4. Электронный ресурс: <https://rosavtodor.gov.ru/press-center/news/archive-news/460391>
5. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Plants / S. V. Vologdin, B. A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov [et al.] // *Applied Solar Energy*. – 2019. – Vol. 55, No. 4. – P. 229-234.
6. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies – Volume 1: Solar and Wind Energies*, Edited by Imene Yahyaoui, 2018 Elsevier, p 552.
7. John A. Duffie, William A. Beckman *Solar engineering of thermal processes* // 4th Edition, WILEY, 2013, p. 936.
8. PV panel datasheet, available online: <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/zvvl80uv8e4/GPNE-166mm-Half-Cell-Series-S144-M6H-435-460W.pdf>.
9. S. C. W. Krauter, *Solar Electric Power Generation*, Springer, New York, NY, USA, 2006, 27.
10. Сатюков А.Б. Расчёт эффективности применения альтернативного источника энергии в виде солнечных батарей на примере офисного здания в г. ОРЕНБУРГЕ/А.Б. Сатюков, А.Н. Баутин // *Аллея науки*, Т: 1, Номер: 3 (54), 2021, С. 149-153.
11. Michael Boxwell, *Solar electricity handbook*, green stream Publishing, 2021, p. 273.
12. 2017. - 174 p.
3. Kuvshinov, V. V. The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region / V. V. Kuvshinov, F. M. Al-Rufae // *Applied Solar Energy*. – 2019. – Vol. 55, No. 4. – P. 252-255.
4. Electronic resource: <https://rosavtodor.gov.ru/press-center/news/archive-news/460391>.
5. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Plants / S. V. Vologdin, B. A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov [et al.] // *Applied Solar Energy*. – 2019. – Vol. 55, No. 4. – P. 229-234.
6. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies – Volume 1: Solar and Wind Energies*, Edited by Imene Yahyaoui, 2018 Elsevier, p 552.
7. John A. Duffie, William A. Beckman *Solar engineering of thermal processes* // 4th Edition, WILEY, 2013, p. 936.
8. PV panel datasheet, available online: <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/zvvl80uv8e4/GPNE-166mm-Half-Cell-Series-S144-M6H-435-460W.pdf>.
9. S. C. W. Krauter, *Solar Electric Power Generation*, Springer, New York, NY, USA, 2006, 27.
10. Satjukov A.B. Calculation of the efficiency of using an alternative energy source in the form of solar panels using the example of an office building in ORENBURG/A.B. Satjukov, A.N. Bautin // *Alley of Science*, T: 1, Number: 3 (54), 2021, pp. 149-153.
11. Michael Boxwell, *Solar electricity handbook*, green stream Publishing, 2021, p. 273.

References

1. Poe, C.; Plovnick, A.; Hodges, T.; Hastings, A.; Dresley, S. Highway Renewable Energy: Photovoltaic Noise Barriers. 2017. Available online: <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/32521>.
2. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations for use in the energy sector of Crimea / V.V. Kuvshinov, N.V. Morozova; Sevastop. state University, Institute of Nuclei. energy and industry. - Moscow: Sputnik+,

УДК 620.92

Регулирование частоты в энергосистеме при помощи солнечных электростанций

Е.Г.Какушина¹, В.В. Гурьев², Б.А. Якимович³ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹little@mail.ru, ²Salsk161@rambler.ru, ³bayakimovich@mail.sevsu.ru,

Статья поступила 18.02.2025; после доработки 20.02.2025 г.

Аннотация

В данной статье рассматриваются возможность участия СЭС в общем первичном регулировании частоты. В статье приводятся результаты исследований, проведенных на солнечной электростанции (СЭС). В процессе исследований были проведены испытания СЭС регулирования частоты. В результате экспериментов подтверждена возможность участия СЭС в общем первичном регулировании частоты, что является важным техническим параметром, оказывающим влияние на работу энергосистемы. Также рассматривается вопрос возможности участия СЭС в НППЧ путем выделения резервов мощности.

Ключевые слова: увеличение вырабатываемой мощности, баланс мощности, экология, солнечные электростанции, энергия солнца, натурные испытания.

Frequency control in the power system using solar power plants

E.G. Kakushina¹, V.V. Guriev², B.A. Yakimovich³

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.

¹little@mail.ru, ²Salsk161@rambler.ru, ³bayakimovich@mail.sevsu.ru,

Received 18.02.2025 y.; received in final form 20.02.2025 y.

Abstract

This article discusses the possibilities of SP (solar power) plant participation in the general primary frequency control. The article presents the results of research conducted at a solar power plant (SP). In the course of the research, SP frequency control tests were carried out. As a result of experiments, the possibility of SP participation in the general primary frequency control has been confirmed, which is an important technical parameter affecting the operation of the power system. The issue of the possibility of SP participation in the NPRF by allocating capacity reserves is also being considered.

For citation: increase in power output, power balance, ecology, solar power plants, solar energy, field tests.

Введение

Регулирование частоты является неотъемлемой частью управления энергосистемой. В ЕЭС России системный оператор обеспечивает непрерывное регулирование электроэнергетического режима по частоте и перетокам активной мощности для целей поддержания частоты в допустимых пределах и поддержания перетоков активной мощности в контролируемых сечениях.

В большинстве своем частота в энергосистеме зависит от баланса вырабатываемой и потребляемой активной мощности. При нарушении баланса мощности частота в энергосистеме изменяется пропорционально. При снижении частоты в энергосистеме необходимо увеличить объем вырабатываемой активной мощности на электростанциях для достижения нормального значения частоты. На основании ГОСТ 32144-2013 частота должна находиться в пределах

50,0±0,2 Гц не менее 95 % времени суток, не выходя за предельно допустимые значения 50,0±0,4 Гц.

Регулирование частоты в энергосистеме обеспечивается в три этапа, которые связаны между собой:

- первичное регулирование частоты, которое обеспечивается за счет объединения усилий всех электростанций в энергосистеме, т.е. удержание отклонений частоты в допустимых пределах при любых нарушениях баланса активной мощности в энергосистеме. Данный тип регулирования отличается быстрым действием, он первым регулирует на любые колебания частоты;
- вторичное регулирование, обеспечивает восстановление нормального уровня частоты и перетоков активной мощности в энергосистеме за счет выделенных резервов активной мощности на электростанциях;
- третичное регулирование, под которым (в рамках регулирования частоты) понимается перераспределение резерва первичного или вторичного регулирования используемое при регулировании частоты.

В большинстве развитых стран мира для выработки электроэнергии все шире используются возобновляемые источники энергии, доля которых в ряде стран достигла свыше 20%. В связи с этим является актуальным исследование параметров качества и динамические характеристики электрических режимов работы СЭС, при параллельной работе с традиционной энергетической системой. Совместная работа СЭС с энергосистемой возможна только при соответствии качественных характеристик генерируемой энергии требованиям существующего электросетевого предприятия. [1]

Что касается объектов СЭС, то на данных электростанциях применяется система частотоведомого управления инверторами, которая обеспечивает заданную генерацию активной мощности при текущем значении частоты. При возникновении аварийных ситуаций в энергосистеме системой автоматического управления будут отключены все частотоведомые инверторы на СЭС.

Увеличение доли ВИЭ генерации в энергосистеме без корректного решения технических вопросов неизбежно будет приводить к повреждению оборудования и массовым нарушениям в энергосистеме. В связи с чем необходимо:

1. Осуществлять выбор площадок для строительства объектов ВИЭ производить с учетом

фактических возможностей распределительных сетей по их присоединению;

2. Определять допустимую мощность объектов ВИЭ в энергосистеме с учетом сетевых ограничений;

3. Разрабатывать технические требования к ВИЭ с учетом величины установленной мощности.

Существует точка зрения, что СЭС, которые отличает стохастическая выработка, дестабилизируют энергосистему, требуют усиленных мер по её защите и восстановлению. На сегодняшний день данную точку зрения можно назвать непрофессиональной. Системные операторы энергосистем не просто научились эффективно управлять системами с высокой долей переменных СЭС, но и получать преимущества от использования электроники, используемой на СЭС. [2]

В статье показано, что СЭС могут оказывать важнейшие системные услуги по обеспечению надежности системы, благодаря возможностям их инверторов.

Влияние СЭС на энергосистему при регулировании частоты

Влияние СЭС на энергосистему при регулировании частоты заключается в следующем:

- Отсутствие общей инерционности системы. Это связано с тем, что ни сама СЭС, ни силовой преобразователь не имеют инерции вращающихся масс в связи с отсутствием вращающихся частей;
- Сложности при участии в первичном и вторичном регулировании частоты из-за снижения резервов мощности и отсутствия инерционного отклика.

Для повышения динамической устойчивости энергосистемы и снижения негативного воздействия СЭС на энергосистему необходимо обеспечить адаптацию их автоматических систем управления к требованиям традиционной энергетики. [3]

Основной проблемой при регулировании частоты является быстрое отключение СЭС при отклонениях частоты за пределы диапазона 47,5 – 50,2 Гц за время 0,2 с. Резкое снижение частоты при отключении большого числа СЭС в случае кратковременного превышения частоты в энергосистеме 50,2 Гц. Для решения данной проблемы был изучен опыт, применяющийся в Германии. Так в Германии разработаны технические требования к генерирующему оборудованию СЭС, которые плановое снижение мощности

установки в диапазоне частоты в энергосистеме 50,2 – 51,5 Гц.

На сегодняшний день существует несколько способов адаптации работы СЭС в энергосистеме.

Одним из решений является синтетическая инерция. Её достигают путём перепрограммирования силовых преобразователей СЭС таким образом, чтобы они имитировали инерцию вращающихся масс. Это позволяет искусственно повысить инерцию энергосистемы, вследствие чего уменьшается скорость изменения частоты и повышается динамическая устойчивость. [4]

На практике существует несколько способов адаптации работы СЭС в общей энергосистеме при регулировании частоты:

1. Автоматическое снижение выдаваемой в электрическую сеть активной мощности при увеличении частоты. При увеличении частоты за верхнюю границу «мёртвой полосы» первичного регулирования через 10 секунд обеспечивается снижение активной мощности СЭС на величину требуемой первичной мощности.

2. Обеспечение следящего за частотой режима первичного регулирования. При увеличении отклонения частоты за пределами «мёртвой полосы» система регулирования должна изменять первичную мощность пропорционально текущему отклонению частоты, то есть иметь запас активной мощности для регулирования частоты.

3. Использование функции подхвата сети при снижении и повышении частоты в энергосистеме. Позволяет при изменении частоты в заданном диапазоне не отключать инвертор и продолжать выдавать электроэнергию в прилегающую сеть. Данная функция хорошо подходит при незначительных изменениях частоты. [5]

Методика исследования

В данной работе рассмотрена способность участия СЭС в общем первичном регулировании частоты в общей энергосистеме при помощи автоматического регулятора.

Процедура испытаний включает:

Имитацию скачкообразного изменения частоты на входе в систему регулирования или скачкообразного увеличения и уменьшения значения первичной мощности в соответствии с заданными параметрами и характеристиками, для проверки алгоритма функции изменения активной мощности в зависимости от частоты сети

Фиксацию результатов соответствующего изменения активной мощности и частоты генерирующего оборудования.

Успешными испытания признаются, если фактическое изменение активной мощности генерирующего оборудования соответствует расчётной величине требуемой первичной мощности и требуемой динамике изменения активной мощности генерирующего оборудования при его участии в ОПРЧ. Фиксация параметров испытания: АРМ СЭС, анализатор качества электроэнергии. Последовательность проведенных испытаний. [6]

Средства и порядок испытаний

В данной работе для исследования была выбрана площадка с установленной мощностью 2 МВт.

Площадка СЭС введена в эксплуатацию в 2011 году, состоит из 7476 модулей Suntech STP275-24/Vd (275 Вт) и двух инверторных станций PV BOX 1000 kVA. [7]

Моделирование работы площадки СЭС в ПК при воздействии колебаний частоты энергосистемы. Измерение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и снятие графиков нагрузки осуществлялось с помощью прибора регистратора-анализатора ПКЭ Chauvin Arnoux CA 8335+, анализатора качества Janitza UMG 605.

Схема установки для исследований приведена на рисунке 1.

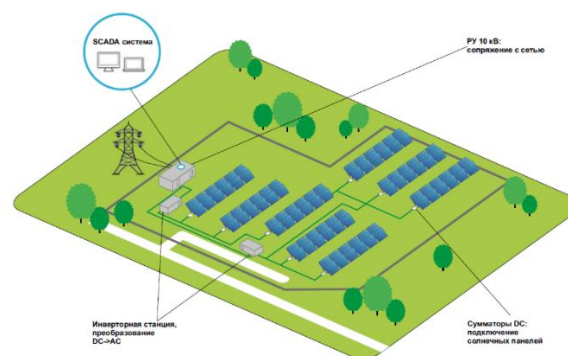


Рис.1 Схема установки для исследований

Для участия в ОПРЧ генерирующее оборудование СЭС должно соответствовать следующим требованиям:

- 1) "мертвая полоса" первичного регулирования в регуляторах активной мощности не должна превышать $50,0 \pm 0,1$ Гц;
- 2) статизм первичного регулирования должен находиться в пределах 4,0 - 5,0 %.

При участии в ОПРЧ генерирующее оборудование должно обеспечивать изменение выдаваемой активной мощности при изменении частоты на величину требуемой первичной мощности, определяемой по формуле:

$$P_m = \frac{100}{S\%} \cdot \frac{P_{ном}}{f_{ном}} \cdot K_d \cdot \Delta f_p, \text{ МВт} \quad (1)$$

где: $S\%$ - статизм первичного регулирования; $P_{ном}$, МВт - номинальная мощность генерирующего оборудования; K_d - коэффициент, учитывающий динамику выдачи первичной мощности, нормированную требованиями для разного типа генерирующего оборудования при скачкообразном характере изменения частоты.

Δf_p , Гц - расчетная величина отклонения частоты, определяемая следующим образом:

$\Delta f_p = 0$ при отклонениях частоты, не превышающих зону нечувствительности ($f_{нч}$, Гц) или "мертвую полосу" ($50,00 \pm f_{мп}$, Гц) первичного регулирования;

$\Delta f_p \neq 0$ при отклонениях частоты, превышающих зону нечувствительности ("мертвую полосу") первичного регулирования;

$\Delta f_p = f - (50,00 + f_{прч}(f_{мп}))$ - при повышенной частоте ($\Delta f_p > 0$);

$\Delta f_p = f - (50,00 - f_{прч}(f_{мп}))$ - при пониженной частоте ($\Delta f_p < 0$);

f - текущее значение частоты, Гц;

для СЭС $\Delta f_p = 0$ при снижении частоты, $\Delta f_p > 0$ при повышении частоты выше верхней границы "мертвой полосы" первичного регулирования ($50,1$ Гц). [8]

Полученные характеристики необходимы для испытаний энергосистемы при работе СЭС с целью оптимизации рабочих параметров генерирующего оборудования и обеспечения нормальных режимов работы энергосистемы. [9]

Результаты исследования

Испытание № 1. Проверка верхней границы «мертвой полосы». СЭС работает с мощностью $P_{исх}$ (зависит от уровня солнечной радиации). В испытательном устройстве задать значение частоты сети $50,1$ Гц (подается на вход анализатора качества Janitza UMG 605 системы контроля мощности PVcontrol). После запуска и по истечении времени более 10 с мощность СЭС не должна ограничиваться, так как установленное значение $f_0=50,1$ Гц является верхней границей

«мертвой зоны». Результаты полученных данных испытания № 1 приведены в табл. 1. и 1.1.

Выполнена успешная проверка верхней границы «мертвой полосы», так как после запуска и по истечении времени более 10 секунд мощность СЭС не ограничивалась.

Таблица 1. По данным с системы мониторинга непосредственно на выходе инвертора для опыта №1

№ опыта	Исходная мощность, $P_{исх}$	Мертвая полоса	Уставка имитационного сигнала частоты	Требуемая величина первичной мощности от $P_{исх}$		Фактическая мощность
	кВт	Гц	Гц	%	кВт	кВт
1	1012,10	50,1	50,1	0	0	1012,1
2	1012,10	50,1	50,11	-0,4	-2,04	1010,06
3	1012,10	50,1	50,6	-19,6	-99,96	912,14
4	1012,10	50,1	51,1	-20	-102	910,1
5	1012,10	50,1	51,3	-8	-40,8	971,3
6	1012,10	50,1	50,1	+48	+244,8	1012,1
7	1012,10	50,1	50,0	0	0	1012,1

Таблица 1.1 По данным с анализатора качества электрической энергии для опыта №1

№ опыта	Исходная мощность, $P_{исх}$	Мертвая полоса	Уставка имитационного сигнала частоты	Требуемая величина первичной мощности от $P_{исх}$		Фактическая мощность
	кВт	Гц	Гц	%	кВт	кВт
1	999,24	50,1	50,1	0	0	999,24
2	999,24	50,1	50,11	-0,4	-2,04	997,2
3	999,24	50,1	50,6	-19,6	-99,96	899,28
4	999,24	50,1	51,1	-20	-102	897,24
5	999,24	50,1	51,3	-8	-40,8	958,44
6	999,24	50,1	50,1	+48	+244,8	999,24
7	999,24	50,1	50,0	0	0	999,24

Испытание № 2. Испытание функции ограничения активной мощности до минимально допустимой 68 кВт с уставкой $P(f)2$, A Frequency= $47,5$ Гц.

Подключить ноутбук к инвертору XC680. Посредством программы параметрирования инвертора RenConnect установить связь с инвертором и изменить параметры в соответствии с рис. 2 и табл. 2.

Инвертор после запуска и по истечении выдержки времени 8 секунд должен ограничить активную мощность до минимально допустимой – 68 кВт ($Min\ Power\ Limit=10\%$ от $P_{ном}=680$ кВт), так как выставляемая уставка $P(f)2$, $F\ Lock_in=P(f)2$, $A\ Frequency=47,5$ Гц существенно ниже частоты сети $50,00 \pm 0,05$ Гц.

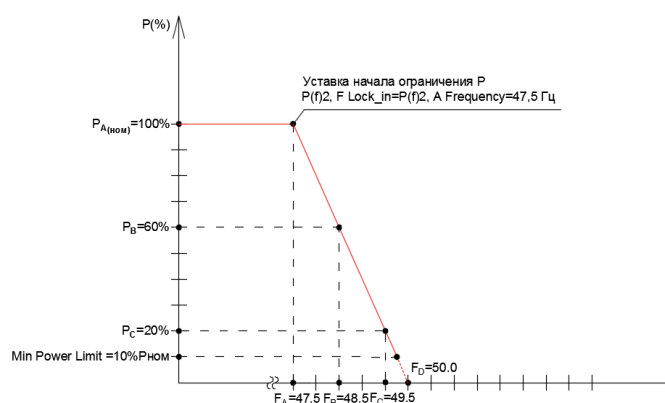


Рис. 2. Характеристика ограничения мощности для опыта №2

Таблица 2. Параметры функции ограничения мощности для опыта №2

Название параметра	Значение параметра	Единица измерения	Шаг	Min	Max
Функция P(f) Control Function					
P(f)2, A Frequency (точка A на характеристике регулирования, частота)	47,5	Гц	0,01	40	70
P(f)2, B Frequency (точка B на характеристике регулирования, частота)	48,5	Гц	0,01	40	70
P(f)2, C Frequency (точка C на характеристике регулирования, частота)	49,5	Гц	0,01	40	70
P(f)2, D Frequency (точка D на характеристике регулирования, частота)	50,00	Гц	0,01	40	70
P(f)2, F Lock_in (уставка начала ограничения мощности)	47,50	Гц	0,01	40	70
P(f)2, F Lock_out (уставка, при которой происходит восстановление мощности до уровня Pном)	50,10	Гц	0,01	40	70

P(f)2, F Lock_in Delay (время, через которое происходит снижение мощности)	8000	мс	1	0	10000
P(f)2, F Lock_out Delay (время, за которое происходит восстановление мощности до уровня Pном)	10000	мс	1	0	10000

Испытание № 3. Испытание функции ограничения активной мощности до 60% с уставкой P(f)2, A Frequency=49,0 Гц.

Подключить ноутбук к инвертору XC680. Посредством программы параметрирования инвертора RenConnect установить связь с инвертором и изменить параметры в соответствии с рис.3 и табл.3. Инвертор после запуска и по истечении выдержки времени 8 секунд должен ограничить активную мощность до 60%, так как выставленная уставка P(f)2, F Lock_in=P(f)2, A Frequency=49,0 Гц существенно ниже частоты сети 50,00±0,05 Гц.

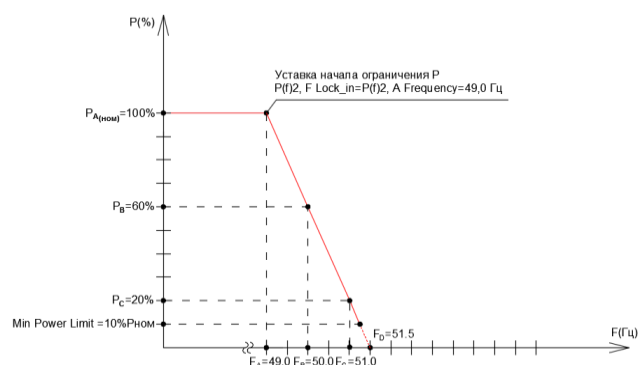


Рис. 3. Характеристика ограничения мощности для опыта №3

Таблица 3. Параметры функции ограничения мощности для опыта №3

Название параметра	Значение параметра	Единица измерения	Шаг	Min	Max
Функция P(f) Control Function					
P(f)2, A Frequency (точка A на характеристике регулирования, частота)	49,0	Гц	0,01	40	70
P(f)2, B Frequency	50,0	Гц	0,01	40	70

(точка В на характеристике регулирования, частота)					
P(f)2, C Frequency (точка С на характеристике регулирования, частота)	51,0	Гц	0,01	40	70
P(f)2, D Frequency (точка D на характеристике регулирования, частота)	51,5	Гц	0,01	40	70
P(f)2, F Lock_in (уставка начала ограничения мощности)	49,0	Гц	0,01	40	70
P(f)2, F Lock_out (уставка, при которой происходит восстановление мощности до уровня Pном)	50,10	Гц	0,01	40	70
P(f)2, F Lock_in Delay (время, через которое происходит снижение мощности)	8000	мс	1	0	1000 0
P(f)2, F Lock_out Delay (время, за которое происходит восстановление мощности до уровня Pном)	10000	мс	1	0	1000 0

Заключение

Результаты испытаний подтвердили готовность генерирующего оборудования СЭС к участию в ОНРЧ. Привлечение солнечных электростанций к участию в ОНРЧ обеспечивает их полноценную интеграцию в Единую энергосистему и повышает надежность работы ЕЭС России при отклонениях частоты. Результаты проведенных успешных испытаний могут быть использованы при совершенствовании нормативно-технической базы определяющей требования к порядку организации и проведения испытаний генерирующего оборудованию СЭС для участия в ОНРЧ. [10]

Также следует отметить, что дальнейшее развитие ВИЭ на территории Российской Федерации потребует скорейшего решения новых задач, таких как: – исследование влияния работы

ВИЭ на энергосистему при значительном увеличении их доли в структуре генерирующих мощностей; – корректировка подходов по стимулированию деятельности ВИЭ в пользу повышения эффективности работы и оценки экономических последствий их функционирования; – продолжение работы в части законодательной поддержки ВИЭ малой и большой мощности с учетом задачи их объединения с «умными сетями», включающими системы накопления электрической энергии

Массовая интеграция ВИЭ большой единичной мощности в энергосистемы приводит к возникновению проблемных вопросов, которые следует решать последовательно и комплексно не только технически, но и готовить нормативную документацию.

Список литературы

1. Гурьев В. В. Перспективы увеличения выработки солнечных электростанций энергосистемы Республики Крым и города Севастополя/ Кувшинов В. В., Б. А. Якимович // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 116-123
2. Илюшин П.В. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией/ Куликов А.Л. Нижний Новгород, 2019.
3. Чернышов А.С. Изучение оптимизации режимов работы солнечных электростанций в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя с возможностью регулирования частоты/ Гурьев В.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Олейников А.М. // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 2. С. 138-147.
4. Гурьев В.В., Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы/ 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.
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. Кузнецов П. Н., Гибридные ветро-солнечные энергетические установки/ Чебоксаров В. В., Якимович Б. А // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. - 2020. - Т. 23, № 1. - С. 45-53. -. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-45-53 .
7. Кондратьев С. В. Крым: снова с Россией. Аналитический отчет // С. В. Кондратьев, С. В. Агибалов. - Институт Энергетики и Финансов, 2014. - 38 с.
8. Приказ Минэнерго России от 09.01.2019 N 2 "Об

утверждении требований к участию генерирующего оборудования в общем первичном регулировании частоты и внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. N 229".

9. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции/ Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и др. // Appl. Sol. Энергия. - 2019. - Т 55, № 4. - С. 229-234. EDN: ТТΟΥКО
10. Кувшинов В.В. Оптимизации режимов распределения нагрузки в совмещённой системе с возобновляемыми источниками энергии/ Какушина Е.Г., Тиман Д.И., Жиганов И.Г., Гхашим М. // Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 1. С. 84-89.

References

1. Guryev V. V. Prospects for increasing the production of solar power plants in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol/ Kuvshinov V. V., B. A. Yakimovich // Bulletin of IzhSTU named after M. T. Kalashnikov. 2020. Vol. 23, No. 2. pp. 116-123
2. Ilyushin P.V. Automation of control of normal and emergency modes of energy districts with distributed generation/ Kulikov A.L. Nizhny Novgorod, 2019.
3. Chernyshov A.S. The study of optimizing the operating modes of solar power plants in the energy system of the Republic of Crimea and Sevastopol with the possibility of frequency control/ Guryev V.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Oleinikov A.M. // Intelligent systems in production. 2022. Vol. 20. No. 2. pp. 138-147.
4. Guryev V.V., Investigation of the established regimes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system/ Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Al Ba-irmani A.G., Kakushina E.G. // Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2022. Vol. 25. No. 1. pp. 108-117.
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. Kuznetsov P. N., Hybrid wind and solar power plants/ Cheboksary V. V., Yakimovich B. A. // Bulletin of IzhSTU named after M. T. Kalashnikov. - 2020. - Vol. 23, No. 1. - pp. 45-53. -. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-45-53.
7. Kondratiev S. V. Crimea: back with Russia. Analytical report // S. V. Kondratiev, S. V. Agibalov. - Institute of Energy and Finance, 2014. 38 p.
8. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 2 dated 09.01.2019 "On Approval of the Requirements for the Participation of Generating Equipment in the General Primary Frequency Control and Amendments to the Rules of Technical Operation of Electrical Stations and Networks of the Russian Federation, approved by Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 229 dated June 19, 2003".
9. S.V. Vologdin. Analysis of various scenarios of energy supply in Crimea, taking into account the operating modes of a solar power plant/ Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L. M., Kakushina, E. G. et al. // Appl. Sol. Energy. - 2019. - Т 55, No. 4. - PP. 229-234. EDN: ТТΟΥКО
10. Kuvshinov V.V. Optimization of load distribution modes in a combined system with renewable energy sources/ Kakushina E.G., Timan D.I., Zhiganov I.G., Ghashim M. // Power plants and technologies. 2022. Vol. 8. No. 1. pp. 84-89.

УДК 620.92., 621.311.25

Установка преобразования энергии морских волн для потребителей Крымского региона

Муртазаев Э.Р.¹, Якимович Б.А.², Нагирняк А.А.², Шаповаленко В.В.²,
Коломийченко В.П.³

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»,

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия,

³Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П.С. Нахимова, г. Севастополь,
299028, Россия

bayakimovich@mail.sevsu.ru, V.P.Kolomiychenko@mail.ru

Статья поступила 10.02.2025 г.; после доработки 12.02.2025 г.

Аннотация

В Крымском регионе волновые установки не используются, что тормозит не только её развитие, но и теоретические разработки. Авторами были предложены экспериментальные и теоретические исследования использования морского потенциала для преобразования энергии волновых колебаний в электрическую энергию в районе Чёрного и Азовского морей для нужд потребителей Республики Крым и города Севастополя. Данное исследование проводилось на базе энергетической установки, представляющей собой герметичный буй поплавкового типа.

Ключевые слова: герметичный буй поплавкового типа, энергия волновых колебаний морских волн,

Sea wave energy conversion Installation for consumers in the Crimean region

Murtazaev E.R.¹, Yakimovich A.B.², Nagirnyak A.A.², Shapovalenko V.V.²,
Kolomiychenko V.P.³

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Crimean Federal University
named after V.I. Vernadsky"

²Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia,

³Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov Pavel Dybenko str., 1a, Sevastopol,
299028, Russia

bayakimovich@mail.sevsu.ru, V.P.Kolomiychenko@mail.ru

Received 10.02.2025 y.; received in final form 12.02.2025 y

Abstract

Wave installations are not used in the Crimean region, which slows down not only their development, but also theoretical developments. The authors proposed experimental and theoretical studies of the use of marine potential to convert wave energy into electrical energy in the area of the Black and Azov Seas for the needs of consumers of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol. This study was conducted on the basis of a power plant, which is a sealed float-type buoy.

Key words: sealed float-type buoy, the energy of wave vibrations of sea waves,

Введение

Волновая энергетика в Крымском регионе практически не используется, что не позволяет

ей конкурировать с такими альтернативными источниками энергии как ветровая и солнечная, которые достаточно широко представлены на крымском полуострове. «Зеленая» энергетика

Крыма должна учитывать значительные возможности для использования возобновляемых источников энергии. Это предполагает стимулирование производства энергии на основе ВИЭ и поддержку производителей необходимого оборудования. Такое направление развития не противоречит, а только укрепляет современные позиции полуострова в энергетике, обеспечивает энергетическую безопасность и перспективы дальнейшего социально-экономического развития. В долгосрочной перспективе использование объектов ВИЭ в Крыму имеет высокий потенциал, и в этой связи, возобновляемая энергетика может занять достойное место в энергобалансе Крыма. Такие объекты будут особо целесообразны в курортной зоне полуострова, ввиду их экологической безопасности. Дальнейшее наращивание использования потенциала возобновляемых источников энергии представляется уместным и с учетом курортно-рекреационной специфики Крыма [1]. До настоящего времени устройства, создаваемые на базе известных технических решений, не позволяли достаточно адекватно решить задачу устойчивого преобразования волновой энергии. Эти устройства предназначены для работы в условиях регулярного волнения, так как эффективность их действия не может быть высокой в силу довольно сложного вероятностного характера реального процесса волнообразования. По потребности волновые электростанции (ВлЭС) можно разделить на одно модульные и многомодульные. Одномодульные ВлЭС используются для обеспечения электроэнергией морских судов, сигнальных маяков, устройств мониторинга окружающей среды, метеостанций, станций связи, средств личного жизнеобеспечения и др. Многомодульные устройства ВлЭС могут использоваться для обеспечения электроэнергией прибрежных и островных поселений и отдельных зданий; для энергоснабжения объектов сельскохозяйственного назначения морского и прибрежного расположения.

Постановка цели и задач научного исследования

Одной из актуальных задач современной гидроэнергетики является использование энергии морских волн с целью преобразования энергии волны в электрическую энергию. Для решения этой задачи необходимо иметь технические параметры волны. Так как волны не являются систематическими и изменяющимися по заранее заданным величинам, необходимо проанализировать возмущающие воздействия, создающие

волны. Волны бывают продольными и поперечными. В продольных волнах частицы воды колеблются вдоль направления распределения волны. Перпендикулярные колебания частиц воды к направлению распространения волны создают поперечные волны. Волновые движения, включающие продольные и поперечные колебания, возникающие на поверхности воды, гравитационные движения по окружности, убывающие с глубиной. Целью исследования является анализ определения параметров морских волн, с целью использования преобразователей энергии в условиях побережья Республики Крым.

Характеристики энергетического потенциала волн Черноморско-азовского региона

Черное море – внутреннее, приливы и отливы настолько малы, что почти незаметны. Величина приливо-отливных колебаний уровня на Черном море – от 3 до 10 см. В открытом море зимние волны достигают высоты 6 – 7 м. Черноморские ударные волны достигают метровой высоты. Колебания уровня для Черного моря больше всего встречаются сгонно-нагонные, их образование зависит от определенных атмосферных процессов в пределах естественного синоптического периода, их продолжительность составляет от 4 до 8 суток. Большое влияние оказывает скорость ветра и длина разгона в море, преобладают обычно волны высотой до 3 м. В более открытых акваториях максимальные высоты волн могут превышать 10 м, а, во время сильных штормов, это значение не является пределом. Усредненное значение колебания волн для Черного моря составляет 0,8 м. Теория возникновения волнового течения была разработана академиком В.В. Шулейкиным [2]. Сила удара черноморской волны может достигать 5 – 6 тонн на 1 м². На уровень моря большое влияние оказывают сезонные колебания. В мае-июле наблюдается высокий подъем уровня морских вод, в октябре-ноябре – снижения уровня. Уровень между зимним и летним положением моря составляет 40 см. Для определения переноса энергии волной, который характеризуется вектором Пойтинга или вектором плотности потока энергии, необходимо знать величины длины и скорости волны. Течение в Черном море у берегов Крыма преимущественно против направления часовой стрелки. Течения слабы, их скорость редко превышает 0,5 м/с. Основная струя течений имеет ширину 40 – 60 км и проходит на расстоянии 3 – 7 км от берега. карта течения Черного моря представлена на рисунке 1. В бухтах

образуются отдельные круговороты, направленные по часовой стрелке, их скорость достигает 0,5 м / с. Наибольшие высоты волн в Черном море – 14 м, длина таких волн составляет 200 м [3].



Рис. 1. Течения Черного моря [3]

Расстояние между гребнями черноморских волн – 20 – 40 м. Океанские волны раз в десять длиннее. Черноморские ударные волны (в результате землетрясений) достигают метровой высоты, а средняя скорость их – 120 – 160 км/час. В открытом море зимние волны достигают высоты 6 – 7 метров. Величина приливо-отливных колебаний уровня на Черном море – от 3 до 10 см.

Течения в Чёрном и Азовском море в основном зависят от ветра, поверхность течения представлена на рисунке 2. Большая изменчивость течений – следствие неустойчивости ветрового режима, мелководности моря и его сравнительно небольшой площади. Если скорость ветра в южной части Азовского моря больше, чем в северной, то в северной части моря наблюдается циркуляция вод по часовой стрелке. При умеренном ветре, дующем с одинаковой скоростью над всем морем, в Таганрогском заливе наблюдается нагон воды. В северной части моря в это время, из-за большой разности в уровнях между Таганрогским заливом и западной частью моря, происходит ослабление ветрового течения и изменение его направления на противоположное. В центральной части моря отмечается циркуляция вод против часовой стрелки. В Керченском проливе течение обычно направлено из Азовского моря в Черное. Преобладающая скорость течений в Азовском море от 0,23 км/ч до 3,2 км/ч в Керченском проливе [4].

Режим волнения Азовского моря обусловлен небольшой площадью моря, малыми глубинами и значительной изрезанностью берегов.

Преобладают высоты волн менее 1 м (повторяемость их достигает 75%). Повторяемость высот волн 1 – 2 м составляет 20 – 45%, а высот волн 2 – 3 м – не более 13% [4].

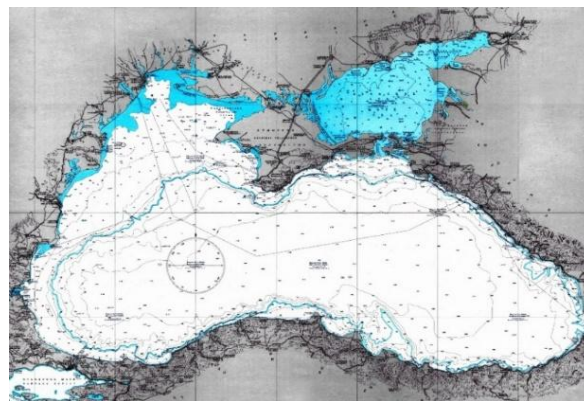


Рис. 2. Поверхностные течения Черного и Азовского моря

Наибольшая глубина Азовского моря 15 м, преобладающей является глубина до 7,5 м. В центральной, самой глубоководной части моря, высоты волн не превышают 3,5 м. В Азовском море наблюдаются волны, имеющие длину в основном 15 – 25 м, и только иногда 80 м. Период волны обычно от 5 секунд до 8 секунд. Ветровое волнение в Азовском море развивается быстро. Через 4 – 6 часов после усиления ветра оно достигает наибольшего развития в зависимости от скорости ветра: при скорости ветра 5 – 10 м/с [5], высота волн от 0,25 до 0,5 м; при скорости ветра 10 – 15 м/с высота волн от 0,75 до 1,25 м; при скорости ветра 15 – 20 м/с высота волн от 1,25 до 2 м. Ветровые волны имеют малую длину и значительную крутизну.

Суммарную возобновляемую мощность волнения для площади S можно найти как суммарную возобновляемую мощность волнения для площади S , N_B , $T_{год}$, можно найти как:

$$N_B = 1,34 \cdot 10^{-4} \Phi^{0,6} S, \quad (1)$$

где $T_{год}$ - годовое время, с.

Тогда годовая возобновляемая энергия волн на заданной акватории, E_B , Дж:

$$E_B = N_B T_{год} = 4215 \Phi^{0,6} S. \quad (2)$$

Возобновляемая мощность и энергия Черного и Азовского морей приведена в таблице 1. Там же для сравнения представлены данные по Баренцевому и Белому морям.

Если принять за основу КПД, равный 60%, то мощность волновых электростанций на акваториях Черного и Азовского морей может составить соответственно 7,45 и 0,38 ГВт, а суммарные технические ресурсы волновой энергии могут быть оценены примерно в 68,6 ТВт·ч в год.

Таблица 1. Возобновляемая мощность и годовая энергия акваторий некоторых морей России [6]

Море	Φ , кВт/м	$S \cdot 10^{12}$, м ²	N_v , Вт	Σ_v , Дж
Черное	6-8	0,422	$12,42 \cdot 10^9$	$1,08 \cdot 10^{14}$
Азовское	3	0,039	$0,64 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^{12}$
Белое	10	0,09	$3,03 \cdot 10^9$	$9,55 \cdot 10^{16}$
Баренцево	25	1,42	$0,83 \cdot 10^{11}$	$2,61 \cdot 10^{18}$

На рисунке 3 приведена схема районов Черного моря по Землякову [7]. На схеме показано преимущественное использование энергии волн на акваториях с малыми и средними волнами. Однако при множестве принципиальных конструкторских решений, для всех видов ВлЭС характерен один общий недостаток, который ограничивает эффективность их применения.

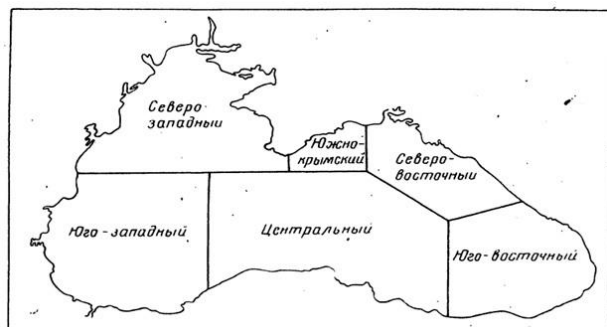


Рис. 3. Схема районов Черного моря [7]

Это отсутствие свойства адаптации к изменяющимся внешним условиям морской среды и, в первую очередь, к нестационарности параметров морских волн: длины, амплитуды и частоты следования (скорости распространения), что существенно снижает общую эффективность применения ВлЭС. На акватории Черного моря возможно существование ветровых волн максимальной высотой до 5,1...20,0 м. Однако, как следует из таблицы 2, такие волны образуются чрезвычайно редко. Волны с 3%-й и большей

обеспеченностью имеют высоту 1,5...3,0 м, что позволяет говорить о целесообразности создания морских ВлЭС для работы на малых и средних волнах. Предварительный анализ существующих принципов построения ВлЭС позволил выбрать в качестве одного из вариантов ВлЭС для работы на Черном море энергоагрегат поплавкового вида. В таблице 2 приведены данные по высоте волн в Черном море в течение года [8].

Анализируя данные, приведенные в таблице 2, можно сделать вывод, что наиболее перспективным для сооружения ВлЭС является Северо-западный район Черного моря, в связи с наиболее высокими показателями скорости ветра. Более детальный анализ показал, что наибольший интерес представляет прибрежная зона между г. Евпатория и г. Севастополь.

Таблица 2. Характеристики волн Черного моря [8]

Высота волн, м	Повторяемость по месяцам и годовая, %												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0,0...0,5	40,7	41,0	47,7	62,2	71,4	68,9	62,7	58,4	54,7	48,2	43,7	39,2	53,3
0,6...1,0	23,6	23,9	23,6	21,0	17,4	18,9	21,4	22,7	22,7	23,9	24,8	24,9	22,4
1,1...1,5	15,6	15,8	14,1	9,1	6,8	7,4	9,5	11,0	11,9	13,3	14,8	16,3	12,1
1,6...2,0	9,4	9,5	7,3	4,2	2,8	3,0	4,0	4,9	6,3	7,5	8,2	9,4	6,4
2,1...2,5	4,6	4,2	3,2	1,7	0,9	1,0	1,6	1,7	2,1	3,3	4,1	4,5	2,7
2,6...3,0	3,4	2,9	2,0	0,9	0,4	0,4	0,5	0,8	1,2	2,1	2,6	3,0	1,7
3,1...3,5	0,8	1,2	0,6	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	1,0	0,5
3,6...4,0	1,2	0,8	0,7	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,4	0,6	0,7	0,9	0,5
4,1...4,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1
4,6...5,0	0,3	0,3	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
5,1...20,0	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1

Технические ресурсы волновой энергии в полосе шириной 10 км составляют около 83 ГВт·ч/год. Соответственно, мощность волновой электростанций в указанной зоне может составить 10 МВт. Для выработки электроэнергии на ВлЭС подходят ветровые волны, и вызванные ими зыбь и прибой. Так как у побережья Крыма волновой потенциал небольшой, целесообразно размещать установки перед зоной прибоя, где

волна значительно больше и имеет кроме потенциальной энергии еще и кинетическую, но при этом не будет повреждать установку.

Разработка преобразователя энергии для волновой электростанции

Для преобразования энергии волн в электрическую энергию была разработана соответствующая энергоустановка (рис. 4). Он представляет собой герметичный буй, который колеблется в воде под действием волн [9]. Эти колебания заставляют перемещаться поршень внутри буя. Движение поршня вытесняет воздух, который проходя через воздухопровод вращает турбину и генератор. Принцип действия, данного устройства заключается в том, что при набегающей волне буй начинает всплывать, при этом поршень 7, имея большую инерцию остается на месте и сжимает пружину 9. В этот момент воздух под давлением вытесняется из полости под поршнем 7 в воздухопровод 8 и через обратный клапан 1.1-1.2 попадает в диффузор 6. Затем приводит в движение турбину 3 и генератор 4 после чего через обратный клапан 1.3-1.4 попадает в полость над поршнем 7 [84].

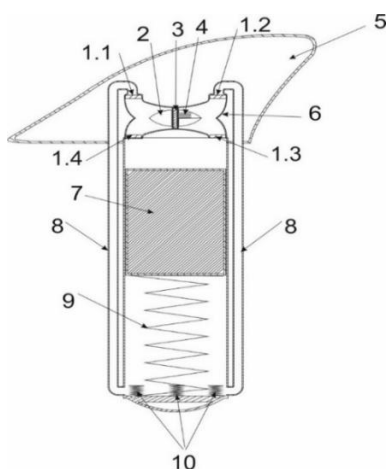


Рис. 4. Устройство преобразователя энергии волн: 1.1-1.4 - впускные и выпускные клапаны; 2 - обтекатель; 3 - турбина; 4 - генератор; 5 - поплавок; 6 - диффузор; 7 - поршень; 8 - воздухопроводы; 9 - пружина; 10 - пружины для гашения удара

Для определения скорости потока воздуха в воздухопроводе преобразователя энергии волн, а, следовательно, и мощности на выходе генератора, была составлена его математическая модель. В качестве исходных данных были взяты следующие значения:

- начальное давление в герметичном бую $P_0 =$

101325 Па;

- универсальная газовая постоянная $R = 8,314$ Дж/(моль·К);
- газовая постоянная $R_g = 287$ Дж/(кг·К); молярная масса воздуха $M = 28,9610^{-3}$ моль;
- температура воздуха $T = 10^\circ \text{C} = 288 \text{ K}$;
- диаметр воздухопровода $d = 110$ мм;
- длина воздухопровода $L = 1$ м.

Давление воздуха над и под поршнем определяется по формуле:

$$V_0 = \pi \cdot r^2 \cdot L; V_1 = \pi \cdot r^2 \cdot (L - x), \quad (3)$$

где

$x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ см – шаг движения поршня.

Масса воздуха в бую составляет:

$$m_b = \frac{P_0 \cdot V_0 \cdot M}{R \cdot T_b} = 0,012 \text{ кг}. \quad (4)$$

Рассчитаем изменение давления воздуха, P_1 , Па, под поршнем при его движении в низ буя, то есть, при перемещении буя на гребень волны:

$$P_1 = \frac{m_b \cdot R \cdot T_b}{M \cdot V_1}. \quad (5)$$

Изменение скорости воздуха в воздухопроводе при движении поршня в низ буя, V , м/с. Рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{(P_2 - P_0) \cdot d}{\lambda \cdot z \cdot R_g \cdot T_b \cdot L}}, \quad (6)$$

где $\rho = 1,2466 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воздуха;

$\lambda = \frac{0,009407}{\sqrt{d}} = 0,02$ - коэффициент гидравлического сопротивления;

$Z = 0,93$ - коэффициент сжимаемости воздуха.

Результаты расчета по координате x представлены в таблице 3.

Таблица 3. Рассчитанные параметры волновой установки

x , см	P_1 , Па	V , м/с
0	$1,013 \cdot 10^5$	0
0,1	$1,126 \cdot 10^5$	1,975
0,2	$1,267 \cdot 10^5$	3,058
0,3	$1,447 \cdot 10^5$	4,159
0,4	$1,689 \cdot 10^5$	5,436
0,5	$2,026 \cdot 10^5$	7,062
0,6	$2,533 \cdot 10^5$	9,342
0,7	$3,377 \cdot 10^5$	12,96
0,8	$5,066 \cdot 10^5$	19,97
0,9	$1,013 \cdot 10^6$	30,57

Расчетная зависимость выходной мощности генератора от потока воздуха в электроэнергетическом агрегате представлена на рисунке 5.



Рис. 5. График зависимости выходной мощности генератора от потока воздуха в электроэнергетическом агрегате

Результаты экспериментальных исследований

Буй представляет собой герметичный сосуд, внутри которого под действием волнения перекачивается газ [10]. Такая схема обеспечивает высокую надежность, так как она имеет минимум деталей и не имеет контакта с морской водой. Испытание устройства включает в себя два этапа.

I этап. Исследование характеристик модели ВлЭУ при работе с воздухом. Модель буя наполняется воздухом под атмосферным давлением и подвешивается на резиновые тросы к перекладине, как показано на рисунке 6.

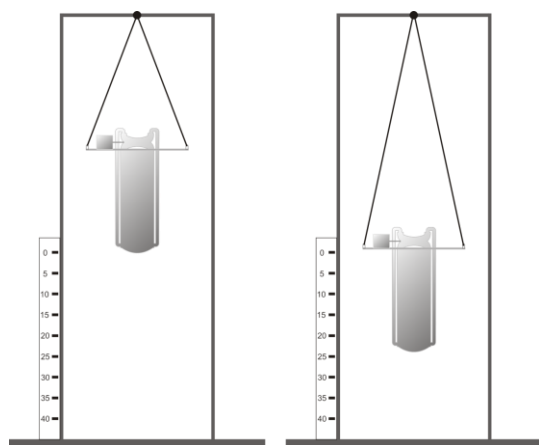


Рис. 6. Экспериментальные исследования модели буя

Далее буй отклоняют до заданного значения по шкале и отпускают. При этом он совершает вертикальные колебательные движения, аналогичные тем, которые вызваны морским волнением. При этом поршень перекачивает воздух,

приводя в движение турбину и генератор. К генератору подсоединен: амперметр, вольтметр и нагрузка в виде реостата. После того как буй сделал несколько колебаний и выходной сигнал с генератора стабилизировался, производим замеры тока и напряжения под нагрузкой [10]. Далее опыт повторяется еще для четырех значений высот волны с учетом зависимости $N=f(h)$. Экспериментальное исследование модели буя поясняется рисунком 6, результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Экспериментальные исследования модели буя с воздухом

Высота колебания буя, h , м	Сила тока, I , А	Напряжение, U , В	Мощность, P , Вт
0,05	2	0,1	0,2
0,1	3	0,14	0,42
0,15	5	0,2	1
0,2	9	0,35	3,15
0,25	11	0,4	4,4

II этап. Исследование характеристик модели ВлЭУ при работе с углекислым газом. Так же как и в предыдущем этапе, буй подвешивается на эластичных тросах, но при этом в него закачивается газ с плотностью большей, чем плотность воздуха. В данном случае эксперимент проводился с углекислым газом. Он имеет плотность $1,97 \text{ кг/м}^3$. Далее эксперимент повторяется для тех же значений высот волн, снимаются показания и заносятся в таблицу 5, по которой строится график зависимости $N=f(h)$.

По полученным значениям строится общий график (рис. 7), который включает в себя графики зависимости:

- мощности от высот волн с воздухом;
- мощности от высот волн при наполнении углекислым газом.

Таким образом, в результате испытаний были получены значения мощности, представленные в таблицах 4 и 5 для воздуха и углекислого газа соответственно. Зависимость изменения мощности от плотности рабочего тела – линейная. Наиболее целесообразно применение в качестве рабочего тела газов большей плотности, при условии обеспечения скорости потока достаточной для вращения турбины с частотой 1500 об/мин. Такая частота вращения турбины позволяет применять серийно выпускаемый генератор с минимальным числом пар полюсов, что в свою очередь уменьшает его стоимость и необходимый запас плавучести ВлЭУ.

Таблица 5. Экспериментальные сравнения модели буя с углекислым газом

Высота колебания буя, h, м	Сила тока, I, А	Напряжение, U, В	Мощность, P, Вт
0,05	3,28	0,11	0,36
0,1	4,92	0,14	0,68
0,15	8,2	0,2	1,64
0,2	14,7	0,35	5,14
0,25	18	0,4	7,2

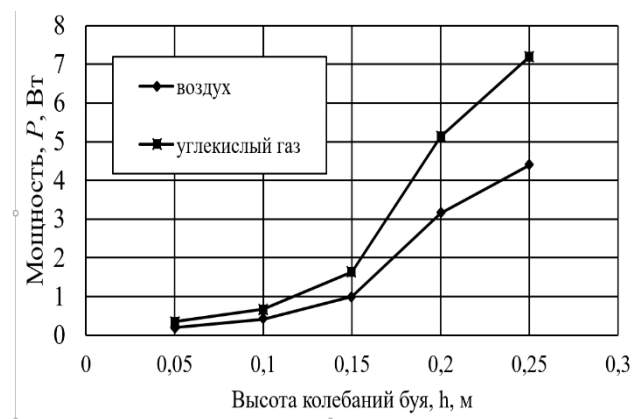


Рис. 7. Экспериментальное исследование модели буя с углекислым газом

Заключение

В результате проведения работы был разработан преобразователь энергии волн поплавкового типа в виде герметичного сосуда, внутри которого под действием колебаний морской поверхности поршень перекачивает газ, приводя в движение турбину и генератор, обладает высокой надежностью из-за наличия небольшого количества составных элементов и отсутствия непосредственного контакта внутренней полости, где расположен генератор, с морской водой. Также была разработана методика экспериментального исследования преобразователя поплавкового типа, которая включала замену воздуха в экспериментальном образце на углекислый газ и изменение высоты колебаний, что позволило оценить основные электрические параметры, такие как ток, напряжение и мощность в разных условиях с целью выявления наиболее эффективной рабочей среды. Составленная математическая модель преобразователя энергии волн в электрическую энергию описывает его работу при заданных характеристиках волн и параметрах самого преобразователя. При высоте и периоде морской волны, которые равны до 2 м и 1,79

с, соответственно, что характерно для прибрежных вод Черноморского побережья Крыма, выработка разработанного преобразователя составила 72 кВт·ч за сутки. Перспективой дальнейших исследований является изготовление опытных образцов преобразователей энергии волн с генераторами различного типа и мощности, проведение натурных испытаний с целью определения оптимальных характеристик преобразователей на основе сравнения полученных в результате проведенных экспериментов параметров.

Список литературы

1. Государственное управление Российской Федерации: вызовы и перспективы // Материалы 15-й Международной конференции Государственное управление в XXI веке: сборник, электронное издание сетевого распространения / Коллектив авторов. – М.: «КДУ», «Университетская книга», 2018. – 856 с.
2. Безруков, Ю.Ф. Динамические явления и процессы в океане Часть II // Министерство науки и образования Украины Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского Географический факультет Кафедра физической географии и океанологии. Симферополь 2006 г.
3. Энергия морских волн. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://userospu.odessa.ua/~shev/emd_m/nie/1_2_9/htm.
4. Каратунова Н.Г., Никитина Т.А. Чрезвычайные ситуации в водоохранных зонах водных объектов Ейского района Краснодарского края. Экономика. Право. Печать. Вестник КСЭИ. 2018. № 2 (78). С. 123-128.
5. Потенциал использования преобразователей энергии волн черного и азовского морей // Бекиров Э.А., Асанов М.М., Муртазаев Э.Р., Амерханов Р.А. / Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 1 (135). С. 32-35.
6. Матушевский, Г.В. Теоретические и прикладные аспекты применения спектральных моделей ветрового волнения / Г.В. Матушевский, И.М. Кабатченко // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 3. – С. 47-54. – EDN PNQAYL.
7. Сичкарев В.И., Шпак А.С. Анализ и классификация технических средств преобразования волновой энергии // Использование энергии приливных и ветровых волн в океане. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 33-40.
8. Альтернативные источники энергии: морские волны и течения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mining-portal.ru/publish/alternativnyie-istochniki-energii--morskie-volny-i-techeniya>.
9. Муртазаев, Э.Р. Экспериментальное исследование устройства преобразования энергии волн / Э.Р. Муртазаев, Л.Н. Циперко // Агротехника и

энергообеспечение – 2021. - № 4 (33). – С. 42-48.

10. Схемные решения электроснабжения потребителей от электроустановок возобновляемой энергетики // Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Муртазаев Э.Р., Амерханов Р.А. / Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 1 (135). С. 50-54.

References

1. Public administration of the Russian Federation: challenges and prospects // Materials of the 15th International Conference Public administration in the 21st century: collection, electronic publication of network distribution / Team of authors. – М.: “KDU”, “University Book”, 2018. – 856 p.
2. Bezrukov, Yu.F. Dynamic phenomena and processes in the ocean Part II // Ministry of Science and Education of Ukraine Tauride National University named after. V.I.Vernadsky Faculty of Geography Department of Physical Geography and Oceanology. Simferopol 2006.
3. Energy of sea waves. [Electronic resource]. — Access mode: http://userospu/odessa.ua/~shev/emd_m/nie/1_2_9/htm.
4. Karatunova N.G., Nikitina T.A. Emergency situations in water protection zones of water bodies in the Yeisk district of the Krasnodar region. Economy. Right. Seal. KSEI Bulletin. 2018. No. 2 (78). pp. 123-128.
5. Potential for using wave energy converters in the Black and Azov seas // Bekirov E.A., Asanov M.M., Murtazaev E.R., Amerkhanov R.A. / Energy saving and water treatment. 2022. No. 1 (135). pp. 32-35.
6. Matushevsky, G.V. Theoretical and applied aspects of the use of spectral models of wind waves / G.V. Matushevsky, I.M. Kabatchenko // Meteorology and hydrology. – 2003. – No. 3. – P. 47-54. – EDN PNQAYL.
7. Sichkarev V.I., Shpak A.S. Analysis and classification of technical means for converting wave energy // Using the energy of tidal and wind waves in the ocean. – Vladivostok: Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1984. P. 33-40.
8. Alternative energy sources: sea waves and currents [Electronic resource]. — Access mode: <http://www.mining-portal.ru/publish/alternativnyie-istochniki-energii--morskie-volnyi-i-techeniya>.
9. Murtazaev, E.R. Experimental study of a wave energy conversion device / E.R. Murtazaev, L.N. Tsiperko // Agricultural technology and energy supply – 2021. - No. 4 (33). – pp. 42-48.
10. Circuit solutions for power supply to consumers from electrical installations of renewable energy // Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Murtazaev E.R., Amerkhanov R.A. / Energy saving and water treatment. 2022. No. 1 (135). pp. 50-54.

УДК 556.33

Анализ термальных вод юрского водоносного горизонта Томской области для выработки электроэнергии

С.А. Янковский¹, Д.С. Крутенко¹, С.В. Лавриненко¹, В.Е. Губин^{1,2}, К.Б. Матузаев²,
Цибульский С.А.¹,

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, г. Томск, 634050, Россия, jankovsky@tpu.ru, lavrinenko@tpu.ru, vegubin@sevsu.ru, kbmatauzaev@sevsu.ru, stzibulsky@tpu.ru
ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 18.02.2025 г.; после доработки 19.02.2025 г.

Аннотация

Цель исследования заключается в определении участков распространения термальных вод юрского водоносного горизонта, пригодных для выработки электроэнергии на территории Томской области. Для водоносного комплекса построен комплект структурных и температурных карт. Расчет пластовых температур водоносных комплексов выполнялся путем решения прямой задачи геотермии с известным тепловым потоком. В результате комплексного анализа были выявлены перспективные для извлечения электроэнергии из термальных вод районы населенных пунктов.

Ключевые слова: юрский водоносный горизонт, температурные карты, пластовые температуры, термальные воды, Томская область.

Analysis of thermal waters of the Jurassic aquifer of the Tomsk region for power generation

S.A. Yankovsky¹, D.S. Krutenko¹, S.V. Lavrinenko¹, V.E. Gubin^{1,2}, K.B. Matuzaev²,
S.A. Tsibulskiy¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia, jankovsky@tpu.ru, lavrinenko@tpu.ru, vegubin@sevsu.ru, kbmatauzaev@sevsu.ru, stzibulsky@tpu.ru

²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia

Received 18.02.2025 y.; received in final form 19.02.2025 y.

Abstract

The purpose of the study is to determine the areas of distribution of thermal waters of the Jurassic aquifer suitable for generating electricity in the Tomsk region. A set of structural and temperature maps has been built for the aquifer complex. The calculation of reservoir temperatures of aquifers was carried out by solving the direct problem of geothermy with a known heat flux. As a result of a comprehensive analysis, areas of settlements that are promising for extracting electricity from thermal waters have been identified.

Key words: Jurassic aquifer, temperature maps, reservoir temperatures, thermal waters, Tomsk region.

Введение

Мировое сообщество постепенно продвигается в решении задач в области устойчивого энергоснабжения за счет внедрения и использования современных технологий энергетики. Однако нынешние темпы прогресса недостаточно

высоки. Согласно данным ООН, мир приближается к климатической катастрофе и время, когда ее еще можно предотвратить, быстро уходит. Увеличение общего потребления энергии и количества выбросов парниковых газов – одна из

наиболее важных экологических проблем. Данная проблема связана с ростом численности населения планеты и улучшением качества жизни, что требует больше энергии для повседневной и промышленной деятельности. Для решения задачи сокращения выбросов парниковых газов в рамках борьбы с изменением климата необходимо ускорить прогресс в повышении эффективности энергетики. В связи с этим руководства большинства стран мира ищут наиболее экологически и экономически выгодные виды производства электрической и тепловой энергии. Для обеспечения возрастающей доли потребления энергии и одновременного снижения последствий глобального потепления могут быть применены нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, один из которых – геотермальная энергия. Данный вид энергии является надежным, устойчивым и экологически чистым. При этом геотермальная энергия может быть использована для выработки электроэнергии, отопления и охлаждения зданий, обеспечения горячей или холодной водой и пр. Получение энергии из геотермальных источников почти не зависит от внешних факторов и может происходить практически непрерывно в течение всего года [1].

Согласно данным Министерства энергетики США, геотермальная энергия может быть применена для разных целей в зависимости от температуры источника. По этим данным для выработки энергии необходима температура геотермального источника в устье скважины порядка 100 °С (при реализации бинарного цикла). Согласно исследованиям, перспективными с точки зрения получения геотермальной энергии считаются водоносные пласты, температура в которых превышает 80 °С [2].

Томская область обладает значительным объемом термальных вод Западно-Сибирского нефтегазоводоносного мегабассейна (до 50 %). Кроме того, термальные воды Томской области находятся на относительно близко к поверхности (1...4 км) и в перспективе могут быть использованы для генерации тепловой и электрической энергии [3].

Постановка задачи и целей исследования

Цель работы заключается в определении участков распространения термальных вод юрского водоносного горизонта Томской области,

пригодных для выработки электроэнергии.

Целесообразность использования геотермальных ресурсов Томской области может быть оценена на основе анализа водоносных комплексов, в частности, юрского водоносного горизонта. Для этого необходимо определить, построить структурные карты по кровле/подошве. На основе полученных данных, можно рассчитать температуры геотермальных вод, с последующим определением участков, перспективных для генерации электроэнергии (температуры более 80 °С).

Юрский водоносный горизонт входит в число основных водоносных горизонтов Томской области [4]. Он включает отложения васюганской (и ее аналогов) и тюменской свит. С ним связаны основные запасы нефти и газа Томской области. Он сложен разнородными песками и песками с прослоями аргиллитов и глин. В кровле горизонт ограничен глинистыми отложениями баженовской и георгиевской свит. Водоносный горизонт залегает в приенисейской полосе на глубине 30 м, погружаясь на запад до 2500 м. Скважины, используемые для анализа вскрывают юрский водоносный горизонт (кровлю васюганской/наунакской/тяжинской свиты) на глубинах от 1835 до 2962 м.

Водообильность коллекторов горизонта в целом низкая [5, 6]. Притоки воды незначительны и составляют единицы, реже – десятки м³/сут [5]. Удельные дебиты скважин не превышают 0,02 л/сек [4]. Поэтому возможности вовлечения в разработку содержащихся в отложениях горизонта промышленных вод очень низки [6]. В восточной части минерализация достигает 0,5 г/л, в западной – более 60 г/л.

Результаты исследований

Определение глубин залегания водоносных комплексов.

Глубины залегания водоносного горизонта определялись по литологическим разбивкам скважин (данные Томского филиала ФБУ ТФГИ по СФО). Соответственно границами горизонта являются кровля васюганской/наунакской/тяжинской свит и подошва тюменской свиты. Для большей детальности расчеты выполнялись для кровли васюганской/наунакской/тяжинской свит, кровли тюменской свиты и для скважин, вскрывших тюменскую свиту на полную мощность – для центра и подошвы тюменской свиты.

Ниже приведены структурные карты для

обозначенных границ юрского водоносного горизонта (рис. 1-4).

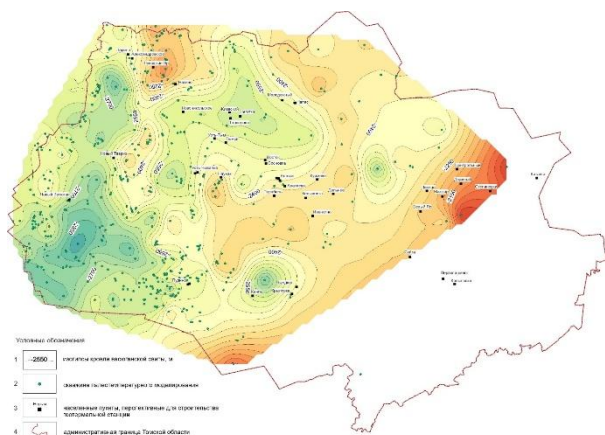


Рис. 1. Структурная карта по кровле юрского водоносного горизонта (кровля васюганской/научанской/тяжинской свит)

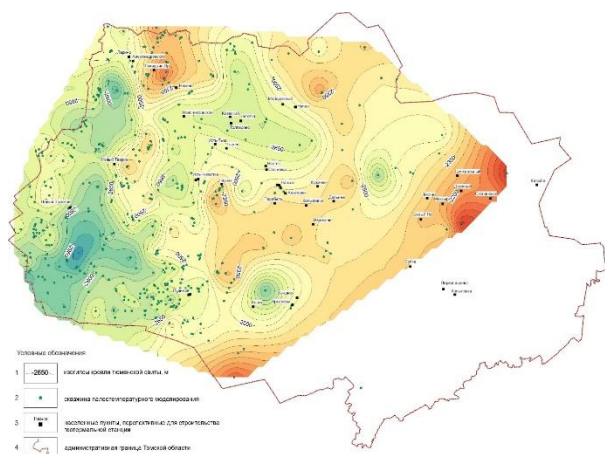


Рис. 2. Структурная карта по кровле тюменской свиты

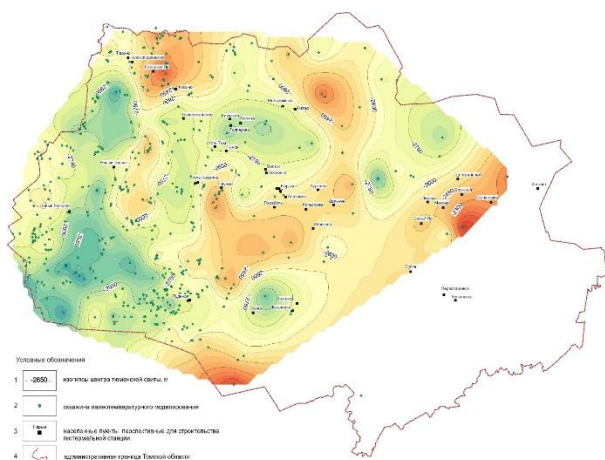


Рис. 3. Структурная карта по глубине центра тюменской свиты

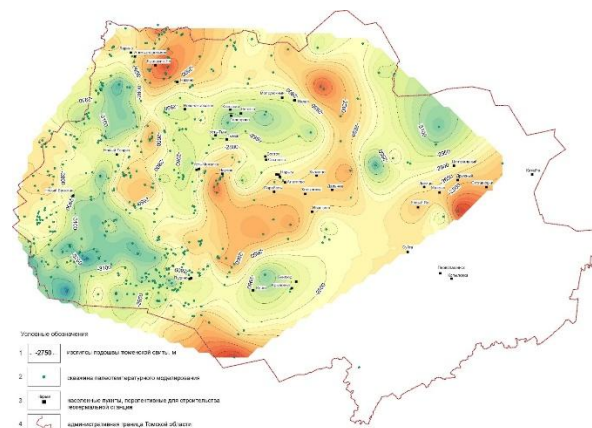


Рис. 4. Структурная карта по подошве тюменской свиты

Юрский водоносный горизонт расположен на больших глубинах. Его кровля (кровля васюганской свиты) находится в диапазоне отметок от -1835 до -2962 м. Максимальная глубина положения кровли тюменской свиты вскрыта в скважине Глуховская 2 и составляет -3044 м. Наибольшая вскрытая глубина подошвы тюменской свиты составляет -3486 м в скважине Налимья 3.

Понятно, что вероятность существования в разрезе высоких температур повышается с увеличением глубины залегания водоносного горизонта. Поэтому уже на этапе построения структурных карт становится ясно, что существование в разрезе высоких температур в районе поселков Дружный, Центральный, Степановка, Макзыр и Лисица при отсутствии высоких тепловых потоков – маловероятно.

Видно, что некоторые поселки на всех картах попадают в зоны погружения структурного рельефа, например, поселки Киевский, Неготка, Новоникольское, Усть-Тым, Тымск. Здесь можно ожидать существование в разрезе высоких температур даже при среднем тепловом потоке.

Анализ температурных карт

Анализ температурного режима юрского водоносного горизонта осуществлялся с помощью температурных карт, построенных по методике В.И. Исаева [7, 8]. На карте температур кровли юрского водоносного горизонта (кровля васюганской/научанской/тяжинской свит) (рис. 5) температуры изменяются от 52 °С (в скважине Карбинская 1) до 122 °С (в скважине Александровская 10). На карте заливкой показаны зоны, где температуры на этой глубине превышают 80 °С. Видим, что «горячей зоной» занята довольно обширная площадь. На карте температур

подошвы васюганской/наунакской/тяжинской свит (рис. 6) «горячая зона» значительно расширилась. В зону высоких температур попадают поселки Белый Яр, Новый Тевриз, Лукашкин Яр, Назино, Новоникольское, Киевский, Неготка, Усть-Тым, Тымск, Восток, Сосновка, Нарым, Усть-Чижапка, Наунак, Копыловка, Куржино, Дальнее, Иванкино, Молодежный, Напас, Суйга.

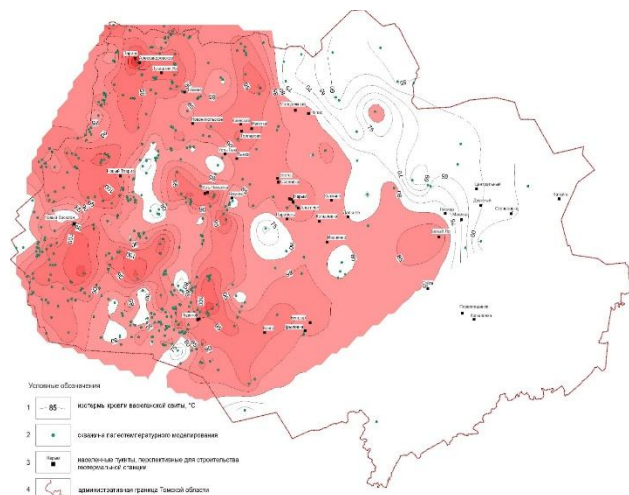


Рис. 5. Карта температур кровли васюганской/наунакской/тяжинской свит

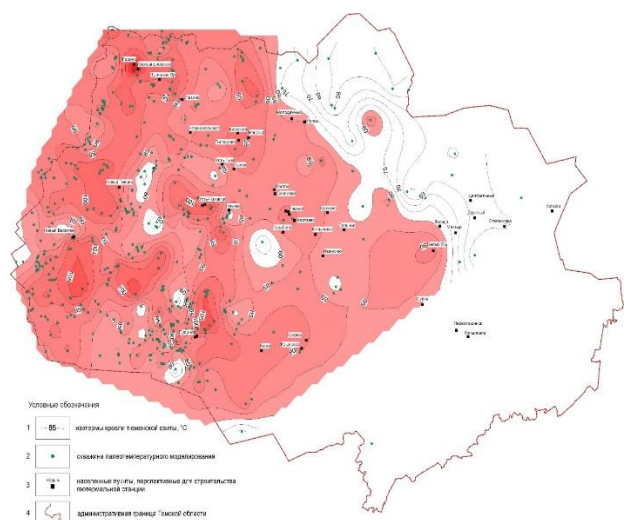


Рис. 6. Карта температур кровли тыменской свиты (подошвы васюганской/наунакской/тяжинской свит)

На карте температур на глубину центра тыменской свиты (рис. 7) видно, что «горячая зона» занимает значительную часть Томской области и распространяется дальше на восток. Теперь во зону высоких температур входят все названные поселки, а также уверенно входит поселок Ли́сица.

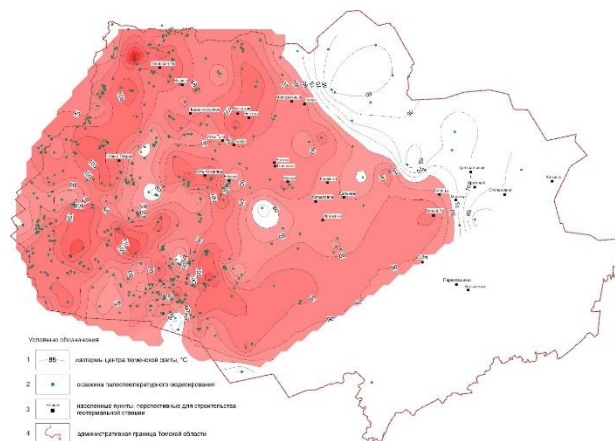


Рис. 7. Карта температур кровли готерив-барремского водоносного комплекса

На рисунке 8 представлена карта температур на глубину подошвы тыменской свиты. Видим, что «горячая зона» расширяется и теперь включает еще и поселок Макзыр.

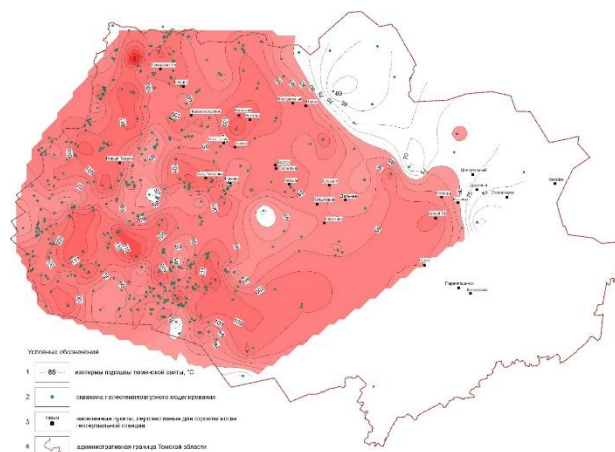


Рис. 8. Карта температур подошвы готерив-барремского водоносного комплекса

Для характеристики геотермического режима в районе поселков Первопашенск и Копыловка не хватает данных о пластовых температурах – в непосредственной близости нет скважин, в которых бы проводились испытания.

Выводы

С точки зрения геотемпературного критерия юрский водоносный горизонт можно считать перспективным для получения геотермальной энергии в большей части Томской области.

Из целевых поселков перспективность сохраняется для 22 из 28 поселков: Новый Тевриз, Лукашкин Яр, Назино, Новоникольское, Киев-

ский, Неготка, Усть-Тым, Тымск, Восток, Сосновка, Нарым, Усть-Чижапка, Наунак, Копыловка, Куржино, Дальнее, Иванкино, Молодежный, Напас, Суйга, Лисица и Макзыр.

В поселках Центральный, Дружный, Степановка и Катайга температуры в юрском водоносном горизонте недостаточны для использования вод в геотермальной энергетике.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта НИР/ЭБ-016-202-2024.

Список литературы

1. Геотермальная энергетика и перспективы ее развития в мире и Томской области / С. В. Лавриненко, С. А. Цибульский, С. А. Янковский. – Москва : Издательство Знание-М, 2023. – 83 с. – ISBN 978-5-00187-468-3. – DOI 10.38006/00187-468-3.2023.1.83. – EDN JQXIVW.
2. Мищенко М.В. Ресурсы термальных вод Колпашевской площади Томской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 310. – №. 1. – С. 34-38.
3. Тепловые схемы геотермальной энергетики / С. А. Янковский, С. В. Лавриненко, С. А. Цибульский [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 7. – С. 122-136. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/7/4130>.
4. Удодов П.А., Ермашова Н.А., Рассказов Н.М., Назаров А.Д., Быков В.Г., Коробейникова Е.С. Подземные воды Томской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1975. – Т. 297. – С. 95-97.
5. Мищенко М.В. Гидрогеологические условия Оленьей площади Томской области // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 153–155.
6. Кирсанова А.Ю. Гидрогеологические условия Чкаловского нефтегазоконденсатного месторождения // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Международного симпозиума им. ак. М.А. Усова – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 148–149.
7. Исаев В.И. Палеотемпературное моделирование осадочного разреза и нефтегазообразование // Тихоокеанская геология. – 2004. – Т. 23. – № 5. – С. 101-115.
8. Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область) / В. И. Исаев, Г. А. Лобова, А. Н. Фомин [и др.] // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 125-135.

References

1. Geothermal energy and prospects for its development

in the world and the Tomsk region / S. V. Lavrinenko, S. A. Tsybulsky, S. A. Yankovsky. – Moscow : Publishing House –Znanie, 2023. – 83 p. – ISBN 978-5-00187-468-3. – DOI 10.38006/00187-468-3.2023.1.83. – JQXIVW PUBLISHING HOUSE.

2. Mishchenko M.V. Thermal water resources of the Kolpashevskaya area of the Tomsk region // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering, 2007. Vol. 310(1). P. 34–38.
3. Yankovsky S.A., Lavrinenko S.V., Tsybulsky S.A. et al. Thermal schemes of geothermal energy // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering, 2023. Vol. 334(7). P. 122–136. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/7/4130>.
4. Udodov P.A., Ermashova N.A., Rasskazov N.M., Nazarov A.D., Bykov V.G., Korobeynikova E.S. Underground waters of the Tomsk region // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geological resources. – 1975. – Vol. 297. – pp. 95-97.
5. Mishchenko M.V. Hydrogeological conditions of the Deer area of the Tomsk region // Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the XI International Symposium named after ak. M.A. Usov – Tomsk: TPU Publishing House, 2007. – p. 153-155.
6. Kirsanova A.Yu. Hydrogeological conditions of the Chkalovsky oil and gas condensate field // Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the XI International Symposium named after M.A. Usov – Tomsk: TPU Publishing House, 2007. - pp. 148-149.
7. Isaev V.I. Paleotemperature modeling of sedimentary section and oil and gas formation // Pacific Geology. - 2004. – Vol. 23. – No. 5. – pp. 101-115.
8. Heat flow and oil and gas potential (Yamal semi-island, Tomsk region) / V. I. Isaev, G. A. Lobova, A. N. Fomin [et al.] // Georesources. – 2019. – vol. 21. – No. 3. – pp. 125-135.

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

УДК 621.039.56

**Электромагнитные методы диагностики при
диагностировании технического объекта**

Н.И. Кузнецова., Стрыкова А.В., Жигайло А.Д.

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, nika100452@gmail.com, anna-str7@yandex.ru, zhigailonastya@yandex.ru*

Статья поступила 19.02.2025 г.; после доработки 21.02.2025 г.

Аннотация.

В данной статье рассматривается исследование технического объекта с помощью электромагнитных методов, с целью формирования представления о выборе необходимого для использования в диагностировании различных объектов. Выполнена систематизация бесконтактных методов диагностирования, одним из которых является электромагнитный метод, который дает возможность получить информацию о наличии дефектов и динамике их развития на ранней стадии, что позволяет кардинально изменить процедуру контроля и технического диагностирования электротехнического оборудования. Установлено, что метод, позволяет обнаружить поверхностные и подповерхностные дефекты, определить структуру и оценить глубину поверхностно-упорядоченных слоев. Исследование позволило определить и представить основные схемы для различных методов электромагнитного диагностирования, а также установить, что важным фактором, влияющим на работоспособность оборудования, а также величину издержек на ремонт, является обоснованное определение вида, объёма, места и времени ремонта. Данная разработка может быть использована для последующих научных работ или применена как полноценная основа будущего самобытного проекта.

Ключевые слова: Электромагнитный метод, магнитографический дефектоскоп, достоинства и недостатки метода.

**Electromagnetic diagnostic methods when diagnosing a technical
object**

Kuznetsova N.I., Strykova A.V., Zhigailo A.D.

*Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
nika100452@gmail.com, anna-str7@yandex.ru, zhigailonastya@yandex.ru*

Received 19.02.2025 y.; received in final form 21.02.2025 y

Annotation

This article discusses the study of a technical object using electromagnetic methods in order to form an idea of the choice of various objects necessary for use in diagnostics. The systematization of non-contact diagnostic methods is carried out, one of which is the electromagnetic method, which makes it possible to obtain information about the presence of defects and the dynamics of their development at an early stage, which allows you to radically change the procedure control and technical diagnostics of electrical equipment. The study made it possible to determine and present the basic schemes for various methods of electromagnetic diagnostics, as well as to establish that an important factor affecting the operability of equipment, as well as the amount of repair costs, is a reasonable determination of the type, volume, place and time of repair. The development can be used for subsequent scientific work or applied as a full-fledged basis for a future original project..

Keywords: Electromagnetic method, magnetic method, eddy current method.

Введение

В настоящее время наша жизнь практически полностью зависит от различного вида оборудования, которое требует постоянного наблюдения. При разработке методов текущего контроля наиболее перспективными считаются методы, основанные на возможности ранней диагностики. Однако их перечень в настоящее время крайне ограничен. Существенное влияние на эффективность методов оказывает наличие возможности их технической реализации, широкого использования стандартных метрических средств, простоты обслуживания.

Современные нормативные документы предполагают разделение всех методов неразрушающего контроля на 9 видов: акустический, контроль проникающими веществами, магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный. Однако магнитный и вихретоковый виды контроля объединяет глубокая взаимосвязь лежащих в их основе электрических и магнитных явлений. Поэтому в данной работе были рассмотрены магнитные и вихретоковые методы контроля и диагностики с единых позиций электромагнетизма. Данный метод контроля был рассмотрен на примере, трубопроводов и высоковольтного оборудования.

Цель работы заключается в анализе электромагнитных методов диагностики при диагностировании технического объекта. Систематизация методов.

Анализ проблемы и ее актуальность. В наши дни существует большое количество заводов и предприятий, которые имеют в своём составе трубы, трубопроводы, а также различное металлическое оборудование, целостность и качество которого играет огромную роль не только для выполнения поставленных функций, но и для безопасности. Именно поэтому производится диагностика технических объектов. Однако диагностика должна быть, как можно, менее трудозатратой и более безопасной. Именно поэтому большое преимущество имеют бесконтактные методы диагностирования, одним из которых и является электромагнитный.

Актуальность электромагнитного метода диагностирования обусловлена возможностью получить информацию о наличии дефектов и динамике их развития на ранней стадии. Это позволяет кардинально изменить процедуру контроля и технического диагностирования электротехнического оборудования. Преимущества такого ме-

тода заключается в низкой стоимости используемой аппаратуры, высокой чувствительности метода и непрерывной подачи информации.

Суть метода.

Электромагнитный метод является бесконтактным, позволяет обнаружить поверхностные и подповерхностные дефекты (трещины, пленки, раковины, поры, включения), определить структуру и оценить глубину поверхностно-упорядоченных слоев. Применяется для контроля таких параметров как размеры изделия, диаметр проволоки (труб), толщину стенок труб, металлических листов, толщину электропроводящих и диэлектрических покрытий, зазоры, вибрации. Метод основан на анализе внешнего электромагнитного поля $\vec{H}_в$ с электромагнитным полем $\vec{H}_{в.т}$ вихревых токов $i_{вт}$ наводимых в контролируемом изделии возбуждающей катушкой $W_в$ преобразователя. Результирующее магнитное поле $\vec{H}$ наводит ЭДС U в измерительной катушке $W_и$, изменяя ее полное сопротивление. По измеренным значениям U и Z судят о наличии дефектов. Электромагнитный метод проводят в соответствии с ГОСТ 24289-80.

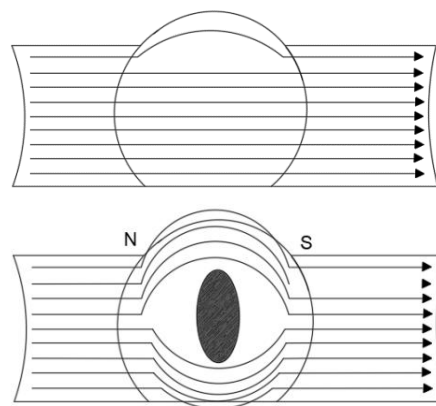


Рис. 1. Схема электромагнитного метода контроля

Магнитные методы контроля применяются для ферромагнитных материалов (изделия из стали или чугуна толщиной не более 30 мм). Они основаны на измерении и анализе результатов взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым объектом. При наличии в шве несплошностей, вследствие меньшей магнитной проницаемости дефекта, магнитный силовой поток будет огибать дефект.

Изделия контролируют в наложенном постоянном или переменном магнитном поле либо после намагничивания в остаточном поле. Намагничивают детали постоянным, импульс-

ным униполярным, переменным или комбинированным магнитным полем. Выбор способа намагничивания выбирается в зависимости от ожидаемых дефектов.

После контроля детали размагничиваются нагревом выше точки Кюри (для стали $T=740-780^{\circ}\text{C}$) или переменным магнитным полем с амплитудой, равномерно уменьшающейся от некоторой максимальной величины, до нуля. Размагничивание изделий производится для исключения нежелательных явлений, таких как прилипание ферромагнитных частиц (недопустимо для зубчатых передач), создание вихревых токов во вращающихся изделиях (лопатки турбины), появления мешающих магнитных полей (неверные показания навигационных приборов).

При магнитопорошковом методе на поверхность намагниченной детали наносят ферромагнитный порошок, после металл подвергается воздействию сильного магнитного поля.

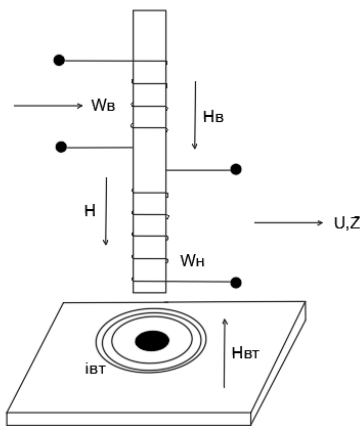


Рис. 2. Схема магнитного контроля

Порошок представляет собой сухую измельченную смесь окиси-заиси железа FeOFe_2O_3 , с размером частиц $10 \div 30$ мкм. На краях трещин и раковин поле концентрируется, что вызывает притягивание порошка. После прекращения действия магнитного поля вокруг каждой трещины или раковины наблюдается концентрация порошка. При применении флюоресцентного порошка для обнаружения концентраций место проверки следует осветить ультрафиолетовым светом.

Магнитное поле рассеяния выявляется благодаря тому, что на ферромагнитные частицы порошка действуют силы этого поля, которые стремятся затянуть эти частицы в места наибольшей концентрации магнитных силовых линий. В результате ферромагнитные частицы собираются над дефектом, образуя рисунок в виде по-

лосок или цепочек. Ширина полосок из скопившихся частичек обычно значительно больше ширины дефекта, поэтому этим методом контроля могут быть выявлены даже мельчайшие трещины, надрывы, волосовины и другие мелкие дефекты.

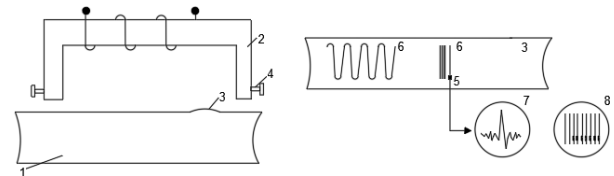


Рис. 3 - Магнитопорошковый метод

1 – магнитное поле; 2 – дефект; 3 – искажение магнитного поля; 4 – магнитный порошок; 5 – скопление порошка

Однако такой метод эффективен только обнаружения поверхностных или близко расположенных к поверхности пор и трещин, и применяется только для материалов, способных намагничиваться.

Магнитографический метод контроля дает достаточно достоверные результаты и практически является одним из главных способов контроля сварных стыков при прокладке трубопроводов, для обнаружения в них трещин, непроваров и несплавления.

Сущность этого метода заключается в намагничивании контролируемого участка сварного шва и околошовной зоны с одновременной записью магнитного поля на магнитную ленту, толщиной 100 мкм, сделанной из лавсана, и последующим считыванием с нее полученной информации специальными устройствами магнитографических дефектоскопов. Записи на ленте преобразуются в электрические сигналы.

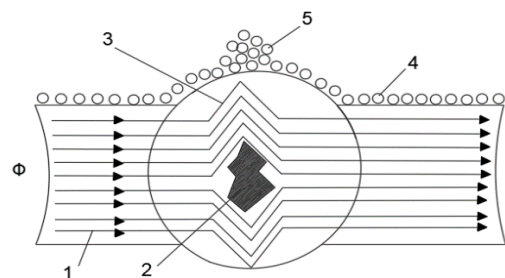


Рис. 4. Магнитографическая дефектоскопия

1 – объект контроля; 2 – электромагнит; 3 – лента; 4 – ролик; 5 – преобразователь; 6 – траектория сканирования; 7,8 – видеоконтрольные устройства

Преимущества такого метода заключаются

в высокой разрешающей способности возможности регистрации дефектов на сложных поверхностях и узких зазорах.

При магнитоферрозондовом методе используются датчики - феррозонды. Широко применяются двухэлементные феррозонды, которые могут использоваться и как измерители поля (полемеры), и как разностные полемеры, измеряющие разность полей в двух участках пространства, где расположены ферроэлементы. Если такие элементы расположены близко друг к другу, то считается, что они измеряют градиент поля и такие феррозонды называют градиентомерами. Они имеют катушки, генерирующие магнитное поле, взаимодействующее с остаточным или наведенным полем контролируемой детали. При попадании дефекта в зону взаимодействия этих полей в катушках датчика возникнет электрический сигнал, по его величине судят о дефекте.

Этот метод имеет высокую чувствительность, но для обеспечения достоверности результатов поверхность изделия должна иметь хорошую чистоту обработки.

При индукционном методе для регистрации магнитных полей рассеяния, образующихся около дефектов в намагниченной детали, используют катушку, которую двигают вдоль шва с постоянной скоростью. Магнитным полем детали в катушке наводится электродвижущая сила (ЭДС). В местах рассеяния поля ЭДС изменяется - образуется электрический сигнал, по которому судят о дефекте. Катушка намотана на сердечнике из металла с высокой магнитной проницаемостью - вместе они составляют магнитную индукционную головку. Она проще феррозонда, так как не требует генератора для питания.

Метод отличается повышенной надежностью, может работать в сильных магнитных полях, однако требует перемещения магнитной головки с постоянной скоростью вдоль направления магнитного поля, при этом щель рабочего зазора в сердечнике должна быть перпендикулярна к направлению движения. Поэтому его рационально применять в массовом производстве (при большой длине швов). Индукционный метод используется, например, для контроля сварных труб, перемещающихся относительно индукционной головки.

Отдельного внимания заслуживает вихретоковый метод контроля, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного

поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем.

Существует несколько методов вихретокового контроля (ГОСТ 18353-79): амплитудный, фазовый и частотный. На рисунках 5, 6, 7 представлены схемы приборов контроля основанных на различных способах контроля.



Рис. 5. Структурная схема прибора контроля, основанная на измерении амплитуды напряжения

В качестве источника электромагнитного поля чаще всего используется индуктивная катушка с синусоидальным током, называемые вихретоковыми преобразователями (ВТП). По рабочему положению ВТП бывают:

- проходные: наружные, внутренние или погружные;
- накладные: круглые или прямоугольные;
- комбинированные.

Преобразователи по виду преобразования параметров объекта в выходную величину:

- трансформаторные;
- параметрические.

По способу соединения обмоток ВТП бывают абсолютные или дифференциальные.

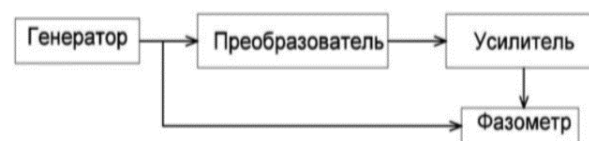


Рис. 6. Структурная схема прибора контроля, основанная на измерении фазы напряжения

В качестве ВТП применяются вихретоковые дефектоскопы ВД-30НК и ВД3-71, вихретоковые толщиномеры Elcometer 415 и ВТ-201, вихретоковый структуроскоп ВС-2010.

ВД-30НК относится к средствам контроля и оценки дефектов. Он предназначен для обнаружения и относительной оценки поверхностных трещин в деталях из ферромагнитных материалов, в том числе с грубо обработанной плоской и

криволинейной поверхностью.

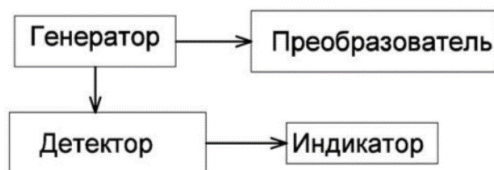


Рис. 7. Структурная схема прибора контроля, основанная на измерении частоты

ВДЗ-71 предназначен для контроля, например, сварных швов, качества элементов энергетического оборудования и другое.

ВС-2010 предназначен для использования в качестве базового блока при оснащении линий непрерывной сортировки труб, прутков и другого. Определяет марку стали, твердость и прочность.

Ниже рассмотрен один из способов использования метода для трансформаторного оборудования.

Регистрация спектров собственного ЭМИ позволяет измерить амплитуду, энергию, частотный диапазон, изменчивость спектра, полимодальность, количество пиков в конкретном частотном диапазоне, количество пиков, превышающих граничный уровень, форму пиков, величину спектральных линий в конкретных характеристических точках и т.п., что является принципиально новым подходом к диагностике ВВЭО. Для каждой единицы ВВЭО информационные частотные диапазоны определяются индивидуально. Ширина частотного диапазона определяется частотными характеристиками резонансных колебательных систем ВВЭО. Пространственная селекция ЭМИ осуществляется с помощью направленной широкополосной антенны, диаграмма направленности которой позволяет выделить обследуемый объект.

Оценка технического состояния ВВЭО по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля предусматривает регистрацию и обработку спектров сигналов в определенном диапазоне частот с помощью оборудования, состоящего из стандартного высокочастотного измерительного прибора, направленной антенны и компьютера с программным обеспечением.

Спектральный состав собственного электромагнитного излучения вблизи каждого вида оборудования зависит от многих факторов - в первую очередь, от амплитудно-частотных характеристик излучения объектов, их связи с

окружающим пространством, скоростей изменения сигналов. С помощью направленных антенн и современной измерительной аппаратуры были выделены спектры сигналов, излучаемых конкретным видом оборудования. Компьютерная обработка результатов измерения позволяет представлять спектры в двухмерном и трехмерном изображениях, вычислять минимальные, максимальные и средние значения, определять излучаемую мощность и т.д. В качестве примера на рисунках представлены двухмерные изображения спектров собственного электромагнитного излучения силовых автотрансформаторов АТ-1 и АТ-2 подстанции 220 кВ в различных диапазонах частот. Регистрация спектров проводилась в зимнее время.

Максимальное излучение наблюдается в диапазонах 16-25, 95-98 и 107-117 МГц, однако в диапазонах 36-38, 63-66, 79-81, 133-134, 164-165 и 192-193 МГц можно наблюдать местные максимумы излучений.

Как видно из графиков, электромагнитные спектры индивидуальны для каждой единицы высоковольтного оборудования. Наиболее интенсивное излучение наблюдается в диапазонах частот 13-27, 36-44, 62-67, 19-83, 95-99, 106-117, 164-166 и 191-194 МГц.

Необходимо отметить заметное различие плотностей излучения автотрансформаторов на частотах 96-99 и 164-166 МГц, что предполагает проведение дополнительных замеров спектров данного оборудования через некоторый промежуток времени.

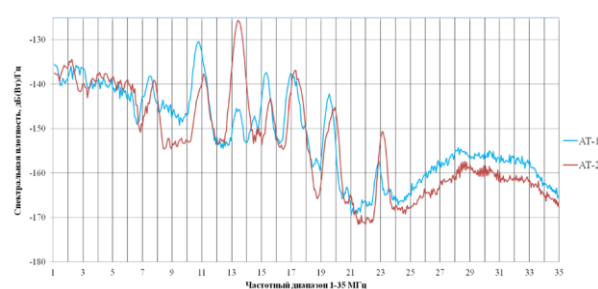


Рис. 8. Спектры ЭМИ в диапазоне 1-35 МГц.

В некоторых частотных диапазонах наблюдаются ярко выраженные провалы амплитуды: 46-57, 83-93, 121-127, 135-164, 167-177 и 179-191 МГц.

Проведённая года регистрация спектров собственного ЭМИ вблизи силовых автотрансформаторов является начальным этапом в проведении электромагнитного контроля вышеуказанного оборудования.

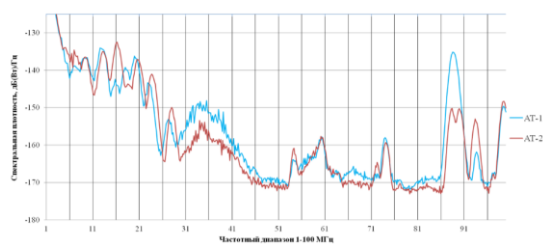


Рис. 9. Спектры ЭМИ в диапазоне 1-100 МГц

Последующий поэтапный контроль, сравнение спектров на каждом этапе обследования позволит своевременно выявлять факты появления грубых дефектов, ставить вопрос об увеличении глубины обследований и необходимости внеплановых испытаний. В дальнейшем, по мере накопления статистических данных и совершенствования методики контроля, использование технологии позволит указывать на вид и место расположения дефекта, в сочетании с другими методами существенно повысить надежность диагностической информации, осуществлять паспортизацию высоковольтного оборудования перед вводом его в эксплуатацию.

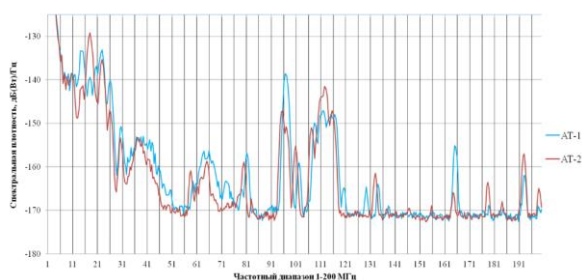


Рис.10. Спектры ЭМИ в диапазоне 1-200 МГц

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что спектры ЭМИ двух трансформаторов практически совпадают во всем диапазоне частот, что говорит о стабильной работе оборудования при примерно одинаковой интенсивности электрофизических процессов в изоляции и элементах конструкции.

Заключение

Рассмотрены результаты исследования, целью которого являлось изучение способов диагностирования технологических объектов с помощью электромагнитных методов. В ходе данного исследования представлены основные схемы для различных методов электромагнитного диагностирования.

Важным фактором, влияющим на работо-

способность машин и механизмов, а также величину издержек на ремонт, является обоснованное определение вида, объема, места и времени ремонта. В связи с этим правильная оценка критериев предельного состояния, регламентирующих обоснованную постановку техники в ремонт с учётом полноты использования технического ресурса её составных частей, позволяет увеличить на 20...30 % фактическую межремонтную наработку и уменьшить на 15...20 % расходы на ремонт. В связи с этим, весьма важной задачей является разработка и исследование методов и технических средств диагностики, способных сократить до минимума простой машин и оборудования, причём создаваемые технические средства должны максимально соответствовать уровню развития современной науки и техники. Необходимо использование передового опыта динамично развивающихся областей науки. Именно такой инновационно-разносторонний подход к разработке технических средств позволит вывести машины и оборудование на более высокий технический уровень, при котором повысится его производительность наряду с уменьшением эксплуатационных затрат.

Список литературы

1. ГОСТ 21105-87 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
2. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
3. ГОСТ 24450-80 Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения.
4. Силин Н.В. Контроль состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам его электромагнитного излучения // Изв. АН "Энергетика" - 2008 - №3. - с.86-91.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
6. Толмачев И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие/ И.И. Толмачев.- Томск: Изд-во ТПУ, 2008.- 216 с.
7. С.Г. Яковлев. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля // СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб, 2003
8. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник /В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др. ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2005 – 656 с.
9. Клюев, В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник. В 2 кн. / под. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1986 – 352 с.
10. https://portal.tpu.ru/_21.10.2022.pdf
11. <https://bim.vc/upload/iblock/a48/p38rks3p9ol1mgc>

etfhcnbu6yvoojpi5.pdf

References

1. GOST 21105-87 Non-destructive testing. Magnetic particle method.
2. GOST 18353-79 Non-destructive testing. Classification of types and methods.
3. GOST 24450-80 Non-destructive magnetic testing. Terms and definitions.
4. Silin N.V. Control of the state of electric power equipment by spectral characteristics of its electromagnetic radiation // Izv.: AN "Energetika" - 2008 - No3. - pp. 86-91.
5. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. – 240 p.
6. Tolmachev I.I. Magnetic Methods of Control and Diagnostics: Textbook / I.I. Tolmachev.-Tomsk: TPU Publishing House, 2008.- 216 p.
7. S.G. Yakovlev. Methods and Equipment of Magnetic and Eddy Current Testing // ETU "LETI", St. Petersburg, 2003
8. Non-destructive testing and diagnostics : reference book / V. V. Klyuev, F. R. Sosnin, A. V. Kovalev et al. ; ed. by V. V. Klyuev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 656 p.
9. Klyuev, V. V. Devices for non-destructive testing of materials and products: a reference book. In 2 books./ed. by V. V. Klyuev. – Moscow: Mechanical Engineering, 1986–352 p.
10. https://portal.tpu.ru/_21.10.2022.pdf
11. <https://bim.vc/upoad/iblock/a48/p38rks3p9ol1mgcetfhcnbu6yvoojpi5.pdf>

УДК 621.039.56

Магнитографический метод диагностирования энергетического оборудования

Н.И. Кузнецова., Сtrykova A.B., Жигайло А.Д.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, nika100452@gmail.com, anna-str7@yandex.ru, zhigailonastya@yandex.ru

Статья поступила 19.02.2025 г.; после доработки 22.02.2025 г. г.

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы раннего обнаружения развивающихся дефектов и использования магнитографического контроля, как одного из методов оценки состояния металлических конструкций и деталей энергетического оборудования. Выполнен анализ информации о магнитографическом методе и проведении диагностирования при помощи магнитографического дефектоскопа. Рассмотрено как, для определения величины дефектов, магнитографические дефектоскопы настраиваются по эталонным лентам, записанным на контрольных образцах сварных соединений. Показано, что при видимом изображении, форма изображения на экране соответствует форме дефекта, а степень почернения характеризует его глубину. Выполнен анализ применения магнитографического метода в области энергетики для диагностирования различных видов оборудования, включая: трубопроводы, турбины, реакторы и прочее оборудование. Анализ показал, что магнитографический метод контроля, относящийся к магнитным, отличается высокой производительностью и экономичностью. Дан вывод, что магнитографический метод имеет высокие перспективы применения, которые сдерживаются отсутствием современных переносных или портативных дефектоскопов, при наличии которых он смог бы составить достойную конкуренцию другим методам неразрушающего контроля

Ключевые слова. Магнитографический метод, магнитографический дефектоскоп, достоинства и недостатки метода.

Magnetographic method of power equipment diagnostics

Kuznetsova N.I., Strykova A.V., Zhigailo A.D.,

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
nika100452@gmail.com, anna-str7@yandex.ru, zhigailonastya@yandex.ru

Received 19.02.2025 y.; received in final form 22.02.2025 y

Annotation

The article discusses the issues of early detection of developing defects and the use of magnetographic testing as one of the methods for assessing the condition of metal structures and parts of power equipment. The analysis of information on the magnetographic method and diagnostics using a magnetographic flaw detector is carried out. It is considered how, in order to determine the magnitude of defects, magnetographic flaw detectors are adjusted according to the reference tapes recorded on the control samples of welded joints. It is shown that in the visible image the shape of the image on the screen corresponds to the shape of the defect, and the degree of blackening characterizes its depth. The analysis of the use of magnetographic methods in the field of power engineering for diagnostics of various types of equipment, including: pipelines, turbines, reactors and other equipment, is carried out. The analysis showed that the magnetographic method of testing, which is related to magnetic ones, is characterized by high productivity and efficiency. The magnetographic method has high prospects for application, which are constrained by the lack of modern portable or portable flaw detectors, in the presence of which it could compete with other methods of non-destructive testing.

Keywords. Magnetographic method, magnetographic defectoscope, advantages and disadvantages of the method.

Введение

Одной из ключевых задач в области энергетики является обеспечение надёжности и безопасности работы оборудования. Для этого необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и диагностирование, которые позволяют выявить проблемы на ранних стадиях и предотвратить аварийные ситуации. Широкое применение в промышленности нашли радиационные, акустические, магнитные, вихретоковые, тепловые и другие методы контроля. Одним из методов магнитного контроля является магнитографический метод, который применяется для обнаружения дефектов в металлических конструкциях и деталях энергетического оборудования.

Цель исследования заключается в анализе информации о магнитографическом методе и проведении диагностирования при помощи магнитографического дефектоскопа.

Основная часть. Все магнитные методы неразрушающего контроля сплошности металла основаны на обнаружении локальных возмущений поля, создаваемых дефектами в намагниченном ферромагнетике. При намагничивании объекта магнитный поток протекает по объекту контроля. В случае нахождения несплошности на пути магнитного потока, возникают поля рассеивания, форма и амплитуда которых несет информацию о размере, характере, и глубине залегания дефекта.

Для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов сварных швов может применяться магнитографический метод, в процессе применения которого поля рассеивания от дефектов фиксируются в виде магнитных отпечатков на эластичном магнитоносителе (магнитной ленте), плотно прижатом к контролируемой поверхности.

Основным элементом магнитографического контроля является магнитная лента, которая сначала служит индикатором поля дефекта, фиксируя это первичное поле в виде пространственного распределения остаточной намагниченности рабочего слоя, а затем сама становится источником вторичного, отображенного магнитного поля, которое, в свою очередь считывается еще одним индикатором. Магнитные ленты могут использоваться многократно и состоят из основы толщиной 100 мкм, сделанной из триацетата или лавсана, и магнитного слоя толщиной 10...20 мкм, состоящего из окиси железа, взвешенной в лаке.

Процесс проведения магнитографического

контроля состоит из двух основных этапов: записи и считывания. Для осуществления первого этапа необходимы устройства намагничивания. Сам этап проводится следующим образом. Магнитную ленту накладывают на контролируемый сварной шов и плотно прижимают к нему резиновым поясом. Далее шов подвергают намагничиванию с одновременной записью полей рассеивания на ленту. На этапе считывания ленту снимают со шва, наматывают на кассету и доставляют к месту, где находится аппаратура для считывания записи. Воспроизведение или считывание записи с магнитной ленты, осуществляется магнитографическим дефектоскопом. А также возможно объединение указанных процессов в едином устройстве (например, с использованием кольцевых лент или магнитных валиков, прокачиваемых по изделию).

Немаловажным объектом при исследовании магнитографического метода контроля является магнитографический дефектоскоп, схема которого представлена на рисунке 1.

В магнитографическом дефектоскопе основным элементом является воспроизводящая магнитная головка, которая преобразует зафиксированные на ленте магнитные сигналы. Индикация сигналов осуществляется при помощи электронно-лучевых трубок. Для определения величины дефектов магнитографические дефектоскопы настраиваются по эталонным лентам, записанным на контрольных образцах сварных соединений.

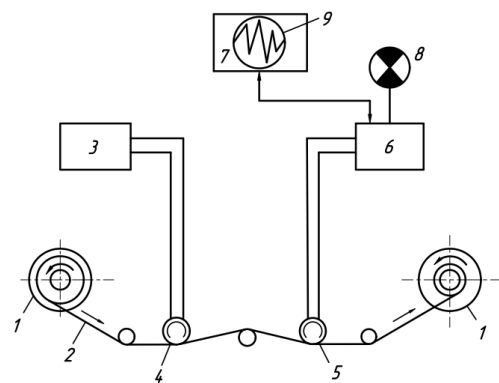


Рис. 1 а) –воспроизведение записи на экране дефектоскопа;

- 1 – кассета с магнитной лентой; 2 – магнитная лента;
- 3 – генератор для стирания записи;
- 4 – «стирающая» головка; 5 – «воспроизводящая» головка;
- 6 – усилитель; 7 – индикаторное устройство; 8 – сигнализатор недопустимости дефекта; 9 – индикаторный экран

Изображение дефектов на экране индика-

тора может быть импульсным (рис. 1 б)) или телевизионным (видимым). При видимом изображении форма изображения на экране соответствует форме дефекта, а степень почернения характеризует его глубину. Трещины характеризуются наличием извилистых темных линий с большой контрастностью, непровары – прямых линий, шлаковые включения – темных пятен и т.п.

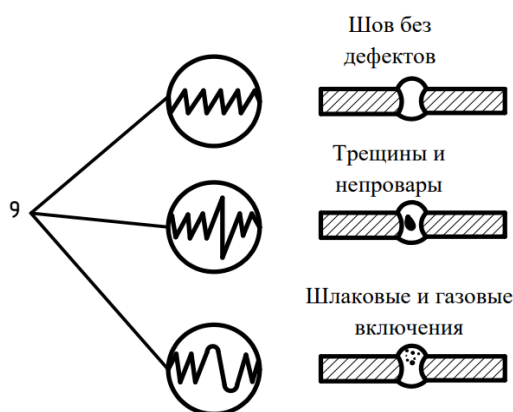


Рис. 1 б) – характер импульсов на индикаторном экране;
9 – индикаторный экран дефектоскопа

Магнитографический метод дефектоскопии широко применяется для контроля качества сварных швов магистральных трубопроводов. При толщине стенок труб от 5 до 12 мм четко выявляются трещины, непровары глубиной более 10% от толщины стенки, цепочки газовых пор и крупные шлаковые включения. Особенно ясно обнаруживаются тонкие продольные трещины и узкие непровары. Острые выступы, наплывы и «усиления шва» высотой более 5 мм на поверхности сварного шва могут вызывать ложные сигналы, поэтому магнитографический метод наиболее успешно контролируются швы, выполненные автоматической сваркой под флюсом, имеющие наиболее ровную поверхность.

Для намагничивания сварных соединений применяют намагничивающие устройства, тип которых в зависимости от диаметра трубы выбирают в соответствии с ВСН 012-88 «Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ».

Перед проведением технического диагностирования магнитографическим методом неразрушающего контроля сварных соединений с поверхности стыкового шва, особенно выполненного ручной электродуговой сваркой, и околошовных зон шириной не менее 20 мм с каждой

стороны валика усиления должны быть устранены грубые неровности (чрезмерная чешуйчатость, затвердевшие брызги расплавленного металла и шлака, а также наплывы), высота которых превышает нормы, указанные в ВСН 012-88 «Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ». Кроме того, с поверхности контролируемых сварных швов и околошовных зон должны быть удалены грязь, снег, лед и другие посторонние наслоения, затрудняющие плотное прилегание магнитной ленты и ухудшающие условия магнитной записи на ней полей дефектов.

В области энергетики магнитографический метод применяется для диагностирования различных видов оборудования, включая:

1. Трубопроводы: Метод используется для выявления трещин и дефектов в стенках трубопроводов, что помогает предотвратить утечки и аварии;
2. Турбины: Магнитографический контроль применяется для обследования лопаток турбин, где он позволяет обнаружить признаки износа и деформации, которые могут привести к снижению эффективности работы или поломке;
3. Реакторы: Магнитография применяется для проверки сваренных соединений и коррозионных повреждений в реакторах, обеспечивая безопасность и надёжность работы;
4. Прочее оборудование: Также магнитография находит применение при проверке теплообменников, компрессоров, насосных агрегатов, высоковольтных выключателей и другого оборудования.

Преимущества магнитографического метода:

1. Высокая разрешающая способность (возможность выявления мелких дефектов), позволяющая регистрировать неоднородные магнитные поля, соизмеримые с размером частиц магнитного слоя ленты (порядка 1 мкм);
2. Возможность исследования внутренних слоёв материала: метод позволяет проверять объекты без повреждения их поверхности, что особенно важно при обследовании труднодоступных участков;
3. Не требует сложного оборудования: для проведения магнитографического исследования не нужно дорогостоящих приборов, достаточно простого магнитографического дефектоскопа;
4. Может применяться для различных матери-

алов: метод подходит для диагностики металлических конструкций из стали, чугуна, алюминия и других материалов.

Однако магнитографический метод имеет и некоторые ограничения:

1. Необходимость вторичного преобразования информации, регистрируются только составляющие магнитных полей вдоль поверхности ленты;
2. Сложность размагничивания и хранения ленты – необходимо предотвращать воздействие внешних магнитных полей;
3. Влияет на электромагнитные свойства объекта: магнитографическое исследование может привести к изменению магнитных свойств объекта, что может повлиять на его работу и привести к дополнительным отказам.

Заключение

Из изложенного выше следует, что методика магнитографического контроля включает следующие операции:

1. Осмотр и подготовка поверхности контролируемого изделия. При этом с поверхности контролируемых швов должны быть удалены остатки шлака, брызги расплавленного металла, грязь и т. д.
2. Наложение на шов отрезка магнитной ленты. Прижим ленты ко шву плоских изделий производят специальной эластичной «подушкой». При контроле кольцевых швов труб, сосудов и других изделий магнитную ленту к поверхности шва прижимают по всему периметру эластичным резиновым поясом.
3. Намагничивание контролируемого изделия при оптимальных режимах в зависимости от типа намагничивающего устройства, толщины сварного шва и его магнитных свойств.
4. Расшифровка результатов контроля, для чего магнитную ленту устанавливают в считывающее устройство дефектоскопа и по сигналам на экранах дефектоскопа производят расшифровку результатов контроля и оценку качества изделия.

Магнитографический метод контроля имеет высокие перспективы применения, которые сдерживаются отсутствием современных переносных или портативных дефектоскопов, при наличии которых он смог бы составить достойную конкуренцию другим методам неразрушающего контроля.

Магнитографический метод контроля, относящийся к магнитным, отличается высокой производительностью и экономичностью. Так, по результатам исследований ряда отраслевых ИМИ, затраты на контроль I м шва стальных листовых конструкций при магнитографическом методе в 2 раза ниже, чем при ультразвуковом и в 10 раз, чем при радиографическом, а время контроля I м шва ниже соответственно в 3 и 13 раз. Однако несмотря на такие достоинства магнитографический метод при контроле сварных соединений применяется редко. Объясняется это во многом его высоким порогом чувствительности и низкой разрешающей способностью, отсутствием представлений о границах применимости метода, наличием помех, сложностью в ряде случаев расшифровки сигналограмм, трудностью определения предварительного режима намагничивания, отсутствием унифицированных контрольных образцов и др. Дальнейшее развитие теории и технологии магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений позволит устранить перечисленные недостатки и создаст базу для расширения промышленного применения метода при контроле стыковых сварных соединений.

Список литературы

1. ГОСТ 24450-80 Контроль ГОСТ 24450-80 Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения.
2. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения
3. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
4. ГОСТ Р 53697-2009 Контроль неразрушающий. Основные термины и определения.
5. ГОСТ 25225-82 Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод
6. Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Методы диагностики и контроля энергооборудования». Электронный ресурс. URL: https://kme.bntu.by/images/doc/EUMK_Metodi_Kontrolja.pdf
7. Новиков В.А. Диссертация на тему «Развитие магнитографического метода и повышение его эффективности при контроле качества сварных соединений», 1999 г.
8. С.Г. Яковлев. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля // СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2003
9. Методы магнитного и электромагнитного контроля: Методические указания к лабораторным работам / Сост. Коновалов Р.С., Коновалов С.И.

- СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 40с.
10. Неразрушающий контроль в 5 книгах. Книга 3. Электромагнитный контроль // Под ред. В.В. Сухорукова, М.: Высшая школа, 1992.
 11. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах // Под общей ред. В.В. Ключева. НИИИИ МНПО «Спектр», Том 6, Изд-во: Машиностроение, 2006.
 12. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник /В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др. ; под ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005 – 656 с

References

1. GOST 24450-80 Non-destructive magnetic testing. Terms and definitions.
2. GOST 20911-89 Technical diagnostics. Terms and Definitions
3. GOST 18353-79 Non-destructive testing. Classification of types and methods.
4. GOST R 53697-2009 Non-destructive testing. Basic terms and definitions.
5. GOST 25225-82 Non-destructive testing. Seams of welded joints of pipelines. Magnetographic method
6. Electronic Educational and Methodological Complex for the Academic Discipline "Methods of Diagnostics and Control of Power Equipment". Electronic resource. URL: https://kme.bntu.by/images/doc/EUMK_Metodi_Kontrolja.pdf
7. Novikov V.A. Dissertation on the topic "Development of the magnetographic method and increasing its efficiency in quality control of welded joints", 1999
8. S.G. Yakovlev. Methods and Equipment of Magnetic and Eddy Current Testing // ETU "LETI", St. Petersburg, 2003
9. Methods of Magnetic and Electromagnetic Control: Guidelines for Laboratory Work. Konovalov R.S., Konovalov S.I. St. Petersburg: ETU "LETI" Publ., 2013. – 40 p.
10. Non-destructive testing in 5 books. Book 3. Electromagnetic control // Ed. by V.V. Sukhorukov, Moscow: Vysshaya shkola, 1992.
11. Non-destructive testing. Handbook in 8 volumes // Under the general editorship of V.V. Klyuev. NIIN MNPO "Spektr", Vol. 6, Mashinostroenie Publ., 2006.
12. Non-destructive testing and diagnostics : reference book / V. V. Klyuev, F. R. Sosnin, A. V. Kovalev et al. ; ed. by V. V. Klyuev. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005 – 656 p

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК: 621.039.588

Исследование работы реакторной и турбинной установок в переходных режимах при сбросе паровой и электрической нагрузок

Браславский Ю.В.¹, Сукрушев А.В.¹, Губин А.В.¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: avsukrushev@mail.sevsu.ru, yvbroslovsky@mail.sevsu.ru, avgubin@mail.sevsu.ru

Статья поступила 13.02.2025 г.; после доработки 14.02.2025 г.

Аннотация

В статье представлено исследование двух режимов работы ядерной энергетической установки с водо-водяным реактором при закрытии БЗОК и некорректная работа регулятора давления пара. Приведена хронологическая последовательность событий данных переходных процессов, а также графические зависимости основных параметров, влияющих на безопасность установки. По полученным результатам доказано, что автоматические системы безопасности обеспечивают переход установки в безопасное состояние.

Ключевые слова: энергетика, ядерная энергетическая установка, безопасность, парогенератор, водоводяной реактор
Для цитирования

Study of the operation of reactor and turbine units in transient modes during the discharge of steam and electrical loads

Braslavskiy Y.V.¹, Sukrushev A.V.¹, Gubin A.V.¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: avsukrushev@mail.sevsu.ru, yvbroslovsky@mail.sevsu.ru, avgubin@mail.sevsu.ru

Received 13.02.2025 y.; received in final form 14.02.2025 y.

Abstract

The article presents a study of two modes of operation of a nuclear power plant with a water-cooled reactor when the quick-acting shut-off valve is closed and the steam pressure regulator operates incorrectly. A chronological sequence of events of these transient processes is given, as well as graphical dependencies of the main parameters affecting the safety of the plant. Based on the results obtained, it is proven that automatic safety systems ensure the transition of the plant to a safe state.

Keywords: energy, nuclear power plant, safety, steam generator, PWR

Введение

Атомная энергетика, несмотря на относительно новизну данного направления, активно

совершенствуется. В режиме нормальной эксплуатации, атомные электростанции не несут никакой опасности ни для человека, ни для окружающего его мира. Тем не менее, при возникновении аварийных ситуаций с выбросом радиоактивных веществ за установленные пределы,

несут пагубные последствия различных масштабов. Несмотря на постоянную модернизацию технологий, вероятность возникновения аварии всегда сохраняется, следовательно, следует уделять особенное внимание анализу принимаемых в проекте решений как с точки зрения эффективности, так и с точки зрения безопасности [1].

Особое внимание в работе ядерных энергетических установок (ЯЭУ) уделяется переходным режимам работы реакторной и турбинной установок, особенно в условиях сброса паровой и электрической нагрузок. Такие условия эксплуатации могут привести, например, к повреждению оборудования, нарушению герметичности оболочек ТВЭЛ, изменению реактивности и так далее [2].

Целью данного исследования является анализ переходных процессов реакторной и турбинной установок при сбросе паровой и электрической нагрузок на номинальном уровне мощности. В рамках поставленной цели выполнены следующие задачи:

- определены начальные условия проведения эксперимента;
- составлена модель ситуации и сделан вывод об обеспечении безопасности ядерной установки.

Исследование рассматриваемого режима

Наиболее вероятные случаи, когда может возникнуть сброс паровой и электрической нагрузки это:

- закрытие быстродействующего запорно-отсечного клапана (БЗОК) работающей петли;
- некорректная работа регулятора давления пара, что приводит к прикрытию стопорно-регулирующего клапана (СРК) до уровня собственных нужд или Х.Х (снижение расхода пара на турбину).

В анализ первого режима входит дополнительный отказ – потеря внешнего энергоснабжения.

Главной особенностью данного режима является рост давления в парогенераторе (главный паровой коллектор), при котором достигается уставка срабатывания аварийной защиты (АЗ), если не сработает ускоренная предупредительная защита (УПЗ) [3].

При работе на мощности, закрытие БЗОК может произойти из-за прохождения ложного сигнала «разрыв второго контура». В зависимости от того, на какой СБ формируются сигналы,

процесс протекает с отключением или без отключения главного циркуляционного насоса (ГЦН). БЗОК может быть закрыт оператором с блочного пункта управления (БПУ) или резервного пункта управления (РПУ) или самопроизвольно закрыться из-за неисправности УКТС.

Признаки режима:

- закрытие БЗОК на мнемосхеме БПУ;
- резкий рост давления в одном ПГ и наибольшее снижение давления в ГПК;
- сигнализация ПЗ-1 и работа регулятора ограничения мощности (РОМ) по факту отключения ГЦН;
- перевод автоматического регулятора мощности (АРМ) в режим «Н», электрогидравлическая система регулирования (ЭГСР) в режим «РД».

Моделирование режимов и анализ полученных результатов

Хронологическая последовательность событий (срабатывание систем и устройств), а также блокировки и уставки, вызывающие это срабатывание для рассматриваемого режима (номинальные значения) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Хронологическая последовательность событий режима закрытия БЗОК

Момент времени, с	Событие
0,0	Исходное состояние – работа реакторной установки (РУ) на полной мощности
0,1	Исходное событие – Начало ложного закрытия БЗОК ПГ 2
0,4	Полное закрытие БЗОК ПГ 2
0,9	Отключение ГЦНА аварийной петли Начало формирования сигнала на автоматическое снижение уставки АЗ по уровню плотности потока тепловых нейтронов со 107 до 74 % $N_{ном}$, (при трех работающих ГЦНА) со скоростью 0,5 % $N_{ном}/с$
2,8	Начало автоматического снижения уставки АЗ по уровню плотности потока тепловых нейтронов со 107 до 74 % $N_{ном}$ (при трех работающих ГЦНА) со скоростью 0,5 % $N_{ном}/с$
3,6	Давление пара в паропроводе ПГ 2 более 7,80 МПа Начало формирования сигнала на открытие БРУ-А (на открытие БРУ-А ПГ 2 наложен отказ)
5,7	Давление пара в паропроводе ПГ 2 более 8,10 МПа при температуре теплоносителя в горячих нитках петель более 150 °С Начало формирования первого сигнала на срабатывание АЗ (в анализе не учитывается)

15,9	Формирование второго сигнала на срабатывание АЗ по факту отключения ГЦНА петли 2 при нейтронной мощности более 90 % N, через 15,0 с. с момента отключения ГЦНА
16,4	Начало движения органов СУЗ Потеря внешнего энергоснабжения: • закрытие стопорных клапанов турбины; • отключение оставшихся ГЦНА; • отключение основной и вспомогательной питательной воды.
21,1	Давление пара в паропроводах ПГ 1, 3 и 4 более 7,80 МПа Начало формирования сигнала на открытие БРУ-А на паропроводах этих ПГ
22,6	Начало открытия БРУ-А на паропроводах ПГ 1, 3 и 4
26,8	Давление пара в паропроводах ПГ 1, 3 и 4 более 8,80 МПа Начало формирования сигнала на открытие первого ИПУ ПГ 1, 3 и 4
28,3	Начало открытия первого ИПУ ПГ 1, 3 и 4
35,7	Давление пара в паропроводе ПГ 2 более 8,80 МПа Начало формирования сигнала на открытие первого ИПУ ПГ 2
36,9	Давление пара в паропроводах ПГ 1, 3 и 4 менее 7,95 МПа Закрытие первых ИПУ ПГ 1, 3 и 4
37,2	Начало открытия первого ИПУ ПГ 2 и дальнейшая периодическая его работа
1107,2	Снижение уровня в ПГ 1 на 900 мм ниже номинального Начало формирования сигналов на: • закрытие БЗОК на паропроводе парогенератора; • подключение АПЭН к ПГ 1
1108,7	Начало закрытия БЗОК на паропроводе ПГ 1
1112,7	Полное закрытие БЗОК на паропроводе ПГ 1
1154,3	Снижение уровня в ПГ 3, 4 на 900 мм ниже номинального Начало формирования сигналов на: • закрытие БЗОК на паропроводе парогенератора; • подключение АПЭН к ПГ 3, 4
1155,8	Начало закрытия БЗОК на паропроводе ПГ 3 и 4
1159,8	Полное закрытие БЗОК на паропроводе ПГ 3 и 4
1255,8	Начало подачи аварийной питательной воды в ПГ 3
1275,8	Выход на полную производительность АПЭН с подачей в ПГ 3
2471,9	Снижение уровня в ПГ 2 на 900 мм ниже номинального
2571,9	Начало формирования сигнала на подключение АПЭН к ПГ 2
7000,0	Окончание счета

Оценка приемочных критериев проводилась путем сравнения максимальных значений параметров, определенных в результате расчетного

анализа, с приемочными критериями, принятыми в проекте для рассматриваемого исходного события.

Кризис теплоотдачи не достигается с вероятностью не менее 95 % для самого горячего тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) – минимальный запас до кризиса теплоотдачи в активной зоне не более 1,0.

Минимальный по активной зоне коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи в режиме составляет 1,154.

Таким образом, в рассматриваемом режиме коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи не достигает предельного значения (1,0), что свидетельствует о выполнении определяющего приемочного критерия [4].

Давление в системе теплоносителя первого контура и паропроводах парогенераторов не должно превышать расчетное более чем на 15 %, то есть давление первого контура не должно превышать 20,290 МПа и давление второго контура не должно превышать 9,315 МПа.

Максимальное давление первого контура составляет 18,60 МПа, максимальное давление во втором контуре составляет 9,17 МПа. Таким образом, предельные значения давления первого и второго контуров не достигаются и приемочный критерий выполняется.

Топливные таблетки не плавятся даже локально. Температура плавления ТВЭЛа составляет 2540 °С для «выгоревшего» топлива и 2840 °С для «свежего» топлива. Температура плавления ТВЭГа составляет соответственно 2260 и 2300 °С. Радиально-усредненная энтальпия топлива не более 586 Дж/г [5].

В проекте предусмотрено два бака запаса обессоленной воды объемом 700 м³ каждый. В рассмотренных вариантах за время работы двух аварийных питательных электронасосов (АПЭН) масса питательной воды, поданная в ПГ 2, 3 и 4 составляет 169,8 т.

Таким образом, запас питательной воды ещё достаточный для продолжительного отвода тепла вторым контуром. Оценка показывает, что запаса воды достаточно для обеспечения отвода тепла, как минимум в течение 8,2 ч. Учитывая уменьшение в течение времени величины остаточных тепловыделений и возможность подпитки баков аварийной питательной воды от баков запаса обессоленной воды нормальной эксплуатации, может быть обеспечено значительно большее время отвода остаточных тепловыделений за счёт работы сбросных устройств второго контура и подачи питательной воды от АПЭН.

На рисунке 1 представлена зависимость изменения мощности с течением времени, происходящее после закрытия БЗОК.

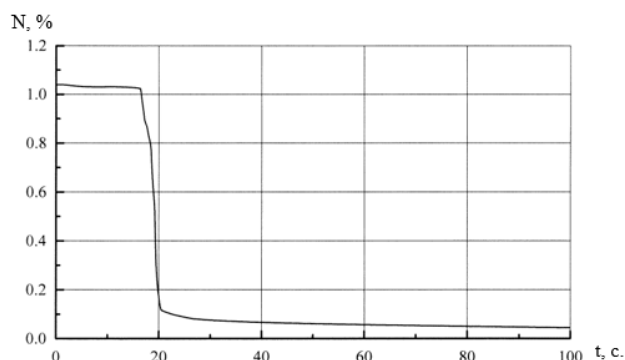


Рис. 1. Относительная мощность тепловыделений в активной зоне

Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи является важнейшим параметром, который отражает безопасность работы ЯЭУ. Динамика изменения данного параметра представлена на рисунке 2.

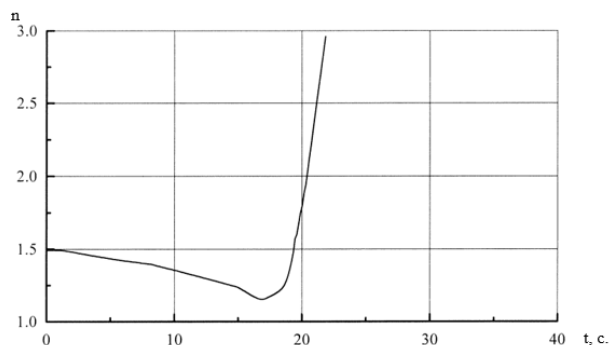


Рис. 2. Минимальный запас до кризиса теплоотдачи

Расход теплоносителя через активную зону также является немаловажным параметром для безопасности работы установки. Изменение данного параметра представлено на рисунке 3.

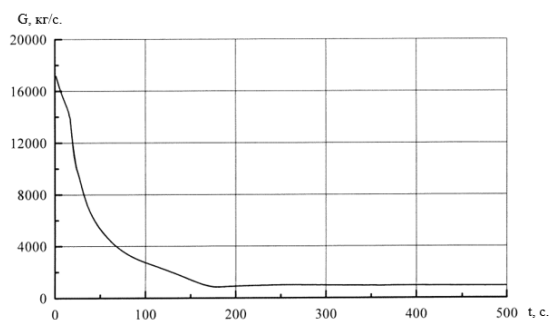


Рис. 3. Изменения расхода теплоносителя после закрытия БЗОК

На рисунке 4 отражена тенденция изменения давления в ПГ, БЗОК которого закрылся, в сравнении с остальными ПГ.

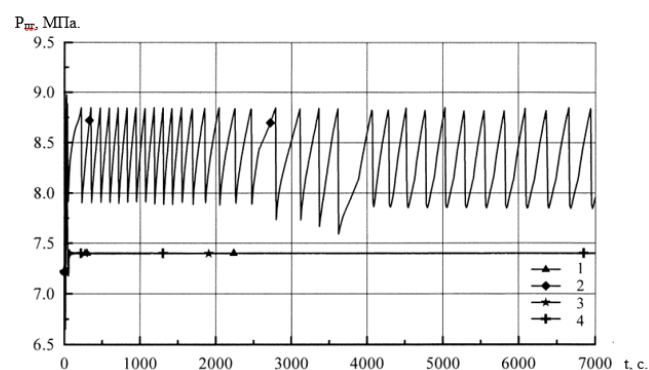


Рис. 4. График изменения давления в ПГ: 2 — при закрытом БЗОК, 1,3,4 — при незакрытом БЗОК

Вышеприведенные зависимости указывают на то, что предельные значения теплоносителя первого и второго контуров не достигаются, следовательно, приемочный критерий выполняется. Анализ результатов расчета показывает, что в течение рассмотренного периода протекания процесса, активная зона остается заполненной водой. В результате этого, для всех групп ТВЭЛов обеспечивается расхолаживание топлива и оболочек ТВЭЛов, условия для кризиса теплообмена не достигаются, пароциркониевая реакция оболочек отсутствует.

Проведенный расчетный анализ говорит о том, что защитные автоматические действия систем безопасности переводят реакторную установку в безопасное состояние. Приемочные критерии, характеризующие безопасность РУ в рассмотренном режиме, выполняются.

Режим некорректной работы регулятора давления пара (прикрытие СРК)

В данном разделе представлен анализ режима с неисправной работой или отказом регулятора давления пара, приводящий к снижению расхода пара на турбину.

В таблице 2 приведена хронологическая последовательность событий (срабатывание систем и устройств), а также блокировки или уставки, вызывающие это срабатывание для рассматриваемого режима (номинальные значения). В результате исходного события происходит резкое повышение давления во втором контуре вплоть до уставки на открытие быстродействующей редукционной установки сброса пара в атмосферу (БРУ-А) на паропроводах ПГ 1, 3, 4

(на открытие БРУ-А на паропроводе ПГ 2 наложен отказ).

Таблица 2. Хронологическая последовательность событий режима некорректной работы регулятора давления пара

Момент времени, с	Событие
0,0	Исходное событие — начало снижения расхода пара на турбину на 80 % от номинального значения
4,1	Давление пара в паропроводах всех ПГ более 7,8 МПа Начало формирования сигнала на открытие БРУ-А на паропроводах ПГ 1-4
5,6	Начало открытия БРУ-А на паропроводах ПГ 1, 3 и 4 и дальнейшая работа в режиме регулирования (на открытие БРУ-А на паропроводе ПГ 2 наложен отказ)
7,6	Давление пара в паропроводах всех ПГ более 8,1 МПа при температуре теплоносителя в горячих нитках петель более 150 °С Начало формирования первого сигнала на срабатывание АЗ (в анализе не учитывается)
9,8	Давление на выходе из активной зоны - 17,60 МПа при температуре теплоносителя в горячих нитках петель более 150 °С Начало формирования второго сигнала на срабатывание АЗ
11,3	Начало движения органов СУЗ Потеря внешнего электроснабжения: • закрытие стопорных клапанов турбины; • отключение ГЦНА; • отключение основной и вспомогательной питательной воды
12,1	Давление пара в паропроводе ПГ 2 более 8,80 МПа Начало формирования сигнала на открытие первого ИПУ ПГ на паропроводе ПГ 2
12,2	Давление пара в паропроводах ПГ 1, 3 и 4 более 8,80 МПа Начало формирования сигнала на открытие первых ИПУ ПГ на паропроводах ПГ 1, 3 и 4
12,6	Давление над активной зоной более 18,60 МПа Начало формирования сигнала на открытие рабочих ИПУ КД (на открытие контрольного ИПУ КД наложен отказ)
13,5	Давление пара в паропроводе ПГ 2 более 9,00 МПа Начало формирования сигнала на открытие второго ИПУ ПГ на паропроводе ПГ 2
13,6	Давление пара в паропроводах ПГ 1, 3 и 4 более 9,00 МПа Начало формирования сигнала на открытие вторых ИПУ ПГ на паропроводах ПГ 1, 3 и 4 Начало открытия первого ИПУ ПГ на паропроводе ПГ 2
13,7	Начало открытия первых ИПУ ПГ на паропроводах ПГ 1, 3 и 4

	Начало открытия рабочих ИПУ КД
15,0	Начало открытия второго ИПУ ПГ на паропроводе ПГ 2
15,1	Начало открытия вторых ИПУ ПГ на паропроводах ПГ 1, 3 и 4
18,3	Давление над активной зоной менее 17,70 МПа Закрытие рабочих ИПУ КД
22,7	Давление пара в паропроводах ПГ 1, 3 и 4 менее 7,95 МПа Закрытие первых и вторых ИПУ ПГ на паропроводах ПГ 1, 3 и 4
23,0	Давление пара в паропроводе ПГ 2 менее 7,95 МПа Закрытие первого и второго ИПУ ПГ на паропроводе ПГ 2
1270,9	Снижение уровня в ПГ 1 на 900 мм ниже номинального Начало формирования сигналов на: • закрытие БЗОК парогенератора; • подключение АПЭН к ПГ 1 (в анализе принят отказ АПЭН)
1272,4	Начало закрытия БЗОК на паропроводе ПГ 1
1276,4	Полное закрытие БЗОК на паропроводе ПГ
1329,6	Снижение уровня в ПГ 3 и 4 на 900 мм ниже номинального Начало формирования сигналов на: • закрытие БЗОК парогенератора; • подключение АПЭН к ПГ 3 и 4
1331,1	Начало закрытия БЗОК на паропроводах ПГ 3 и 4
1334,0	Снижение уровня в ПГ 2 на 900 мм ниже номинального Начало формирования сигналов на: • закрытие БЗОК парогенератора; • подключение АПЭН к ПГ 2 (в анализе принят отказ АПЭН)
1335,1	Полное закрытие БЗОК на паропроводах ПГ 3 и 4
1335,5	Начало закрытия БЗОК на паропроводе ПГ 2
1339,5	Полное закрытие БЗОК на паропроводе ПГ 2
1431,1	Начало подачи аварийной питательной воды в ПГ 3 и 4
1451,1	Выход на полную производительность АПЭН
1599,3 – 5000,0	Давление пара в паропроводе ПГ 2 более 8,80 МПа Начало открытия контрольного ИПУ ПГ 2 и его дальнейшая периодическая работа
5000,0	Окончание счета

Дальнейшее повышение давления во втором контуре приводит к формированию сигнала на срабатывание аварийной защиты реактора по факту повышения давления в ПГ до 8,1 МПа. Однако, согласно принятым допущениям, первый сигнал на срабатывание аварийной защиты в анализе пропускается.

Ухудшение отвода тепла вторым контуром вызывает рост параметров первого контура. Увеличение давления на выходе из активной зоны до 17,60 МПа приводит к формированию второго сигнала на срабатывание АЗ. С учётом инерционности измерительного канала с и времени прохождения сигнала по электрическим цепям 0,5 с падение органов регулирования начинается на 1 с. После срабатывания АЗ мощность реактора снижается до уровня остаточных тепловыделений. Минимальный запас до кризиса теплоотдачи составляет 1,222 и достигается на 13,3 с.

Согласно принятому сценарию в момент начала движения органов СУЗ по факту срабатывания АЗ реактора происходит потеря внешнего электроснабжения станции, что приводит к закрытию стопорных клапанов турбины, отключению всех ГЦНА и отключению основной питательной воды. После выбега ГЦНА в первом контуре устанавливается естественная циркуляция.

На 12,6 с переходного процесса давление в первом контуре достигает уставки на открытие двух рабочих ИПУ КД (на открытие контрольного ИПУ КД наложен отказ). Открытие ИПУ КД происходит с задержкой 1,5 с. Имеет место однократное срабатывание рабочих ИПУ КД в течение 4,2 с. Максимальное значение давления первого контура (в холодной нитке ГЦТ) достигается на 14,6 с и составляет 19,59 МПа.

Давление во втором контуре достигает уставок на открытие первых и вторых ИПУ на паропроводах всех ПГ. Максимальное давление во втором контуре достигается на 14,6 с и составляет 9,13 МПа.

Наличие остаточных тепловыделений и отсутствие подачи питательной воды в парогенераторы приводит к снижению уровня котловой воды в них и, как следствие, к

существенному разогреву первого контура. Снижение уровня котловой воды в ПГ продолжается вплоть до уставки на закрытие БЗОК и подключения аварийных питательных электронасосов (на 900 мм ниже номинального значения). В соответствии с принятым сценарием учитывается отказ одного АПЭН и вывод в ремонт второго АПЭН, поэтому подача аварийной питательной воды начинается на 143 с в ПГ 3 и 4. В результате работы АПЭН уровень в ПГ 3 и 4 восстанавливается до номинального значения.

После полного закрытия БЗОК на паропроводах парогенераторов давление в ПГ 1, 3 и 4 поддерживается работой БРУ-А на уровне давления регулирования, а давление в ПГ 2 возрастает

вплоть до уставки на открытие контрольного ИПУ ПГ. В дальнейшем будет происходить циклический процесс срабатывания ИПУ ПГ 2 с постепенным снижением частоты, что обусловлено снижением мощности остаточных тепловыделений активной зоны.

Оценка приёмочных критериев проводилась путем сравнения максимальных значений параметров, определенных в результате расчётного анализа, с приёмочными критериями, принятыми в проекте для рассматриваемого исходного события [6].

Кризис теплоотдачи не достигается с вероятностью не менее 95 % для самого горячего твэла (минимальный запас до кризиса теплоотдачи в активной зоне более 1,0).

Минимальный по активной зоне коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи в режиме составляет 1,222. Таким образом, в рассматриваемом режиме коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи не достигает предельного значения (1,0), что свидетельствует о выполнении приёмочного критерия.

Давление в системе теплоносителя первого контура и паропроводах парогенераторов не должно превышать расчётное более чем на 15 %, то есть давление первого контура не должно превышать 20,29 МПа и давление второго контура не должно превышать 9,315 МПа.

Максимальное давление первого контура составляет 19,59 МПа, максимальное давление во втором контуре составляет 9,13 МПа. Таким образом, предельные значения давления первого и второго контуров не достигаются и приёмочный критерий выполняется.

Топливные таблетки не плавятся даже локально. Температура плавления твэла составляет 2540 °С для «выгоревшего» топлива и 2840 °С для «свежего» топлива. Температура плавления твэга составляет соответственно 2260 и 2300 °С. Радиально-усредненная энтальпия топлива не более 586 Дж/г [7-8].

Как видно из результатов расчёта, температура топлива в режиме не превышает начального значения, а, следовательно, и максимальная радиально-усредненная по сечению топлива энтальпия так же не превысит начального значения. Таким образом, приёмочные критерии выполняются.

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи от времени.

Давление в первом контуре влияет на запас до кризиса теплоотдачи, что делает его важным

параметром для анализа. Зависимость этого критерия от времени представлен на рисунках 6 и 7.

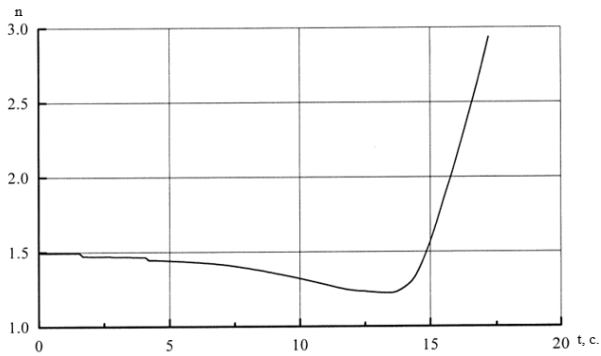


Рис. 5. Минимальный запас до кризиса теплоотдачи

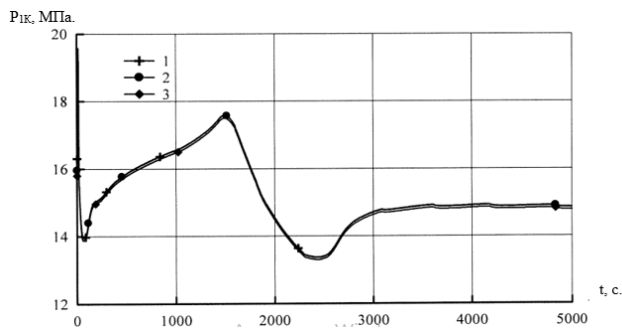


Рис. 6. Зависимости изменения давления 1 контура:
1 – давление в холодной нитке ГЦТ; 2 – давление на выходе из активной зоны;
3 – давление в КД.

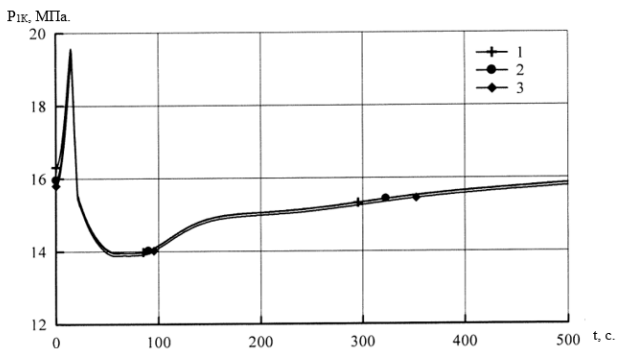


Рис. 7. Зависимости изменения давления 1 контура:
1 – давление в холодной нитке ГЦТ; 2 – давление на выходе из активной зоны;
3 – давление в КД.

Температура оболочки ТВЭЛ также является немаловажным фактором, так как превышение предельных значений приводит к увеличению пластичности материала, что по итогу мо-

жет привести к их разгерметизации [9]. На рисунке 8 представлена зависимость данного параметра от времени.

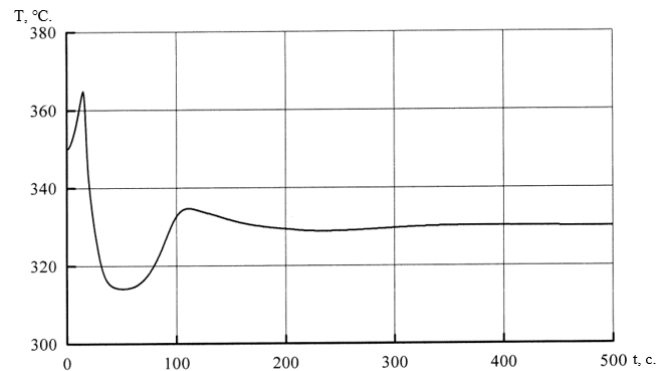


Рис. 8. Максимальная по активной зоне температура оболочек ТВЭЛ

На рисунках 9-10 представлены графики изменения давления в ПГ в течение времени, так как данный параметр также имеет важное значение в области безопасности работы ЯЭУ.

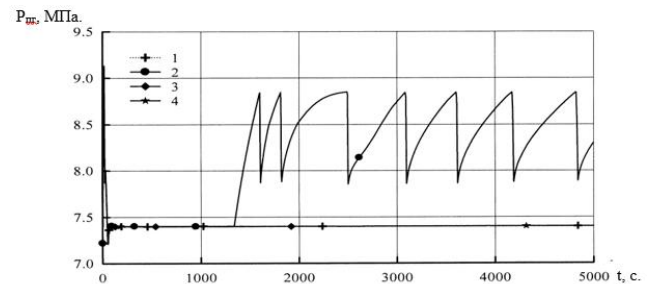


Рис. 9. График изменения давления в ПГ:
1,3,4 – ПГ 1,3,4; 2 – ПГ 2

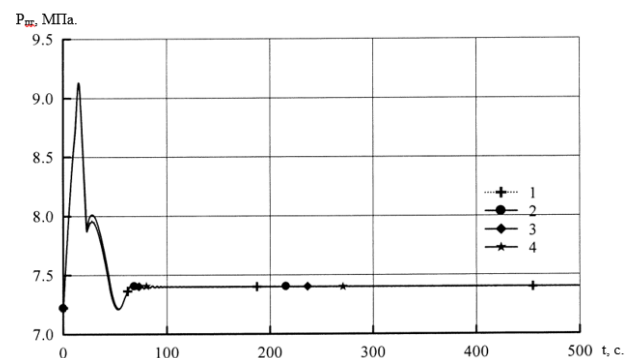


Рис. 10. График изменения давления в ПГ:
1,3,4 – ПГ 1,3,4; 2 – ПГ 2

Расчётный анализ показал, что защитные автоматические действия систем безопасности переводят реакторную установку в безопасное со-

стояние. Приемочные критерии, характеризующие безопасность РУ в рассмотренном режиме, выполняются.

Заключение

Таким образом, вышеприведенные исследования по анализу переходных процессов реакторной и турбинной установок при сбросе паровой и электрической нагрузок говорят о том, что действия систем безопасности успешно переводят реакторную установку ВВЭР в безопасное состояние в обоих режимах: будь то закрытие БЗОК или некорректная работа регулятора давления пара.

Список литературы

1. Г. В. Вагнер, К. В. Храмов, В. В. Немрец, А. А. Снежко ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-bezopasnosti-aes> (дата обращения: 13.02.2025).
2. Бекман, И. Н. Ядерные технологии : учебник для среднего профессионального образования / И. Н. Бекман. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 500 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-14183-2. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/544206> (дата обращения: 13.02.2025).
3. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЗАПОРНО-ОТСЕЧНОЙ КЛАПАН - руководство по эксплуатации NI.006 РЭ – 74 с.
4. Правила радиационной безопасности при эксплуатации атомных станций ПРБ АС-99 с.
5. Расчёт теплогидравлический Часть 11 - Снижение расхода пара на турбину (вследствие неисправной работы или отказа регулятора давления пара) – 60 с.
6. Расчёт теплогидравлический Часть 12 - Ложное закрытие быстродействующего запорного отсекающего клапана – 59 с.
7. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции НП-012-16.
8. Браславский Ю.В. Альбом технологических схем реакторного отделения АЭС с ВВЭР-1000 (В-320) / Ю.В. Браславский, В.Ф. Дудаков. — Севастополь.: СТУЭиП, 2010. — 78 с.
9. Долганов К.С. Расчетное исследование раздутия и разрыва оболочек твэлов ВВЭР и PWR в экспериментах с различными условиями нагружения / К. С. Долганов, А. Е. Тарасов, А. В. Капустин, Д. Ю. Томащик // Известия РАН. Энергетика. — 2023. — № 3. — С. 57-78.

References

1. G. V. Wagner, K. V. Khramov, V. V. Nemrets, A. A. Snezhko NUCLEAR POWER PLANT SAFETY ISSUES // Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. 2022. No. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-bezopasnosti-aes> (accessed: 13.02.2025).
2. Beckman, I. N. Nuclear Technologies: a textbook for secondary vocational education / I. N. Beckman. - 2nd ed., corrected. and additional. - Moscow: Publishing house Yurait, 2024. - 500 p. - (Professional education). - ISBN 978-5-534-14183-2. - Text: electronic // Educational platform Yurait [website]. — URL: <https://urait.ru/bcode/544206> (date accessed: 13.02.2025).
3. FAST-ACTING SHUT-OFF VALVE - operating manual NI.006 RE - 74 p.
4. Radiation safety rules for the operation of nuclear power plants PRB AS-99.
5. Thermal-hydraulic calculation Part 11 - Reduction in steam flow to the turbine (due to malfunction or failure of the steam pressure regulator) - 60 p.
6. Thermal-hydraulic calculation Part 12 - False closure of the fast-acting shut-off valve - 59 p.
7. Safety rules for decommissioning a nuclear power plant unit NP-012-16.
8. Braslavsky Yu.V. Album of process flow charts of the reactor compartment of NPPs with WWER-1000 (V-320) / Yu. V. Braslavsky, V. F. Dudakov. - Sevastopol.: SNUNEP, 2010. - 78 p.
9. Dolganov K. S. Computational study of the swelling and rupture of WWER and PWR fuel cladding in experiments with different loading conditions / K. S. Dolganov, A. E. Tarasov, A. V. Kapustin, D. Yu. Tomashchik // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. - 2023. - No. 3. - P. 57-78.

УДК 622.273:65.011.12

Оценка воздействия на окружающую среду кучного выщелачивания урана из отвалов уранодобывающих предприятий

С.А. Котельникова, А.М. Акимов

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: cvetlana.83@inbox.ru*

Статья поступила 04.02.2025 г.; после доработки 06.02.2025 г.

Аннотация

*Рассмотрены основные потенциальные источники и виды экологического воздействия на окружающую среду, а также последствия экологического воздействия в процессе кучного и шахтного выщелачивания урана.**Ключевые слова:* кучное выщелачивание, шахтное выщелачивание, геохимические процессы.

Environmental impact assessment of heap leaching of uranium from the dumps of uranium mining enterprises

S.A. Kotelnikova, A.M. Akimov

Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russiae-mail: cvetlana.83@inbox.ru

Received 04.02.2025 y.; received in final form 06.02.2025 y.

Abstract

*The main potential sources and types of environmental impacts on the environment, as well as the consequences of environmental impacts in the process of heap and mine leaching of uranium, are considered.**Keywords:* heap leaching, mine leaching, geochemical processes.

Введение

Шахтное выщелачивание (ШВ) урана из руд непосредственно в подземных условиях с некоторым его средним содержанием, кучное выщелачивание (КВ) из горных отвалов уранодобывающих шахт в сочетании с переработкой богатых руд на ГМЗ позволяет достичь наиболее полного и экономичного использования сырьевых ресурсов урана. При этом упрощаются и удешевляются системы добычи урана и транспортировки руды, существенно уменьшаются энергетические затраты на ее дробление и измельчение, на подогрев рудной пульпы при автоклавном выщелачивании урана и откачку отходов в хвостохранилище. Вместе с тем технологические процессы

ШВ и КВ связаны с созданием рабочих площадок для КВ, подземных блоков для ШВ, орошением штабелей кислотами, сбором продуктивных растворов, их утечками, загрязнением подземных вод, земной поверхности, приземной атмосферы и донными отложениями поверхностных водостоков. В связи с вышеизложенным рассмотрим оценку воздействия на окружающую среду шахтного и кучного выщелачивания урана из балансовых, бедных и забалансовых руд (отвалов уранодобывающих шахт).

Постановка цели и задач научного исследования

Основными потенциальными источниками

экологического воздействия на окружающую среду при КВ и ШВ урана являются:

- рабочие площадки и остаточные кучи (штабеля) – источник отчуждения земель и нарушения природного ландшафта (КВ);
- остаточные производственные растворы – источник загрязнения поверхностных (КВ) и подземных (КВ, ШВ) вод, оказывающий косвенное воздействие на загрязнение земной поверхности и донных отложений;
- утечки кислот и производственных растворов – источник загрязнения поверхностных и подземных вод, а также земной поверхности (КВ) и косвенно атмосферного воздуха (КВ);
- свалки и скрап.

Основные виды экологического воздействия следующие:

- просачивание остаточных рабочих растворов в подземные воды (последствия нарушения контроля движения рабочих растворов, неисправностей трубопроводов, нарушения подстилающей штабеля экранирующей поверхности);
- разливы кислот и рабочих растворов на земной поверхности и в подземных горных выработках;
- ветровая и водная эрозии штабеля;
- образование свалок.

Объекты техногенного воздействия – это природные и антропогенные объекты окружающей среды, подверженные воздействию техногенных источников.

Индикатор техногенного воздействия – показатель воздействия техногенного источника, характеризующий модель загрязнения, нарушения или изъятия в объекте окружающей среды. Применительно к загрязнению выделяют потенциальные индикаторы природного или технологического происхождения, определяемые соответственно составом руд и спецификой технологии.

Представительные индикаторы загрязнения – индикаторы, отличающиеся повышенной контрастностью и характеризующие максимальные по размерам геохимические показатели ущерба при простоте их определения.

Так, при оценке газо-аэрозольного и пылевого воздействия принимается индикатор пылевого воздействия – пылевая компонента, величина которой у источника составляет 100-1000 ПДК. Вещественный состав пыли отражает минеральный состав руд и вмещающих пород, почв.

Минеральная компонента аэрозолей, зависящая главным образом от состава исходного мине-

рального сырья, имеет подчиненное индикационное значение для атмосферного воздуха. Установление представительности индикатора требует специального обоснования.

Гидрохимическое воздействие – загрязнение подземных и поверхностных вод. Его производят сбросы промстоков, а также фильтрационные потери отстойников, остаточные растворы ШВ и КВ.

Индикаторами воздействия являются уран, концентрирующиеся в рудах тяжелые металлы, pH, радионуклиды, техногенные компоненты – анионы NO_3^- и SO_4^{2-} .

Радиационное воздействие характеризуется загрязнением природных сред радионуклидами. Источник радиационного воздействия – аэрозольные и пылевые, жидкие и твердые, как правило, низкоактивные отходы (вентиляционные выбросы, фильтрационные потери и пыление, остаточные рабочие растворы ШВ и КВ).

Индикаторы радиационного воздействия – величина активности – Бк (Ки) и удельные активности Бк/кг; Бк/м³ (Ки/кг, Ки/м³).

Отчуждение и изъятие земель. Этот вид воздействия характеризуется невозможностью или ограниченностью последующего использования земель в иных (хозяйственных и др.) целях без применения реабилитационных мер. Источники отчуждения и изъятия земель связаны со всеми рассматриваемыми комплексами.

Источники изъятия земель – площадь горного отвода, площадки КВ, источник дополнительного изъятия – трубопроводы, ЛЭП, дороги и другие элементы инфраструктуры.

Индикаторы воздействия – размер отчуждаемой и изымаемой площади – га, удельная земельная емкость продукции (расход площади земель на единицу продукции – га/т).

Нарушение природного ландшафта. Основные источники воздействия связаны с разного рода механическими нарушениями окружающей среды и размещением отходов, а также прочими воздействиями (химическим, радиационным, газоаэрозольным, пылевым).

Основные экологические последствия:

- загрязнение вод верхних горизонтов, поверхностных водотоков и донных отложений, приземной атмосферы, земной поверхности;
 - заиливание местных систем естественного дренирования;
 - неполнота извлечения металлов;
 - трансформация природного ландшафта.
- Объекты вероятного ущерба:
- участки верхних водоносных горизонтов, по-

верхностных водотоков и донных отложений, прилегающие к площадкам КВ;

- рудничные воды на участках ШВ;
- участки приземной атмосферы, прилегающие к остаточным кучам;
- участки земной поверхности и природного ландшафта, вмещающие рабочие площадки;
- местные системы дренирования.

Физические модели последствий воздействия – ореолы рассеяния (загрязнение подземных и приповерхностных вод донных отложений, приобретающее в поверхностных водотоках форму потоков рассеяния), области (ореолы) распространения (загрязнение земной поверхности и трансформация природного ландшафта).

Результаты научного исследования

Воздействие хранилищ отходов переработки урановых руд на окружающую природную среду. Различают два основных пути распространения радионуклидов и токсичных веществ вокруг хранилищ отходов – воздушный и водный, во многом определяемые климатическими и гидрогеологическими условиями и состоянием хранилища. Какой-либо из этих путей может быть доминирующим. Соответственно, в виде последствий может преобладать повышенное выделение радона и загрязнение окружающей среды продуктами его распада и частицами пыли, содержащими радионуклиды, или загрязнение подземных и поверхностных вод за счет утечек и просачивания растворов из хвостохранилищ.

Наиболее опасным из радионуклидов, содержащихся в отходах, является, как уже упоминалось ^{226}Ra , поскольку его содержание в них как изотопа ряда ^{238}U наиболее высокое, он имеет большой период полураспада (1620 лет) и выделяет радиоактивный газообразный радон (^{222}Rn).

Содержание в отходах радионуклида ^{210}Pb ($T_{1/2} = 21$ год) также имеет большое значение вследствие токсичности свинца и высокой подвижности его дочернего радиоизотопа ^{210}Po ($T_{1/2} = 138,4$ дня).

Определенную опасность представляет ветровой перенос обычно малоактивных тонкодисперсных частиц, содержащих радионуклиды тория, распадающиеся с образованием радия. Помимо этого, торий способен к комплексообразованию с органическими соединениями и аккумуляции в костной ткани взамен кальция ввиду близости ионных радиусов Th^{+4} и Ca^{+2} .

Учитывая, что главная опасность заключается в распространении пыли, содержащей радий,

и эксгаляция радона, Агентством по охране окружающей среды (ЕРА, США), например, были установлены нормы, ограничивающие содержание этих радионуклидов в почве и атмосфере [2]:

- средняя эмиссия радона – менее $20 \text{ пКи/м}^2\text{с}$;
- на участках, выделяемых для неконтролируемого использования, содержание ^{226}Ra не должно превышать 5 пКи/г в верхнем 15-сантиметровом слое почвы и 15 пКи/г – в нижележащем 15-сантиметровом слое.

В случае превышения этих норм загрязненные участки должны быть реабилитированы, а поверхность отходов оборудована противозрозийным и противорадиновым покрытием. При невозможности реабилитации загрязненных участков почва с них должна быть собрана на специальной площадке для окончательного удаления.

Выделение радона из отходов. Газообразный радон, являющийся продуктом распада радия, выделяется из твердых частиц отходов, диффундирует к поверхности последних и улетучивается в атмосферу. Скорость выделения радона зависит от ряда факторов – коэффициентов испускания и самопоглощения (с помощью минералов и материалов), адсорбции, влажности, атмосферного давления, а также особенностей заполнения и оборудования хвостохранилища – образования многослойных отходов, покрытия, озеленения.

Коэффициент испускания E , представляющий собой долю радона, выделяющегося из твердых частиц, определяется скоростью его диффузии в порах. В зависимости от природы минерала, влажности и размера частиц величина E меняется в широких пределах – от 3 до 50%, составляя для большей части урансодержащих и других исследованных минералов 10-15% (для угля – около 30%, вероятно, из-за слоистой и пористой структуры). Коэффициент испускания радона не зависит от содержания радия в минералах и отходах после переработки руды, что, возможно, свидетельствует о присутствии в них одинаковой формы химического соединения радия.

Коэффициент поглощения ϵ слоя радиоактивных отходов или другого материала определяется как доля радона, достигающего поверхности до его распада. Величина ϵ зависит от эффективной длины слоя материала для ослабления диффузии ($H_{\text{эфф.}}$) и толщины слоя материала. $H_{\text{эфф.}}$ – толщина слоя материала, необходимого для диффузии радона до полного его распада, является функцией коэффициента диффузии радона в воздухе ($D_A = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ для сухого воздуха), коэффициента извилистости каналов в материале и

постоянной распада ($\lambda = 2,06 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$). Если толщина слоя отходов больше $H_{\text{эф.}}$, то происходит самопоглощение радона и ε (и соответственно эмиссия радона с поверхности) имеет постоянное значение. Типичное значение $H_{\text{эф.}}$ для отходов равно 1-2 м.

Адсорбция радона твердой фазой зависит от природы минералов или обработки почвы и отходов и может изменять $H_{\text{эф.}}$, т.е. ослаблять процесс выделения радона.

Распространение радионуклидов из хвостохранилища воздушным путем. Газообразный радон (период полураспада $T_{1/2} = 3,8$ дня) до окончательного своего распада может перемещаться в атмосфере на значительные расстояния, вплоть до нескольких километров.

Одновременно воздушными потоками перемещаются оседающие на аэрозолях твердые продукты распада радона, из которых наиболее опасным является радионуклид ^{210}Pb ($T_{1/2} = 21$ год). Возможен также ветровой унос и рассеяние твердых частиц отходов, содержащих радионуклиды урана, ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb . Сравнительно крупные частицы оседают вблизи хранилища, тогда как микродисперсная твердая фаза может распространяться на многокилометровые расстояния.

Рассеяние радиоактивных частиц за пределами хвостохранилища приводит к расширению зоны радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха, почвы и грунтовых вод.

Обычно наиболее значительное облучение возможно в радиусе 0,5 км от хранилища, а с удалением от него оно быстро уменьшается.

Распространение воздушным путем твердых радиоактивных частиц, радона и его дочерних радионуклидов может негативно отразиться на состоянии здоровья людей вследствие их определенного внешнего и внутреннего облучения. Миграция радионуклидов в почве также может приводить как к внешнему, так и внутреннему облучению в случае использования пищевых продуктов. Этот путь радиоактивного воздействия менее прямой, но может вносить существенный вклад в общую дозу облучения.

Кроме радионуклидов необходимо учитывать возможную миграцию нерадиоактивных токсичных веществ, которые могут приводить к хроническим заболеваниям [3].

Критический путь максимального радиоактивного и токсичного воздействия на организм

человека и окружающую природную среду определяется для каждого конкретного условия и с его учетом разрабатываются природоохранные и медико-санитарные мероприятия.

Просачивание радиоактивных растворов из хвостохранилища и возможность их очистки в почвенном слое. Протечки (просачивание) растворов из хвостохранилища могут происходить вследствие нарушения целостности изолирующего слоя днища и других конструктивных элементов. Эти растворы содержат радиоактивные и нерадиоактивные вещества, в том числе токсичные, образующиеся при выщелачивании руды, а также остатки используемых при этом химических реагентов. Объем протечек (растворов) определяется в основном характером нарушений целостности изолирующих покрытий хвостохранилища, гидрогеологическими свойствами окружающей почвы – проницаемостью, пористостью и плотностью, а также направлением уклонов и уровнем грунтовых вод.

Скорость просачивания растворов пропорциональна гидравлической проницаемости почв, которая изменяется от 10^{-2} для гравия до 10^{-11} м/с для уплотненных тонкодисперсных глин.

Из-за различия физических и химических свойств отходов и окружающего их почвенного слоя на границе их раздела возникают градиенты гидростатического и осмотического давления, концентраций и pH растворов, которые обуславливают миграцию веществ-загрязнителей и осуществление различных физико-химических процессов в почве (табл. 1) [4].

Для качественной и количественной оценки миграции веществ-загрязнителей за пределы хвостохранилища и их воздействия на окружающую среду разработан ряд моделей, учитывающих гидрогеологические и геохимические факторы. Количественной характеристикой описания процессов миграции служат скорость движения грунтовых вод и коэффициент удержания какого-либо элемента в слое почвы.

Геохимические процессы включают реакции растворения и осаждения, избирательной адсорбции, ионного обмена, комплексообразования и др., но наиболее существенным среди них является кислотно-щелочное взаимодействие, так как от pH зависит вымывание и содержание вредных веществ в протечках из хранилища отходов и протекание других процессов в почве.

Таблица 1. Основные геохимические процессы взаимодействия отходов с окружающим почвенным слоем

Причины и условия возникновения геохимических процессов	Геохимические процессы
Смещение водных потоков, различающихся составом, pH, Eh, ионной силой и содержанием электролитов	В зоне раздела: проявление различий химических и физических свойств между отходами и почвенным слоем. Возможность образования осмотической "мембраны" в результате сорбции катионов и анионов. Осаждение аморфных гидроксидов алюминия, железа, марганца, урана и следов переходных металлов. Осаждение малорастворимых сульфатов (бария, радия). Удаление следовых количеств металлов основной массой осадка путем соосаждения, окклюзии и/или адсорбции
Разность концентраций электролита (активность и ионная сила) на поверхности раздела: высокая концентрация со стороны хвостов и низкая концентрация со стороны почвы	Направление движения воды из почвы в хвосты вдоль линий возможных химических градиентов. Растворимость различных твердых веществ меняется от ионной силы
Различие величин pH: низкие в хвостах; высокие в почве	Реакции гидролиза и осаждения. Для почв с хорошей буферной емкостью промежуточная зона относительно узкая (до 10 см); для почв с невысокой буферной емкостью и высокой гидравлической проницаемостью возможно распространение загрязнений
Различие окислительно-восстановительных потенциалов (Eh): высокий в хвостах, низкий в почве.	В зависимости от природы окислителя/восстановителя может происходить осаждение, однако возможно также и растворение; восстановление урана (VI) приводит к осаждению урана (IV)

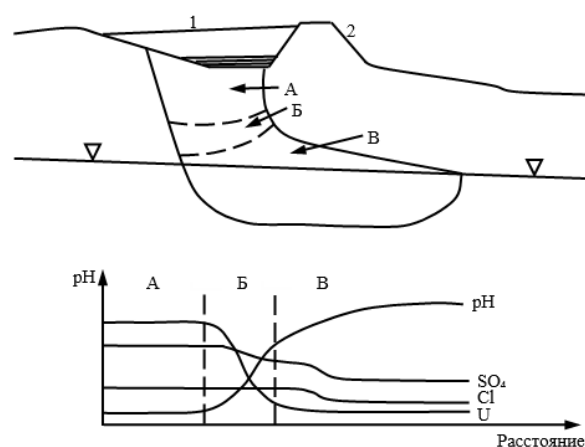
В распространяющемся от хранилища пятне загрязнений можно выделить три зоны (рис. 1). В первой и примыкающей к хранилищу кислотной зоне А pH водной фазы близок pH раствора, вытекающего из хранилища отходов. Во второй зоне Б происходит нейтрализация раствора в почве с постепенным повышением pH до 6-7 вследствие взаимодействия раствора с минералами почвы. Ее распространенность зависит от нейтрализующей емкости почв. В процессе нейтрализации кислых растворов в почве растворимые примеси Cd, As, Se, Ag, Cu, Mo, U, ^{210}Pb , ^{226}Ra обычно соосажаются и их распространение связано именно с этой зоной. В третьей зоне В постепенно устанавливается pH водной фазы почвы, присущей почвам данного района.

В случае преобладания вокруг хранилища щелочных (карбонатных) пород концентрация растворенных металлов-загрязнителей и радионуклидов быстро снижается.

Так, например, исследование распределения загрязнений вблизи хранилища отходов Нордик в Канаде показало распространение ионов SO_4^{2-} всего лишь на расстояние до 300 м, а ^{226}Ra — только до 5 м. По расчетам скорость миграции радия составляла около 0,5% от скорости движения грунтовых вод.

Следует отметить, что в процессе сернокислотного выщелачивания урана из руд образуется нейтральный комплекс RaSO_4 , который захватывается твердой фазой, но легко выделяется в рас-

твор при промывке ее, особенно растворами солей. Концентрация растворенного Ra в жидких отходах может составлять от 10 до 200 Бк/л (270-5400 пКи/л). Однако миграция ^{226}Ra с подземными водами ослабляется поглощением его минералами почвы.

**Рис. 1** Модель миграции загрязнений из хранилища отходов:

А - кислотная зона; Б - зона нейтрализации; В - зона миграции слабоудерживаемых компонентов отходов; 1 - пруд; 2 - дамба.

Наиболее прочно радий связан с баритом, а также с оксидами железа и марганца и ярозитом. Другие минералы, содержащиеся в почве, сравнительно слабо сорбируют радий [5].

В целом вклад миграционного механизма ра-

дия в общую дозу облучения обычно менее существен, чем атмосферное распространение радионуклидов.

Нейтрализация растворов в почве практически не влияет на содержание хлоридных ионов, т.к. они малореакционноспособны и по их распространению (миграции) можно судить о возникновении утечек растворов. Концентрация SO_4^{2-} -ионов в водной фазе зависит от степени осаждения малорастворимых солей.

Нейтрализующая способность почв зависит, прежде всего, от содержания в них карбонатов

(кальцит, доломит, сидерит и др.). В содержащей, например, кальцит (CaCO_3) почве происходит замедление продвижения фронта кислых растворов, что благоприятствует осаждению железа, прежде всего Fe (III) и других металлов в виде гидроксидов и/или основных серноокислых солей и соосаждению с ними радионуклидов. Основные геохимические процессы, протекающие в слое почвы в зоне нейтрализации растворов, приведены в табл. 2 [4]. Образование осадков гидроксидов и гипса может также уменьшить пористость и соответственно проницаемость почв.

Таблица 2. Геохимические процессы, протекающие в почвенном слое в зоне нейтрализации

Процесс	Химическая реакция	Примечание
Растворение кальцита	$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^-$	Аналогично растворяется доломит $(\text{CaMg})\text{CO}_3$
Растворение кальцита с замещением	$\text{CaCO}_3 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{FeCO}_3 + \text{Ca}^{2+}$	Сидерит FeCO_3 на воздухе не образуется
Растворение сидерита	$\text{FeCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{HCO}_3^-$	Нейтрализует кислоту после полного растворения кальцита
Осаждение гипса	$\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Кальций образуется после полного растворения кальцита, доломита
Осаждение гидроксида железа	$\text{Fe}^{2+} + 1/4\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{H}^+$	Ограничено содержанием кислорода в воде
Осаждение гидроксида алюминия	$\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	Образуется аморфный гидроксид алюминия
Осаждение алюмосиликата	$2\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+$	Образование галуазита или аналогичных ему минералов
Осаждение алунита	$\text{K}^+ + 3\text{Al}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6\text{H}^+$	Имеет ограниченную растворимость при низких pH
Осаждение аморфного кремнезема	$\text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{SiO}_{2(\text{ам})} + 2\text{H}_2\text{O}$	Растворимость зависит от содержания железа
Катионообменная реакция	$\text{H}^+ + \text{M}^+_{(\text{тв.})} \rightarrow \text{M}^+ + \text{H}^+_{(\text{тв.})}$	Ион водорода замещает K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}

Осаждение гидроксидов железа на поверхности силикатов уменьшает их сорбционную емкость по радионуклидам и токсичным металлам, однако образование алюмосиликатов, аморфных осадков кремнезема, напротив, повышает сорбционную способность почвы. Нейтрализация кислых растворов в почве приводит, как уже отмечалось, к определенному соосаждению радионуклидов урана, ^{226}Ra , ^{210}Pb , токсичных (As, Cd, Se) и других элементов (Mo, Cu) и ограничению их миграции.

Ослабление миграции радионуклидов и токсичных металлов происходит также вследствие их ионообменной сорбции глинистыми минералами. Сорбционные свойства минералов в отношении природных радионуклидов значительно

различаются. Так, горная масса (почва), содержащая барит, сорбирует до 30-60% растворенного радия. Эффективно извлекают и удерживают радий флюорит, полевой шпат, бентонитовые глины, уголь.

Ярозит и битуминизированные угли наиболее эффективно сорбируют радионуклиды свинца, а также практически полностью извлекают уран из слабокислых растворов (0,002 N).

Торий слабо сорбируется природными минералами, и его распространение будет определяться в основном растворимостью сульфата тория. Вследствие близости ионных радиусов Th и Ca (1,02 и 0,99 Å, соответственно) торий может замещать кальций в кристаллической решетке гипса, что делает его малоподвижным [4].

Как показывает практика эксплуатации хвостохранилищ, при обычных незначительных протечках из них растворов не требуется восстановления качества подземных вод, так как происходит их самоочистка за счет взаимодействия с минералами почвы.

Учитывая это обстоятельство и неиспользуемость таких подземных вод для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд, какая-либо химическая или другая обработка их нецелесообразна как по экономическим, так и по экологическим соображениям

Заключение

Рассмотрены основные виды экологического воздействия на окружающую среду, к которым можно отнести:

1. Просачивание остаточных рабочих растворов в подземные воды (последствие неисправностей трубопроводов, нарушение подстилающей штабеля эманлирующей поверхности).
2. Разливы кислот и рабочих растворов на земной поверхности и в подземных горных выработках.
3. Ветровая и водная эрозия штабеля.
4. Образование свалок.

Предложены к рассмотрению физические модели воздействия – ореолы рассеяния (загрязнение подземных и приповерхностных вод донных отложений, приобретающие в поверхностных водотоках форму потоков рассеяния), области (ореолы) распространения (загрязнение земной поверхности и трансформация природного ландшафта).

Список литературы

1. Россман, Г.И. Экологическая оценка рудных месторождений: методические рекомендации /Г.И. Россман, Н.В. Петрова, Б.Г. Самсонов - Минеральное сырье. №9. М.: Изд. ВИМС, 2000. -150 с.
2. US ERA radioactive waste disposal standards issued and under development. Nucl. and Chem./ Holcomb, W.F., Clark R.L., Dyer R.S., Galpin F.L. //Waste Manage. - 1988. -V. 8. -№ 1.- P. 3-12.
3. Оборудование хранилищ отходов урановых заводов / Ю.В.Смирнов, И.Д. Соколова, К.В. Блинова, Н.А. Чиркова; Москва: ЦНИИ Атоминформ, 1992. -265 с.
4. Weathering processes in uranium tailings and migration of contaminants/ Ritcey G M. // In: The environmental behavior of radium. - Vienna: IAEA, 1990. - V. 2. - P. 27-82.
5. Clifton A. W. Smith A. Stability of natural barriers

exposed to uranium mill wastes. INIS -mf-12807/ Proceed. Intern. Symp. On Uranium and Electricity. Can. Nucl. Soc. Toronto, Canada. 1988. P. 2.1-2.6.

References

1. Rossman, G.I. Ecological assessment of ore deposits: methodological recommendations /G.I. Rossman, N.V. Petrova, B.G. Samsonov - Mineralnoe syrie. No. 9. Moscow: VIMS Publishing House, 2000. -150 p.
2. US ERA radioactive waste disposal standards issued and under development. Nucl. and Chem./ Holcomb, W.F., Clark R.L., Dyer R.S., Galpin F.L. //Waste Maps. - 1988. -V. 8. -No. 1.- P. 3-12.
3. Equipment of waste storage facilities of uranium plants / Yu.V.Smirnov, I.D. Sokolova, K.V. Blinova, N.A. Chirkova; Moscow: Central Research Institute Atominform, 1992. -265 p.
4. Weathering processes in uranium tailings and migration of contaminants/ Ritcey G M. // In: The environmental behavior of radium. - Vienna: IAEA, 1990. - V. 2. - P. 27-82.
5. Clifton A. W. Smith A. Stability of natural barriers exposed to uranium mill wastes. INIS -mf-12807/ Proceed. Intern. Symp. On Uranium and Electricity. Can. Nucl. Soc. Toronto, Canada. 1988. P. 2.1-2.6.

УДК 504.064.36

Организация и ведение радиоэкологического мониторинга на Российских атомных электростанциях

Л.В. Самошина¹, О.П. Гавриш², Н.М. Королькова³*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, samoshina_lv@kur2.rosenergoatom.ru¹*

Статья поступила 05.02.2025 г.; после доработки 07.02.2025 г.

Аннотация

Выполнена работа по разработке Регламента радиоэкологического мониторинга для Курской АЭС-2, филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Курская атомная станция», на которой сооружаются инновационные энергоблоки с реакторной установкой типа ВВЭР-ТОИ, что позволит осуществлять непрерывный мониторинг обстановки в районе расположения АЭС во всех режимах эксплуатации. Учтены особенности района размещения радиационного объекта, особенности работы сооружаемых реакторных установок и проекта санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения.

Ключевые слова: атомная электростанция, радиационный контроль, радиоэкологический мониторинг.

Organization and maintenance of radioecological monitoring at Russian nuclear power plants

L.V. Samoshina¹, O.P. Gavrish², N.M. Korolkova³¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, Sevastopol, 299053, Russia, samoshina_lv@kur2.rosenergoatom.ru¹

Received 05.02.2025 y.; received in final form 07.02.2025 y,

Abstract

Work has been carried out on the development of radioecological monitoring regulations for Kursk NPP-2, a branch of JSC Concern Rosenergoatom Kursk Nuclear Power Plant.

Keywords: nuclear power plant, radiation monitoring, radioecological monitoring

Введение

Развитие атомной энергетики в России, с учетом многолетнего опыта эксплуатации атомных электростанций, приводит к сооружению новых, усовершенствованных энергоблоков с использованием высококачественных технологий, которые обеспечивают высокий уровень надежности и безопасности эксплуатации по отношению к окружающей среде, персоналу и населению.

Одной из основных целей атомных станций России является достижение такого уровня безопасности, при котором воздействие на окружающую среду, персонал и население на ближай-

шую перспективу и в долгосрочном периоде, который способен обеспечить сохранение природных систем, поддержание их целостности и жизнеобеспечивающих функций.

Целью работы является разработка Регламента радиоэкологического мониторинга для атомной электростанции.

Результаты работы

Объектом послужила сооружаемая Курская АЭС-2, единственная в России станция, на которой сооружаются инновационные энергоблоки с реакторной установкой типа ВВЭР-ТОИ.

ВВЭР-ТОИ – типовой оптимизированный и

информатизированный проект АЭС с водо-водяным энергетическим реактором. Энергоблоки представляют из себя двухконтурную систему, в которой вода выполняет роль теплоносителя и замедлителя тепловых нейтронов.

Сооружение новых энергоблоков выполняется на территории Муниципального образования г. Курчатова Курской области, расположенной на юго-западных склонах Среднерусской возвышенности, которая принадлежит Восточно-Европейской равнине.

Объект относится к I категории по потенциальной опасности [1].

На этапе проектирования АЭС, в обязательном порядке предусматривается система радиационного контроля (Далее — РК), которая обеспечивает измерение контролируемых параметров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ, с учетом характеристик района размещения, типа реакторной установки и технико-экономических показателей.

Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций обязывают предприятие разработать Регламент радиационного контроля.

Объем РК, (перечень объектов контроля, контролируемых параметров, сеть контрольных точек и периодичность наблюдений в них) должны обеспечивать достижение сформулированных целей:

- мониторинг за состоянием и изменением радиационной обстановки по определенной схеме периодических наблюдений в пространстве и времени;
- выявление утечек радиоактивных веществ в окружающей среде при эксплуатации АЭС;
- оценка степени соблюдения принципов радиационной безопасности и требований санитарно-эпидемиологических нормативов (включая не превышение контрольных уровней) [2];
- прогнозирование и предупреждение антропогенных изменений радиационного состояния контролируемого объекта путем сравнения результатов РК с фоновыми значениями контролируемых величин, определенных перед пуском АЭС.

Регламент радиационного контроля окружающей среды (Далее — РКОС) обеспечивает:

- контроль мощности дозы гамма-излучения и годовой дозы на местности;
- контроль загрязнения атмосферного воздуха,

почвы, растительности, воды открытых водоемов;

- контроль загрязнения продуктов питания и кормов местного производства.

Отбор проб окружающей среды производят в санитарно-защитной зоне (далее — СЗЗ) и зоне наблюдения (далее — ЗН) АЭС (рис. 1).

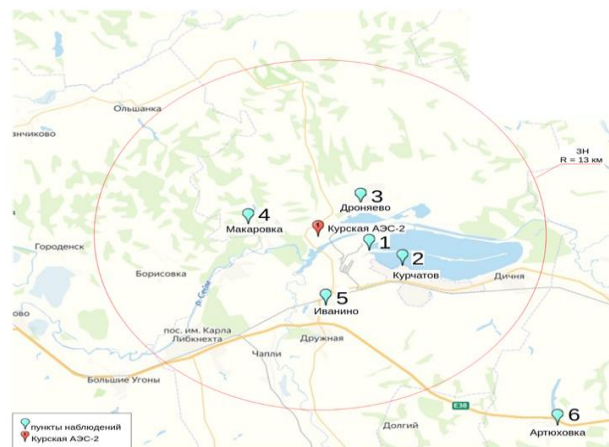


Рис. 1. Схема размещения постоянных пунктов периодического контроля

Постоянные пункты наблюдения располагают в населенных пунктах и местах, доступных для подъезда автомашин и обслуживания в течение всего года [3]. Постоянные пункты периодического контроля размещают относительно АЭС по четырем основным направлениям: в направлении от АЭС, совпадающем с господствующим направлением ветров в данной местности, в противоположном и в перпендикулярном направлениях. Кроме того, с наветренной стороны от АЭС и за пределами ЗН размещают контрольный пункт наблюдения.

ЗН распространяется в радиусе 13 км от геометрического центра вентиляционных труб, ее внутренняя граница совпадает с границей СЗЗ и промплощадки.

Постоянные пункты периодического РКОС для сооружаемого радиационного объекта располагают в:

1. Г. Курчатова, здание лаборатории внешней дозиметрии;
2. Г. Курчатова, «Рыбхоз»;
3. П. Дроняево;
4. С. Макаровка;
5. П. Иванино;
6. Контрольный пункт в с. Артюховка.

В вышеперечисленных пунктах выполняют РК следующих объектов окружающей среды и

параметров:

- годовой дозы на местности;
- приземного слоя воздуха с использованием аспирационной установки;
- атмосферных выпадений с использованием седиментационных кювет;
- растительности наземной;
- почвы.

Помимо выше сказанного, в ЗН выполняется контроль загрязнения продуктов питания и кормов местного производства, а также контроль питьевой воды.

Постоянные точки периодического контроля воды открытых водоемов располагают с учетом режима водопользования. Контроль осуществляют в местах выше по течению реки от места сброса, а также в тех местах, где поверхностные воды используются для хозяйственно-бытовых нужд, например для орошения территорий. Также предусмотрен РК водной растительности и донных отложений.

Предусмотрен РК рыбы (гидробионтов) на любом участке на 15 км выше или на 15 км ниже АЭС по реке Сейм (рис. 2).

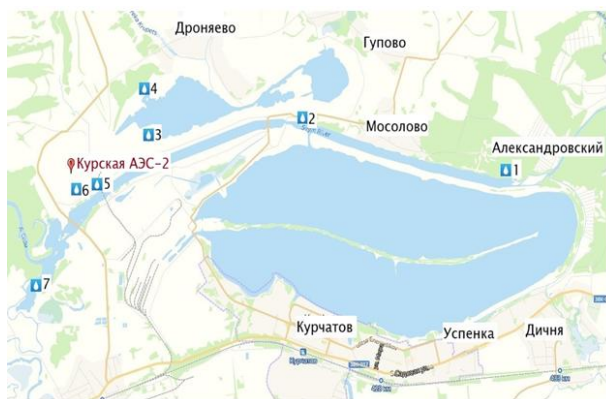


Рис. 2. Схема размещения постоянных точек периодического контроля воды открытых водоемов

На схеме передана следующая конфигурация точек периодического контроля:

1. Р. Сейм, хутор Александровский;
2. Р. Сейм, насосная станция подпитки №1 (в 5,5 км от площадки АЭС в районе н.п. Мосолово);
3. Пруд-накопитель, на входе в открытый водоподводящий канал к насосной станции подпитки №2;
4. Пруд-накопитель (правый берег)
5. Р. Сейм, ниже по течению устья водоотводного сооружения;
6. Комплекс очистных сооружений бытовых

сточных вод;

7. Р. Реут, пляж на берегу, в районе садового товарищества Иванинское.

Для непрерывного контроля мощности амбиентного эквивалента доз (Далее – МАЭД) размещают посты автоматизированной системы радиационного контроля (Далее – АСКРО) в ЗН.

Для контроля годовой дозы на местности применяют считываемые термолюминесцентные дозиметры.

В соответствии с СТО 1.1.1.01.001.0875-2017 [4] - предусматривается размещение 10 постов АСКРО (рис.3), предназначенных для регистрации аварийного выброса и подготовки рекомендаций по мерам защиты населения в случае аварии. Дополнительно 10 постов автоматизированного мониторинга радиационной обстановки (Далее – АМРО) разместят для информирования населения о состоянии радиационной обстановки в районе расположения Курской АЭС-2 и контрольный пост, за пределами зоны наблюдения.

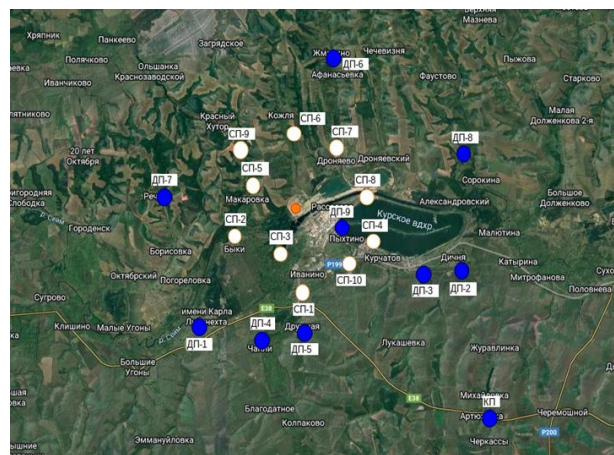


Рис. 3. Конфигурация постов АСКРО и постов АМРО

Обязательным требованием является установка поста АСКРО в населенном пункте АЭС. Подробное описание постов приведено в таблице 1.

Размещение постов АСКРО предусмотрено только в ЗН, так как нецелесообразно их размещать на территории промплощадки.

Эффективность выбранной конфигурации постов АСКРО составляет 97 %, что удовлетворяет критериями проектирования АСКРО на АЭС. Также с целью организации комплексного подхода к осуществлению радиационного контроля и мониторинга окружающей среды вклю-

чены аспирационные установки и седиментационные кюветы в состав постов АСКРО и АМРО.

Таблица 1. Конфигурация постов АСКРО и АМРО

Обозначение	Наименование поста	Тип поста
СП-1	п. Иваново, здание Администрации	АСКРО
СП-2	с. Быки	АСКРО
СП-3	с.т. Иванинское	АСКРО
СП-4	лаборатория, г. Курчатова	АСКРО
СП-5	с. Макаровка	АСКРО
СП-6	д. Кожля	АСКРО
СП-7	с. Дроняево	АСКРО
СП-8	блочно-насосная станция	АСКРО
СП-9	д. Кабановка	АСКРО
СП-10	г. Курчатова	АСКРО
ДП-1	п. им. К. Либкнехта	АМРО
ДП-2	с. Дичня	АМРО
ДП-3	с. Успенка	АМРО
ДП-4	с. Чапли	АМРО
ДП-5	д. Дружная	АМРО
ДП-6	с. Жмакино	АМРО
ДП-7	с. Речица	АМРО
ДП-8	д. Плаксино	АМРО
ДП-9	г. Курчатова («Рыбхоз»)	АМРО
КП	д. Артюховка	АМРО

Ввиду того, что граница СЗЗ Курской АЭС-2 совпадает с границей промплощадки, предусмотрено применять АСРК вместо АСКРО для получения данных о МАЭД и годовой дозы на местности для РК ОС (рис. 4).

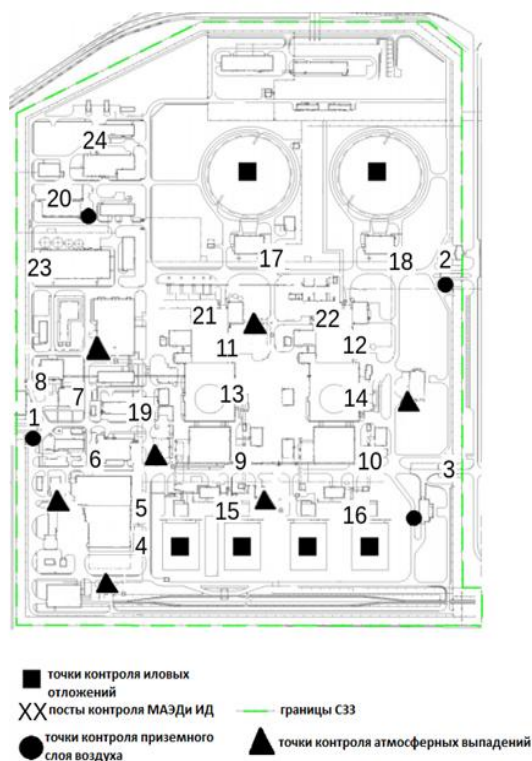


Рис. 4. Схема размещения СЗЗ Курской АЭС-2.

В СЗЗ определен следующий объем радиационного контроля:

- МАЭД;
- годовой дозы на местности;
- -приземного слоя атмосферного воздуха;
- атмосферных выпадений;
- иловых отложений;
- почвы
- грунтовых вод с использованием сети наблюдательных скважин (в количестве 82 ед.).

Контролируемые параметры, средства измерений и периодичность выполнения РК представлены в таблице 2 [5].

Таблица 2. Перечень объектов РК и контролируемых параметров

Объекты РК	Контролируемые параметры	Периодичность	Средства измерений
Территория СЗЗ, ЗН	МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч	Непрерывно	Термолюминисцентный дозиметр
	Годовая доза излучения на местности, мЗв	Один раз в год	Посты АСКРО, АСРК
Поверхностные воды	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Один раз в месяц	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
	Удельная активность ЗН, Бк/кг		Жидкостной сцинтилляционный альфа-бета радиометр
Грунтовые воды	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Один раз в квартал	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
	Удельная активность ЗН, Бк/кг		Жидкостной сцинтилляционный альфа-бета радиометр
Приземный слой атмосферного воздуха	Радионуклидный состав и плотность атмосферных выпадений гамма-излучающих радионуклидов за контролируемый период	Непрерывный отбор, измерения – один раз в 7 суток.	Аспирационная установка; Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.

	времени, Бк/м2 за сутки		
	Объемная активность 3Н и 14С, Бк/м		Бета-радиометр; Жидкостный сцинтилляционный радиометр
Атмосферные выпадения	Радионуклидный состав и плотность атмосферных выпадений гамма-излучающих радионуклидов за контролируемый период времени, Бк/м2 за сутки	1 раз в месяц (Отбор проб с экспозицией не более 10 суток)	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
	Поверхностная активность осевших на землю радиоактивных аэрозолей		
Почва	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Один раз в год	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
Растительность наземная	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Пункты наблюдений № 1-5 и контрольный пункт – один раз в год. Каждый месяц в период выпаса скота (в местах выпаса скота).	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
Донные отложения, водная растительность	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Один раз в год	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
	Удельная активность 3Н, Бк/кг		Жидкостной сцинтилляционный альфа-бета радиометр
Рыба, гидробионты	Радионуклидный состав и удельная активность	Один раз в год	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр;

	гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг		Бета-спектрометр; Жидкостной сцинтилляционный альфа-бета радиометр.
Сельхозпродукты (молоко, мясо, корнеплоды, овощи), корма, и дикорастущие пищевые продукты (грибы, ягоды и др.)	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Ежегодно, после уборки урожая. Молоко-2 раза в год (в пастбищный и стойловый периоды)	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
Вода питьевая	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Один раз в квартал	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр.
	Удельная активность 3Н, Бк/кг		Жидкостной сцинтилляционный альфа-бета радиометр
Иловые отложения	Радионуклидный состав и удельная активность гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг	Один раз в год	Бета-радиометр; Гамма-спектрометр; Бета-спектрометр; Жидкостной сцинтилляционный альфа-бета радиометр.

Заключение

Разработанная программа радиационного контроля окружающей среды в районе расположения Курской АЭС-2, позволяет осуществлять непрерывный мониторинг обстановки в районе расположения АЭС во всех режимах эксплуатации с учетом типа реакторной установки и особенностей характеристик СЗЗ и ЗН, а также эколого-географических и аэрометеорологических особенностей района размещения радиационного объекта, включает весь необходимый и достаточный объем радиоэкологического контроля и может обеспечить достижение поставленных целей.

Список литературы

1. СП 2.6.1.2612-10 Санитарные правила и нормативы «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПООРБ-99/2010)», от 26.04.2010;
2. СанПиН 2.6.1.2523-09 Санитарные правила и нормативы «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)», от 07.07.2009;
3. СанПиН 2.6.1.24-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03)», от 28.04.2003;
4. СТО 1.1.1.01.001.0875-2017 Стандарт организации «Автоматизированная система контроля радиационной обстановки атомной электростанции», от 12.12.2017;
5. МУ 1.1.4.01.1531-2018 Методические указания «Организация радиационного контроля в районе расположения атомных станций. Методические указания» от 21.08.2019.

References

1. SR 2.6.1.2612-10 Sanitary rules and regulations "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (BSRERS)", 21.08.2019;
2. SanRaR 2.6.1.2523-09 Sanitary rules and regulations "Radiation safety standards (RSS-99/2009)", 07.07.2009;
3. SanRaR 2.6.1.24-03 Sanitary and epidemiological rules and regulations "Sanitary rules for the design and operation of nuclear power plants (SR NPP-03)" 28.04.2003;
4. SO 1.1.1.01.001.0875-2017 The standard of the organization "Automated radiation monitoring system of a nuclear power plant", 12.12.2017;
5. MG 1.1.4.01.1531-2018 Guidelines "Organization of radiation control in the area of nuclear power plants. Methodological guidelines" dated 08.21.2019.

УДК: 621.039.588

Оценка влияния работы системы гидроемкостей второй и третьей ступени на безопасность работы ЯЭУ АЭС

Сукрушев А.В.¹, Браславский Ю.В.¹, Губин А.В.¹, Губина Е.Д.¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: avsukrushev@mail.sevsu.ru, yvbroslavsky@mail.sevsu.ru, avgubin@mail.sevsu.ru, edgubina@mail.sevsu.ru

Статья поступила 18.02.2025 г.; после доработки 20.02.2025 г.

Аннотация

В работе рассмотрены особенности использования системы гидроемкостей второй и третьей ступени и рассмотрена целесообразность ее использования. Приведена технологическая схема системы, а также приведены основные режимы ее эксплуатации. По результатам исследования сделан вывод о том, что данная система может отводить остаточные тепловыделения в случае запроектной аварии достаточно длительное время.

Ключевые слова: энергетика, гидроемкости, атомная станция, радиация, безопасность, ядерная энергетическая установка

Assessment of the impact of the operation of the second and third stage hydroaccumulator system on the safety of the nuclear power plant

Sukrushev A.V.¹, Braslavskiy Y.V.¹, Gubin A.V.¹, Gubina E.D.¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: avsukrushev@mail.sevsu.ru, yvbroslavsky@mail.sevsu.ru, avgubin@mail.sevsu.ru, edgubina@mail.sevsu.ru

Received 18.02.2025 y.; received in final form 20.02.2025 y.

Abstract

The paper examines the features of using the system of hydroaccumulators of the second and third stages and considers the feasibility of its use. The technological scheme of the system is given, as well as the main modes of its operation. Based on the results of the study, it is concluded that this system can remove residual heat emissions in the event of a beyond-design-basis accident for a sufficiently long time.

Keywords: energy, hydroelectric capacity, nuclear power plant, radiation, safety, nuclear power facility

Введение

Наиболее опасными для ЯЭУ с ВВЭР являются аварии, связанные с потерей теплоносителя первого контура (течи первого контура). Например, при максимальной проектной аварии (МПА), т.е. при разрыве холодной петли трубопровода первого контура Ду850 [1], утечка теплоносителя в начальный период может достигать более 400000 кг/с.

В случае аварии, которая сопровождается разрывом первого контура и утерей теплоносителя, давление в этом контуре снижается. Это

приводит к срабатыванию аварийной защиты реактора и «разрывной» защиты первого контура, которая запускает механизмы систем безопасности (СБ). Однако системы безопасности имеют некоторую инерционность. Вода начинает поступать в реактор только через некоторое время после достижения давления в первом контуре 1,47–2,16 МПа. Для насосов САОЗ низкого давления это время составляет 35–40 секунд, а для насосов САОЗ высокого давления — около 20 секунд. Эти данные приведены без учёта времени, необходимого для запуска дизель-генераторов. Если в аварийной ситуации

произойдёт обесточивание, то указанные временные задержки нужно увеличить на 15 секунд [2].

Поэтому, для режимов больших течей, первоначально была внедрена система безопасности, которая вступала в работу в первые моменты аварийного процесса, не допуская при этом оголения активной зоны, и функционировала до включения остальных систем СБ [2]. Такой системой стала система гидроаккумулирующих емкостей УТ (для ВВЭР-1000 проекта В-320) [3]. Запас РБК в 4-х ГЕ этой системы составил 200 м³. В то же время, скорость опорожнения ГЕ-1 ограничивалась только давлением в реакторе, поэтому при большой течи эти ГЕ сливались достаточно быстро и не обеспечивали длительный отвод остаточных тепловыделений.

Учитывая развитие пассивных систем безопасности для ВВЭР-1200 (проекта В-392М) были внедрены ГЕ 2-й ступени – 8 емкостей общим объемом 960 м³ с профилированным расходом [4]. Эта система, совместна со СПОТ, способна расхолаживать реакторную установку в течение 24-х часов. Впервые ГЕ-2 были установлены на Нововоронежской АЭС-2.

Однако в процессе эксплуатации энергоблоков НВАЭС-2 была выявлена необходимость в продолжении модернизации схемного решения систем гидроемкостей для обеспечения безопасной эксплуатации энергоблоков при запроектных авариях.

Для повышения уровня безопасности энергоблоков АЭС предлагается внедрение дополнительных гидроаккумулирующих емкостей – ГЕ третьей ступени.

Целью данного исследования является анализ схемного решения влияния ГЕ-3 на общую безопасность энергоблока АЭС с ВВЭР-ТОИ в аварийных ситуациях, включая запроектные аварии. В рамках поставленной цели выполнены следующие задачи:

- определить функции вводимой системы;
- составить схемное решение для системы;
- определить основные режимы эксплуатации;
- оценить влияние системы на общую безопасность энергоблока.

Назначение системы

Наиболее вероятные случаи, когда может возникнуть сброс паровой и электрической нагрузки это:

- подача борного раствора от гидроемкостей второй ступени для поддержания уровня

теплоносителя в активной зоне при авариях с потерей теплоносителя, при падении давления в первом контуре ниже 1,5 МПа;

- подача борного раствора от гидроемкостей третьей ступени для поддержания уровня теплоносителя в активной зоне при запроектных авариях с течами первого контура и отказом активных систем безопасности после исчерпания запаса борного раствора в гидроемкостях второй ступени;
- подача борного раствора для подпитки бассейна выдержки при запроектных авариях в стояночных режимах с полной потерей всех источников переменного тока и (или) проектного отвода тепла к конечному поглотителю;
- хранения запаса раствора борной кислоты для заполнения отсеков бассейна перегрузки на остановленном блоке в период перегрузки топлива.

Описание технологической системы

Система гидроемкостей второй и третьей ступени (JNG10) состоит из следующих подсистем:

- гидроемкости второй ступени;
- гидроемкости третьей ступени.

Технологическая схема групп ГЕ-2 и ГЕ-3 системы пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ) приведена на рисунке 1.

Подсистема гидроемкостей второй ступени имеет четыре независимые физически разделенные группы. Каждая группа подсистемы имеет в своем составе две гидроемкости и обеспечивает подачу в напорную и сборную камеру реактора борного раствора через соответствующие трубопроводы слива емкостей САОЗ (JNG50).

Подсистема спроектирована с учетом профилирования во времени расхода, подаваемого в активную зону, в соответствии со снижением мощности остаточных тепловыделений. Подача борного раствора в реактор от каждой группы гидроемкостей второй ступени обеспечивается в соответствии с приведенной в таблице 1 характеристикой.

Регулирование необходимого изменения во времени расхода в реактор слив раствора борной кислоты из гидроемкостей обеспечивается рядом параллельных трубопроводов с дроссельно-регулирующими устройствами. Для четырехступенчатого профилирования предусмотрено четыре отводящих трубопровода Ду50 и один трубопровод Ду100 с дрос-

сельно-регулирующими устройствами. Каждому значению расхода соответствует определенный диапазон уровня в емкостях.

Таблица 1. Расход РБК

Длительность ступени, с	100 – 5430	5431 – 10860	10861 – 29000	29001 – 86400
Расход раствора борной кислоты от одной группы, кг/с	10,0	5,0	3,3	1,6

Расход на каждой ступени зависит от расположенных внутри гидроемкостей на разной высоте сливных трубопроводов с ручными корректорами, установленными на продолжении сливных трубопроводов вне гидроемкостей. При уровне выше верхнего трубопровода расход максимален. Когда уровень снижается до предпоследнего снизу, он определяется суммарной пропускной способностью параллельных линий с ограничительными шайбами ниже текущего уровня. Минимальный расход достигается при уровне ниже предпоследнего патрубка и зависит только от пропускной способности последней шайбы. Емкости каждой группы соединены перемычками как по паровой, так и по водяной средам [5].

В верхней части гидроемкости второй ступени через линии Ду100 с установленными на них специальными двойными обратными клапанами и электроприводными задвижками подключены к «холодным» ниткам главных циркуляционных трубопроводов. Для врезки трубопроводов, соединяющих ГЕ с РУ, используются участки трубопровода системы продувки-подпитки. Обратные клапаны настроены на открытие при снижении давления в контуре до 1,5 МПа, при этом давление в гидроемкостях возрастает до давления в первом контуре и борный раствор под действием гидростатического напора поступает в реактор по сливным трубопроводам.

На трубопроводах слива установлены запорные задвижки, необходимые для отключения гидроемкостей от первого контура (при необходимости ремонта при остановленном реакторе) и обратные клапаны, предназначенные для исключения роста давления в гидроемкостях в состоянии ожидания и автоматического пассивного открытия линии слива при авариях

с течью теплоносителя первого контура при давлении в первом контуре не более 1,5 МПа.

В режиме ожидания трубопроводы полностью заполнены водой. В случае протечек избыток воды отводится через обратные клапаны производится по дренажам в систему дренажей и организованных протечек первого контура (10КТА) [6].

Для возможности подпитки бассейна выдержки при запроектных авариях, произошедших во время ППР, в проекте подсистемы предусмотрен трубопровод связи с системой JNA.

При запроектных авариях (с полной потерей всех источников переменного тока и/или проектного пути отвода тепла к конечному поглотителю) требуется отвод тепла от активной зоны на интервале времени свыше 72 часов. Для этого может использоваться предусмотренная перемычка между трубопроводом первого канала спринклерной системы JMN и сливными трубопроводами гидроемкостей второй ступени в реактор.

Подсистема гидроемкостей третьей ступени имеет четыре независимые физически разделенные группы. Каждая группа имеет в своем составе три емкости.

Борный раствор от гидроемкостей третьей ступени подается к реактору через подсистему гидроемкостей второй ступени. При открытии локализирующей арматуры, соединяющей ГЕ-2 и ГЕ-3, давление в ГЕ-3 выравнивается с давлением первого контура и происходит слив борного раствора в реактор через трубопровод гидроемкостей второй ступени.

Каждая группа гидроемкостей третьей ступени обеспечивает расход в реактор не менее 1,6 кг/с в начале работы и не менее 1,1 кг/с на заключительном этапе.

При запроектных авариях в стояночных режимах ГЕ-3 могут быть подключены оператором на подачу воды в бассейн выдержки.

Первоначальное заполнение/дренирование системы гидроемкостей второй и третьей ступени JNG10 осуществляется системой FAL.

Показатели качества раствора борной кислоты для гидроемкостей второй и третьей ступени приведены в таблице 2.

ГЕ-2 устанавливаются в герметичной части реакторного отделения в здании UJA в зоне ограниченного доступа на отметке плюс 26,3 м, а ГЕ-3 – в здании UJB на отметке плюс 24 м.

Группы подсистем физически разделены и независимы друг от друга, благодаря чему отказ в одной группе не может привести к отказу в другой группе. Данное схемное решение и

компоновка оборудования позволяет исключить зависимые отказы и отказы по общей причине, связанные с расположением оборудования, а также влияние любых видов работ, выполняемых на оборудовании одной из групп (ремонт, техническое обслуживание), на другую группу.

Таблица 2. Показатели качества РБК

Наименование показателя	Норма
Концентрация раствора борной кислоты, г/дм ³	от 17 до 25
Значение pH, ед., не менее	4,2
Концентрация хлорид-ионов, мг/дм ³ , не более	0,10
Прозрачность воды, %, не ниже	95

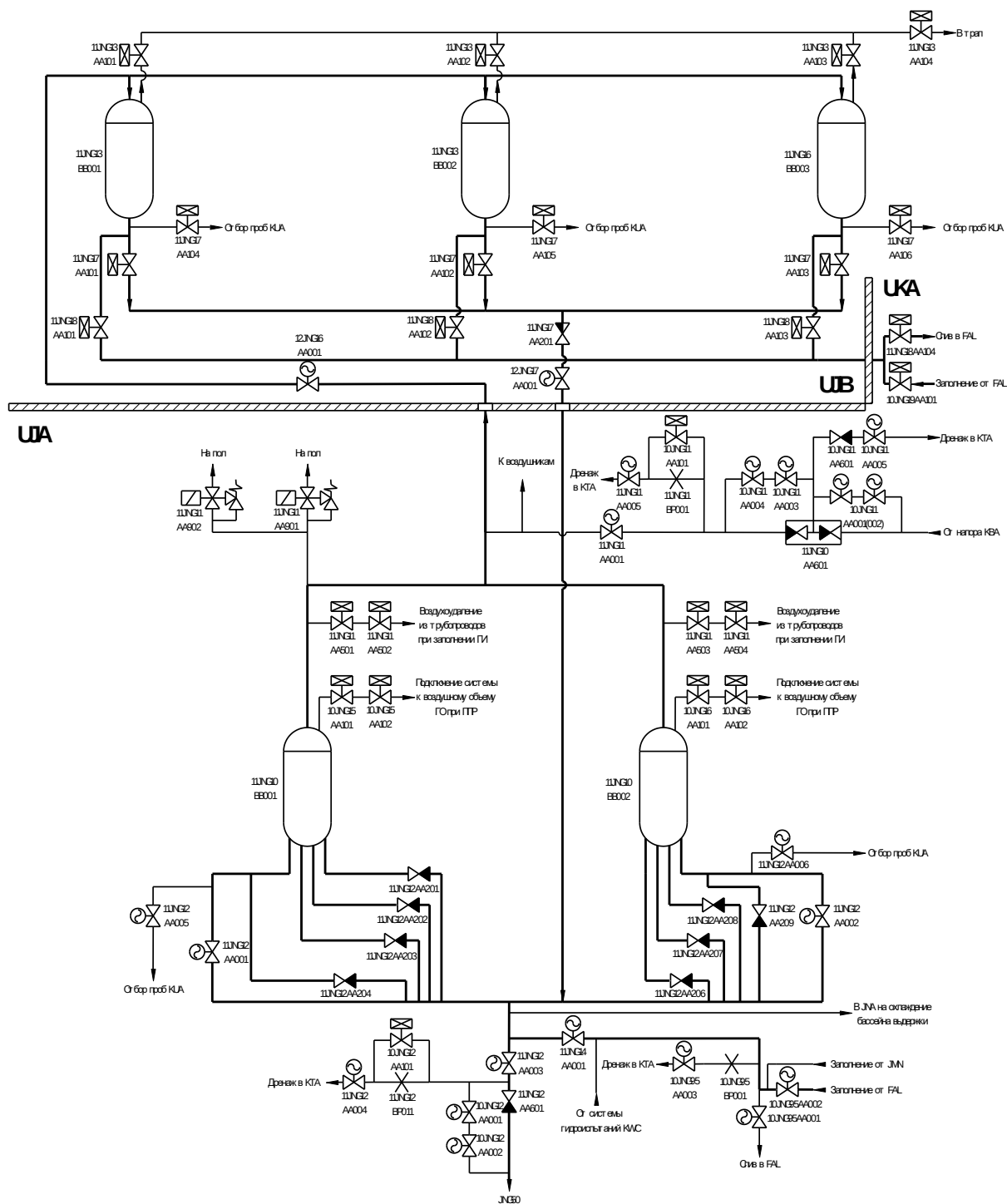


Рис. 1. Технологическая схема групп ГЕ-2 и ГЕ-3 системы пассивного залива активной зоны

Основные режимы эксплуатации системы

Система гидроемкостей второй и третьей ступени обеспечивает выполнение своих функций в составе комплекса систем безопасности энергоблока при любом исходном событии аварии, требующем ее работы.

Автоматическое включение системы в работу происходит при следующих постулируемых исходных событиях:

- течи первого контура при проектном функционировании активных СБ;
- течи первого контура при отказе всех активных СБ.

Перед пуском блока гидроемкости и трубопроводы системы JNG10 заполняются борным раствором. Давление в гидроемкостях гидростатическое. Задвижки, отсекающие гидроемкости второй ступени от первого контура и арматура, отсекающая ГЕ-3 ступени от ГЕ-2, закрыты. Двойной обратный клапан открыт [5].

При давлении в первом контуре в интервале от 2 до 3,5 МПа двойной обратный клапан закрывается оператором дистанционно при помощи электропривода. После закрытия двойного обратного клапана открываются запорные задвижки на трубопроводах связи всех гидроемкостей второй ступени с РУ дистанционно оператором.

При работе блока на мощности система JNG10 не функционирует и находится в режиме ожидания. Для поддержания системы в работоспособном состоянии проводятся периодические проверки и контроль состояния элементов. Двойной обратный клапан находится в закрытом положении, запорная арматура на трубопроводах связи гидроемкостей с ГЦК открыта (за исключением арматуры 11JNG12(22)AA001,002, 12JNG32(42)AA001,002), арматура на трубопроводах связи гидроемкостей второй ступени с гидроемкостями третьей ступени закрыта.

После снижения давления в первом контуре до 2,1 МПа в режиме планового расхолаживания (но до достижения значения срабатывания двойного обратного клапана 1,5 МПа) оператор дистанционно закрывает задвижки, отсекающие подсистему ГЕ-2 от ГЦК.

Запас раствора борной кислоты после останова блока в гидроемкостях второй ступени используется для заполнения насосами системы FAL шахты реактора и шахт ревизии ВКУ (верхней части) на период перегрузки топлива. После окончания перегрузки раствор борной кислоты возвращается в гидроемкости насосами системы

FAL.

В режиме обесточивания энергоблока система не функционирует. Если принимается решение о расхолаживании блока, задвижки на трубопроводах связи гидроемкостей второй ступени с первым контуром, запитанные от системы аварийного электроснабжения, закрываются оператором, как и в режиме планового останова блока.

В аварийном режиме с течью первого контура по мере снижения давления сначала подключаются насосы аварийного впрыска высокого давления системы JNA и/или емкости CAO3 первой ступени, а затем насосы аварийного расхолаживания низкого давления системы JNA и/или гидроемкости второй ступени (при $P = 1,5$ МПа). Последующие изменения давления (снижение или рост, вызванный динамикой переходного процесса) не приводят к изменению положения двойного обратного клапана.

При запроектных авариях течами первого контура с полным отказом активной части СБ, произошедших при работе реактора на мощности, система обеспечивает поддержание РУ в безопасном состоянии на интервале не менее 72 часов, осуществляя подпитку активной зоны и отвод тепла совместно с системой СПОТ. Первые 24 часа с момента возникновения исходного события выполнение функции безопасности обеспечивается работой гидроемкостей второй ступени совместно со СПОТ. Гидроемкости третьей ступени подключаются оператором по сигналам снижения уровня в гидроемкостях второй ступени и начинают работать после окончания работы гидроемкостей второй ступени.

При запроектных авариях с полным отказом активной части СБ, произошедших в стояночных режимах во время ППР, система может быть подключена оператором для поддержания запаса теплоносителя в бассейне выдержки или в реакторе.

Влияние системы на общую безопасность энергоблока

В проекте Курской АЭС-2 предлагается внедрение подсистемы гидроемкостей третьей ступени. Данное схемное решение является средством управления запроектной аварией с полной потерей источников переменного тока и, как следствие, отказом активных систем безопасности, предусмотренных проектом для преодоления проектных аварий [7].

Объем гидроемкостей второй ($V = 120 \text{ м}^3$) и третьей ($V = 60 \text{ м}^3$) ступени выбран на основании

расчетов изменения теплофизических свойств активной зоны реактора при течи первого контура. Согласно проведенным расчетам, гидроемкости второй ступени должны содержать запас воды, достаточный для съема остаточных тепловыделений активной зоны реактора в кипящем режиме в течение 24 ч с начала возникновения аварии, а гидроемкости третьей ступени в интервале времени от 24 до 72 ч с момента возникновения исходного события при запроектных авариях с полным отказом активной части СБ после исчерпания запаса борного раствора в гидроемкостях второй ступени для обеспечения охлаждения активной зоны реактора пассивным образом.

Учитывая аналогичность технических решений, заложенных в проекты подсистем ГЕ-2 и ГЕ-3, результаты теплогидравлических испытаний, проведенные на крупномасштабных теплогидравлических моделях подтверждают, что заложенные в проекте решения обеспечивают выполнение системой её проектной функции [8].

При проектных и запроектных авариях ввод гидроемкостей второй ступени в работу не требует автоматических действий или оперативных действий персонала, т.к. система основана на пассивном принципе действия.

Проектное решение по способу подключения ГЕ-3 дистанционно с БПУ (РПУ) оператором является допустимым, так как эти действия не являются срочными и у оператора имеется значительный запас между требуемым и имеющимся временем для выполнения необходимых действий по подключению ГЕ-3 в процессе запроектной аварии.

Период времени после начала аварии до момента, когда требуется подключение ГЕ-3, составляет не менее 24 часов. Этого времени достаточно для оператора, чтобы он правильно оценил ситуацию и выполнил требуемые действия. Для снижения вероятности ошибок оператора, количество необходимых действий для подключения ГЕ-3 минимизировано.

Кроме того, подключение ГЕ-3 оператором позволяет избежать подачи среды из подсистемы ГЕ-3 в реактор во время ПА и во время ЗПА с разрывом первого контура и полным обесточиванием, в случае восстановления электропитания в течение первых 24 часов с момента аварии, то есть во время работы ГЕ-2 (а в случае проектной аварии – при работе также активных систем безопасности).

Благодаря размещению гидроемкостей третьей ступени за пределами гермообъема исключается зависимый отказ ГЕ-3 при возникновении

исходных событий запроектных аварий, при которых требуется их работа. Объем информации, предоставляемой оператору о состоянии гидроемкостей третьей ступени, включая положение арматуры, позволяет своевременно обнаруживать отказы при работе энергоблока.

Заключение

Таким образом, подсистема ГЕ-3 является средством управления запроектной аварией с полной потерей источников переменного тока, так как не требует автоматических действий или оперативных действий персонала. Также данная подсистема существенно продлевает время пассивного отвода тепла от активной зоны реактора (с 24 до 72 ч), что позволяет отводить остаточные тепловыделения после исчерпания ГЕ-2. Это дает возможность значительно повысить уровень безопасности ЯЭУ в случае запроектных аварий.

Список литературы

1. Машиностроение ядерной техники, кн. 1 : [в 2 кн.] / ред. тома д.т.н. Е. О. Адамов ; ред.-сост. д.т.н. В. И. Солонин отв. ред. акад. РАН К. С. Колесников. — М.: Машиностроение, 2005. — 959 с. : ил. — Библиогр. в конце гл. — Предм. указ.: с. 954—959. Ссылка на издание https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn1_2005/
2. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрущечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. - М.: Логос, 2010. - 604 с. + цв. вклейки. ISBN 978-5-98704-496-4
3. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С. А. Андрущечко, А. М. Афров, Б. Ю. Васильев, В. Н. Генералов, К. Б. Косоуров, Ю. М. Семченков, В. Ф. Украинцев. — М.: Логос, 2010. — 604 с., цв. вклейки.
4. Схемные решения и принципы работы пассивных систем аварийного охлаждения различных типов ЯЭУ: Учебное пособие / А.В. Морозов, О.В. Ремизов, Ю.А. Маслов, В.С. Харитонов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. — 176 с.
5. Калякин Сергей Георгиевич. Теплогидравлика пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР : диссертация ... доктора технических наук : 05.14.03 / Калякин Сергей Георгиевич; [Место защиты: Физико-энергет. ин-т им. А.И. Лейпунского].- Обнинск, 2007.- 277 с.: ил. РГБ ОД, 71 08-5/136 URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003446478/ (дата обращения: 14.02.2025)
6. Малышев А. Б. (канд. техн. наук, канд. социол.

наук) Экспериментальное обоснование пассивной системы безопасности ГЕ-2 реактора ВВЭР-1000 Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н., Спец. 05.14.03 / Малышев Андрей Борисович; [ГУП ВНИИАМ]. — М. 2003. — 24 с. ил.; 20. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_463756/ (дата обращения: 14.02.2025)

7. Малышев, А. Б. Экспериментальные исследования системы пассивного залива реактора ВВЭР-1000 / А. Б. Малышев, А. Д. Ефанов, С. Г. Калякин // Теплоэнергетика. — 2002. — № 12. — С. 61-65. — EDN XAGRMV.
8. Морозов, А. В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР / А. В. Морозов, О. В. Ремизов // Теплоэнергетика. — 2012. — № 5. — С. 22. — EDN OWXCDZ.

References

1. Nuclear Engineering, v. 1: [in 2 books] / volume editor Dr. of Engineering Sciences E. O. Adamov; editor and compiler Dr. of Engineering Sciences V. I. Solonin; responsible editor Academician of the Russian Academy of Sciences K. S. Kolesnikov. — Moscow: Mashinostroenie, 2005. — 959 p.: ill. — Bibliography at the end of the chapter. — Index: pp. 954-959. Link to publication https://elbib.bibliotom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn1_2005/
2. Nuclear power plants with WWER-1000 reactors. From physical principles of operation to project evolution / S.A. Andrushechko, A.M. Afrov, B.Yu. Vasiliev, V.N. Generalov, K.B. Kosourov, Yu.M. Semchenkov, V.F. Ukraintsev. - M.: Logos, 2010. - 604 p. + color inserts. ISBN 978-5-98704-496-4
3. NPP with WWER-1000 reactor. From the Physical Principles of Operation to Project Evolution / S. A. Andrushechko, A. M. Afrov, B. Yu. Vasiliev, V. N. Generalov, K. B. Kosourov, Yu. M. Semchenkov, V. F. Ukraintsev. — M.: Logos, 2010. — 604 p., color inserts.
4. Circuit solutions and operating principles of passive emergency cooling systems of various types of nuclear power plants: A tutorial / A. V. Morozov, O. V. Remizov, Yu. A. Maslov, V. S. Kharitonov. M.: NRNU MEPhI, 2015. — 176 p.
5. Kalyakin Sergey Georgievich. Thermal hydraulics of passive safety systems of NPPs with WWER: dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.14.03 / Kalyakin Sergey Georgievich; [Place of protection: Physics and Power Engineering Institute named after A.I. Leypunsky]. - Obninsk, 2007. - 277 p.: ill. RGB OD, 71 08-5 / 136 URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003446478/ (date of access: 14.02.2025)
6. Malyshev A. B. (Candidate of Technical Sciences, Candidate of Sociological Sciences) Experimental justification of the passive safety system GE-2 of the WWER-1000 reactor Abstract of dis. for dis. of academic degree. PhD, Spec. 05.14.03 / Malyshev Andrey Borisovich; [GUP VNIIAM]. - M. 2003. - 24 p. ill.; 20. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_463756/ (date of access: 14.02.2025)
7. Malyshev, A. B. Experimental studies of the passive flooding system of the WWER-1000 reactor / A. B. Malyshev, A. D. Efanov, S. G. Kalyakin // Thermal Power Engineering. - 2002. - No. 12. - P. 61-65. - EDN XAGRMV.
8. Morozov, A. V. Experimental substantiation of the design functions of an additional passive flooding system for the VVER reactor core / A. V. Morozov, O. V. Remizov // Thermal Power Engineering. - 2012. - No. 5. - P. 22. - EDN OWXCDZ.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК621.311.21

Мониторинг технического состояния изоляции кабелей 6-10 кВ в сетях с изолированной нейтралью

Е.Г. Малюк

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, evmalyuk@mail.ru.

Статья поступила 19.02.2025 г.; после доработки 20.02.2025 г.

Аннотация

В статье рассматривается возможность мониторинга технического состояния изоляции кабелей 6-10 кВ с использованием системы селективного контроля с применением алгоритма работы, основанного на сравнительном анализе токов нулевой последовательности промышленной частоты. При проведении теоретических исследований в качестве основной задачи была принята задача мониторинга состояния изоляции по амплитудной селекции для обнаружения повреждений изоляции при сравнительном анализе сигналов от датчиков-преобразователей. Предлагаются технические решения дополняющие аппаратуру релейной защиты и автоматики (РЗА), позволяющие выполнять анализ токов утечки через большие переходные сопротивления в месте повреждения изоляции с целью определения тенденций изменения состояния изоляции, вызванное ее старением и прогнозирования возможных ОЗЗ. Особенностью предлагаемых совершенствований системы является использование исходных данных о параметрах присоединений и использование усовершенствованных датчиков тока нулевой последовательности.

Ключевые слова: техническое состояние изоляции кабелей 6-10 кВ, токи нулевой последовательности, селективный контроль, достоверная идентификация состояния изоляции кабельных присоединений.

Monitoring of the technical condition of insulation of 6-10 kV cables in networks with insulated neutral

E.G. Malyuk

Sevastopol State University, 7 Kurchatova st., Sevastopol, 299015, Russia evmalyuk@mail.ru;sergey1.nagorny@yandex.ru.

Received 19.02.2025 y.; received in final form 20.02.2025 y.

Abstract

The article discusses the possibility of monitoring the technical condition of 6-10 kV cable insulation using a selective control system using a work algorithm based on a comparative analysis of zero-sequence currents of power frequency. In the course of theoretical research, the main task was to monitor the state of insulation by amplitude selection to detect insulation damage in the comparative analysis of signals from transducer sensors. Technical solutions are proposed to complement the equipment of relay protection and automation (RPA), which make it possible to perform an alarm Leakage currents through large transient resistances at the insulation fault site in order to determine trends in insulation state changes caused by insulation aging and predict possible OZS. A feature of the proposed system improvements is the use of initial data, connection parameters and the use of improved zero-sequence current sensors.

Keywords: technical condition of insulation of 6-10 kV cables, zero sequence currents, selective control, reliable identification of the state of insulation of cable.

Введение

Бесперебойность и качество электроснабжения потребителей зависит от надежности работы распределительных сетей 6-10 кВ. В Российской Федерации приняты распределительные сети 6-10 кВ с изолированной нейтралью [3]. Надежность и безаварийность эксплуатации вышеуказанных сетей во многом зависит от решения проблемы идентификации повреждений изоляции, проявляющихся в виде локальных несимметричных снижений сопротивления изоляции, обусловленных сложной и неоднозначной картиной появления и локализации (растекания) несимметричных токов утечки. В настоящее время, эта проблема обычно рассматривается с точки зрения обеспечения надежной работы релейной защиты от замыканий на землю, при этом подразумеваются замыкания на землю через малое сопротивление, когда ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) определяется емкостью сети.

В статье рассматривается алгоритм работы централизованной системы селективного контроля состояния изоляции, основанный на сравнительном анализе результатов измерений токов нулевой последовательности промышленной частоты и сдвигов фазы между током и напряжением нулевой последовательности в каждом присоединении.

Предлагаются технические решения дополняющие аппаратуру релейной защиты и автоматики (РЗА), позволяющие выполнять анализ токов утечки через большие переходные сопротивления в месте повреждения изоляции с целью определения тенденций изменения состояния изоляции, вызванное ее старением и прогнозирование возможных ОЗЗ. В дальнейшем в статье под однофазным замыканием на землю (ОЗЗ) подразумевается замыкание одной из фаз на землю именно через большое переходное сопротивление (3-10 кОм и более).

Определение технического состояния твердой изоляции по результатам мониторинга токов утечки

Основная идея контроля технического состояния изоляции кабелей основана на предположении о возникновении будущего повреждения твердой высоковольтной изоляции в результате развития локального дефекта, вызванного наличием постороннего включения в изоляции, процессов старения изоляции, скрытого дефекта, возникшего при изготовлении, монтаже,

ремонте или эксплуатации. Мониторинг состояния изоляции по несимметричным токам утечки позволяет выявить развивающиеся дефекты, оценить скорость их развития и предпринять необходимые меры до возникновения аварийной ситуации.

В процессе рассмотрения алгоритма функционирования централизованной системы мониторинга состояния изоляции, была применена упрощенная схема замещения распределительной сети. Поскольку датчики токов необходимо устанавливать на отходящих присоединениях, токи утечки через емкости питающего трансформатора, шин распределительных устройств (РУ) и т.п., а также токи через заземленные обмотки измерительных трансформаторов напряжения и через ограничители перенапряжений можно считать малыми и не учитывать по сравнению с токами в присоединениях к распределительному устройству (РУ). Указанные токи находятся вне зоны контроля системы. Сопротивления изоляции присоединений приняты много большими, чем емкостные сопротивления фаз относительно земли на промышленной частоте, и поэтому не учитывались. Поскольку значение переходного сопротивления в месте повреждения изоляции не влияет на соотношение сигналов от датчиков на контролируемых присоединениях, то анализ проводился при достаточно большом, но постоянном сопротивлении в месте ОЗЗ. Фазные емкости приняты симметричными.

С целью упрощения изложения материала и устранения неоднозначности в дальнейшем используется термин «сигнал от первичного датчика-преобразователя», который прямо пропорционален току несимметричной утечки на землю в контролируемом присоединении и совпадающий с ним по фазе. Ранее приведенные упрощения и связанные с ними допущения не оказывают существенного влияния на результаты проведенных исследований процессов протекания токов утечки на землю через большие переходные сопротивления.

При проведении теоретических исследований в качестве основной задачи была принята задача мониторинга состояния изоляции по амплитудной селекции для обнаружения повреждений изоляции при сравнительном анализе сигналов от датчиков-преобразователей.

В первом приближении, алгоритм работы, заключается в выделении из совокупности сигналов от первичных датчиков-преобразователей сигналов наибольших по уровню амплитуды и ранжировании исследуемых присоединений по

указанному признаку. Вместе с тем, не исключена ситуация, когда после ранжирования сигналов по амплитуде разница между несколькими наибольшими будет недостаточна для достоверного определения присоединения с ОЗЗ, в силу существенных различий между присоединениями к рассматриваемому РУ.

Простейшая проверка достоверности заключается в определении суммы сигналов в «здоровых» присоединениях и их сравнении с сигналом от присоединения с предполагаемым ОЗЗ [1]:

$$I_{\text{озз}} = \sum_i^{n-1} I_i;$$

где n – количество контролируемых присоединений;

I_i – сигнал от i –го присоединения.

Подобный прием обязателен для случая, когда надо убедиться в малых значениях емкостей сторонних присоединений вне зоны контроля, но эта проверочная процедура не исключает ложное обнаружение ОЗЗ.

Для снижения вероятности ложных обнаружений высоковольтных ОЗЗ необходимо применить алгоритм, обеспечивающий повышение достоверности обнаружения. С этой целью применяется использование информации о значении емкостей присоединений. Удобнее использовать не абсолютные значения емкостей присоединений, а их относительные, приведенные к некоторой минимальной емкости, таким образом, в качестве условной единицы измерения применяется минимальная емкость присоединения в зоне контроля:

$$C_i^{\text{пр}} = \frac{C_i}{C_{\min}}.$$

Далее по полученным результатам определяется средняя относительная емкость присоединений:

$$C_{\text{средн}}^{\text{пр}} = \sum_i^n \frac{C_i^{\text{пр}}}{n}.$$

Затем сигналы от датчиков для удобства анализа нормируются коэффициентом относительной емкости:

$$K_i(C) = \frac{C_i^{\text{пр}}}{C_{\text{пр}}}.$$

Далее в изложении индекс «пр» не используется, но подразумевается, что имеем дело с емкостями приведенными к минимальной.

Затем производим нормирование сигналов от датчиков-преобразователей заключается в определении отношения амплитуды сигнала от i –го датчика к коэффициенту относительной емкости этого присоединения:

$$I_{(i \text{ норм})} = \frac{I_i}{K_i(C)}.$$

В результате проведения подобного нормирования сигналы от всех датчиков-преобразователей становятся одинаковыми, что является принципиальной особенностью данного элемента алгоритма обработки [1]. Поскольку $I_{(i \text{ норм})} = \text{const}$, за исключением сигналов от датчиков-преобразователей на присоединениях с ОЗЗ, то может использоваться простая пороговая обработка результатов измерений. По результатам обработки получаем совокупность одинаковых (в пределах погрешности измерений) по амплитуде сигналов от датчиков на «здоровых» присоединениях и сигнал от датчика на присоединении с ОЗЗ. Для достоверного обнаружения ОЗЗ должно выполняться неравенство $L_i > 1$, то есть отношение $\left(C_{n-1} / C_i^{\text{озз}} \right)$ должно быть больше 1.

При моделировании ОЗЗ на присоединениях различной емкости относительно земли в произвольной сети с количеством присоединений больше 3, то справедливо выражение:

$$\frac{I_{\text{озз}}}{I_i} = \frac{C_{n-1}}{C_i}$$

Таким образом, при равенстве емкостей всех присоединений, сигнал от датчика на присоединении с ОЗЗ больше сигналов от остальных датчиков в $(n-1)$ раз, то есть:

$$I_{\text{озз}} = (n-1) \times I_i \quad (1)$$

Если количество присоединений больше 3 и присоединения имеют различные емкости то можем констатировать приближение к полученной зависимости (1), точно выполняющееся при равенстве емкостей всех присоединений. Подобный эффект может быть объясняем эффектом усреднения напрямую вытекающим из центральной предельной теории вероятности (теорема Ляпунова).

Ток нулевой последовательности, регистрируемый датчиком-преобразователем и ток в месте ОЗЗ равны друг другу только при определенных условиях. Значение тока в месте ОЗЗ и значение регистрируемого тока несимметричной утечки в присоединении с ОЗЗ могут существенно различаться в зависимости от соотношения между емкостью присоединения с ОЗЗ и емкостью всех остальных присоединений. Зависимость между указанными параметрами описывается формулой:

$$\frac{I_{\text{изм}}}{I_{\text{факт}}} = 1 - \frac{C_{\text{озз}}}{C_{\text{сети}}}$$

где $C_{\text{озз}}$ – емкость присоединения с ОЗЗ;

C_{n-1} – суммарная емкость остальных присоединений;

$I_{\text{изм}}$ – измеренное датчиком значение тока;

Иозз – фактический ток ОЗЗ в месте замыкания.

Приведенная зависимость находит применение в алгоритме работы системы в случаях, когда не соблюдается условие

$LI > 1$, то есть $\left(C_{n-1}/C_{i^{OЗЗ}}\right) < 1$ при выполнении условия $l > 3$. Данный прием позволяет получить повышение значения соотношений сигналов от датчика на присоединении с наибольшей емкостью при ОЗЗ на нем и ближайшего по уровню сигнала от датчика на некотором другом присоединении.

Применение описанных выше закономерностей в алгоритме работы системы централизованного контроля состояния изоляции позволяет эффективно обнаруживать присоединение с ОЗЗ через большое переходное сопротивление.

Использование анализа фазовых соотношений для повышения достоверности анализа состояния изоляции

Если амплитудный анализ не позволяет с достаточной достоверностью обнаружить присоединения с ОЗЗ, то для повышения достоверности в комплексе с ним применяется сравнительный анализ фазовых соотношений.

Ток нулевой последовательности в присоединении с ОЗЗ сдвинут на 90° в одну сторону от напряжения нулевой последовательности, а токи нулевой последовательности в остальных присоединениях сдвинуты на 90° в другую сторону. Картина сигналов от первичных датчиков после возникновения ОЗЗ через переходное сопротивление приведена на рис. 1. Переходной процесс подавлен в результате фильтрации.

Как видно из графиков на рис. 1 синусоиды 2 и 3 совпадают по фазе и сдвинуты вправо на 90° относительно синусоиды 4. а полезный сигнал - синусоида 1 - сдвинута влево на 90° .

Дополнение амплитудного сравнительного анализа фазовым позволяет достоверно обнаруживать присоединение с ОЗЗ даже при большом переходном сопротивлении.

Результаты полученные в результате теоретического исследования могут быть использованы при разработке алгоритма работы системы селективного контроля состояния изоляции или совершенствования существующей системы мониторинга изоляции.

При практическом применении системы контроля, основным фактором, определяющим верхнюю границу значения переходного сопро-

тивления в месте повреждения изоляции, является чувствительность датчиков-преобразователей.

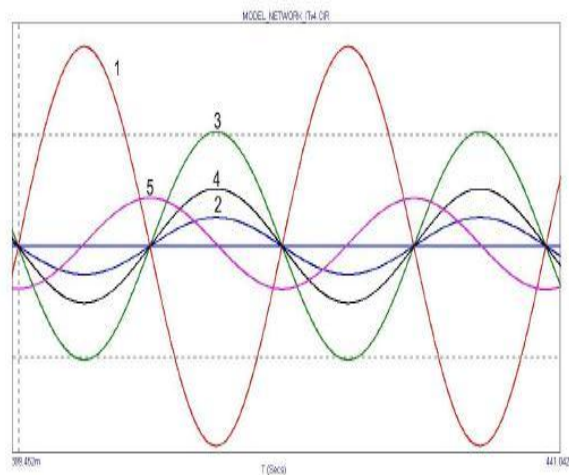


Рис.1 Соотношение фаз между сигналами от датчиков на кабеле с ОЗЗ и остальных датчиков на примере четырех контролируемых присоединений: 1 - сигнал от датчика присоединении с ОЗЗ, 2, 3, 4 - сигналы от присоединений без ОЗЗ (емкости присоединений различны), 5 - сигнал от датчика напряжения нулевой последовательности

Применение в системе контроля стандартных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) непосредственно в качестве датчика преобразователя не рекомендуется в силу недостаточной их чувствительности [4]. Повысить чувствительность трансформатора ТТНП можно с помощью концентратора информации [2], в состав которого входит усилитель сигнала, преобразователь его в цифровую форму и передачу его с использованием протокола Bluetooth. Концентраторы WDM выпускаются ООО «Dimrus».

Вывод

1. Проведенный анализ возможности мониторинга технического состояния изоляции кабелей 6-10 кВ в сетях с изолированной нейтралью, показал возможность построения централизованной системы селективного контроля состояния изоляции, на основе сравнительного анализа токов утечки и сдвига фаз в контролируемом присоединении, обеспечивающей эффективный контроль и достоверное обнаружение повреждений изоляции с высокими переходными

сопротивлениями в широком диапазоне значений неравномерности распределения емкости сети между присоединениями.

2. Предложено техническое решение конструкции датчика-преобразователя на основе существующих отечественных элементов.

Список литературы

1. О.А. Глухов, Э.Н. Фоминич, А.В. Кильдияров, Д.Д. Малинин, Д.О. Глухов, С.Е. Назаров. Анализ эффективности централизованной системы селективного контроля состояния изоляции 6-10 кВ в сетях с изолированной нейтралью.-Технологии электромагнитной совместимости.- 2009.№4.- стр.27-31.
2. Базовый модуль-приемник «WDM». Руководство по технической эксплуатации. Версия 1.0. – Изд. «Dimrus».-2019.
3. Правила устройства электроустановок. Шестое и седьмое издания.
4. Иванов Е.А. Глухов О.А. Пофидерный контроль изоляции: пришло время новых решений.- Новости электротехники. – 2004.-№3.-с. 60-62.
5. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В.Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов. -М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. - 280 с: ил.
6. Электротехнический справочник: В 4 т. Т2. .Электротехнические изделия и устройства/ Под общей редакцией профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др.-9- е изд.- М.: Издательство МЭИ, 2004. – 964 с.
7. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г., Кравченко И.И. Способ повышения надёжности воздушных линий электропередачи. Успехи Современной Науки. 2016;2(10):73-75.
8. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118 с.
9. Герасимова В.Г. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Герасимова В. Г. - Москва: Издательский дом МЭИ, 2017
10. Гуревич В.И. Оперативные цепи постоянного тока. Проблемы контроля изоляции. Новости ЭлектроТехники. № 1(73) 2012

References

- Compatibility Technologies.-2009.No4. - pp.27-31.
2. Basic receiver module "WDM". Technical operation manual. Version 1.0. –Ed. «Dimrus».-2019.
3. Rules for the installation of electrical installations. Sixth and seventh editions.
4. Ivanov E.A., Glukhov O.A. Feeder insulation control: it's time for new solutions.- Electrical engineering news. – 2004.-No3.-p. 60-62.
5. Zhelezko Yu.S., Artemyev A.V., Savchenko O.V. Calculation, Analysis and Rationing of Electric Power Losses in Electric Networks. A Guide for Practical Calculations. - Moscow: Publishing House of the Scientific Center ENAS, 2004. - 280 p.: ill.
6. Electrotechnical reference book: In 4 vols. T2. Electrical Products and Devices/ Under the general editorship of MPEI professors V.G. Gerasimov and others.-9- e izd.- M.: Izdatelstvo MPEI, 2004. – 964 p. (In Russian)
7. Kudryakov A.G., Sazykin V.G., Kravchenko I.I. Spособ povysheniya nadezhnosti overhead elektropredachnykh linii [Method of improving the reliability of overhead power transmission lines]. Uspekhi sovremennoy nauki [Advances in modern science]. 2016; 2(10):73-75.
8. Vainshteyn R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. Rezhimy zazemleniya neutrali v elektricheskikh sistem [Neutral grounding modes in electric systems]. Tomsk: TPU Publ., 2006. 118 p.
9. Gerasimova V.G. Electrotechnical reference book: In 4 vols. T. 3. Production, transmission and distribution of electric energy / Gerasimova V.G. - Moscow: MPEI Publishing House, 2017
10. Gurevich V.I. Operative Direct Current Circuits. Control Problems Isolation. ElektroTechnica news. № 1(73) 2012

1. O.A. Glukhov, E.N. Fominich, A.V. Kildiyarov, D.D. Malinin, D.O. Glukhov, S.E. Nazarov. Analysis of the Efficiency of the Centralized System of Selective Control of the State of 6-10 kV Insulation in Networks with Isolated Neutral.-Electromagnetic

УДК 621.3990.009.06

Устройство для измерения и обработки первичной информации

Скрябина Е.В.¹, Михайлова О.С.²

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, Россия, skryabina_ev@mail.ru, r_o_c_86@mail.ru

Статья поступила 20.02.2025 г.; после доработки 21.02.2025 г.

Аннотация

Рассмотрена задача первичной обработки характеристик на ядерных энергетических объектах с возможностью использования территориально совмещенных измерительных устройств с одновременной обработкой больших информационных массивов с применением цифровой и вероятностной формой представления информации

Ключевые слова: вероятностно-цифровое устройство, территориально совмещенные измерительные устройства.

A device for measuring and processing primary information

Skryabina, E.V.¹, Mikhailova O.S.²

¹ Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, skryabina_ev@mail.ru,
r_o_c_86@mail.ru

Received 20.02.2025 y.; received in final form 21.02.2025 y.

Abstract

The problem of primary processing of characteristics at nuclear power facilities with the possibility of using geographically combined measuring devices with simultaneous processing of large information arrays using digital and probabilistic forms of information representation is considered.

Keywords: probabilistic digital device, geographically combined measuring devices

Введение

На объектах ядерной энергетики актуально проведение мониторинга различных характеристик, количество которых имеет очень большой информационный объем. Целесообразно уменьшение передаваемой информации от технических средств за счет первичной обработки.

Существующие средства, построенные на программно-алгоритмическом принципе работы и традиционным представлением информации в виде позиционных кодов на являются стойкими к радиационному влиянию. Также, такие устройства плохо справляются с выполнением статистической обработки данных программным путем в реальном масштабе времени, используя множество групповых арифметических операций.

Постановка задачи

Рассмотреть задачу первичной обработки характеристик на ядерных энергетических объектах с возможностью использования территориально совмещенных измерительных устройств с одновременной обработкой больших информационных массивов с применением цифровой и вероятностной формой представления информации.

Решение задачи

Реализация поставленной задачи возможна с помощью измерительного устройства, в состав которого входит блок преобразователей формы представления входных данных. В его состав включены следующие видов преобразователей:

амплитуда – вероятность, фаза – вероятность, частота – вероятность, двоичное число – вероятность [1].

Схема предлагаемого устройства представлена на рисунке 1.

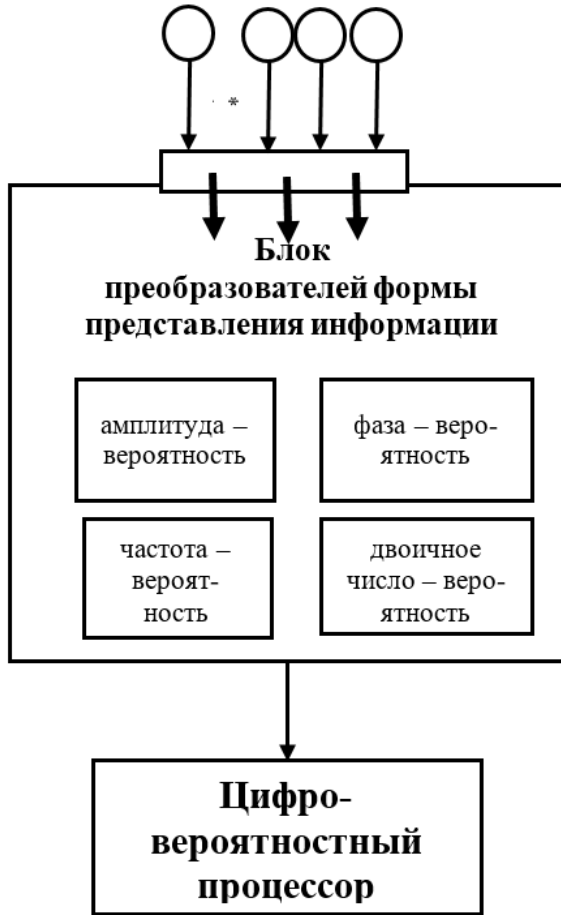


Рис. 1 Схема измерительного устройства

Устройство преобразует входные данные от датчиков в вероятностную форму представления в соответствии с выражением 1 [2].

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i > R(t_{ij}) \\ 0 & \text{при } x_i \leq R(t_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

где x_i – i -е значение параметра преобразуемого сигнала $X(t)$ [3];

$R(t_{ij})$ – j -е значение параметра вспомогательного случайного сигнала $R(t)$, изменяющегося в интервале изменения $X(t)$;

$i = 1, N$ – число циклов преобразования сигнала $X(t)$;

$j = 1, K$ – количество статистических испытаний каждого значения x_i внутри временного интервала $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$;

y_{ij} – значение вероятностного отображения параметра сигнала x_i из ряда $Y_i(t) = \{y_{i1}; y_{i2}; \dots y_{ij}; \dots y_{iK}\}$.

В соответствии с представленным выражением, каждое входное значение x_i заменяется соответствующим ему вероятностным отображением $Y_i(t)$, вероятность появления «1» в котором

$$P(y_{ij} = 1) = P[R(t) < (x_i = r)] = \sum_{q=1}^r y_{ijq} P_q = M[Y_i(t)] \quad (2)$$

это математическое ожидание от отображения и численно соответствует значению интегрального закона распределения вспомогательного сигнала $R(t)$ при уровне сравнения x_i .

Если $R(t)$ подчиняется равномерному закону, то

$$P(y_{ij} = 1) = M[Y_i(t)] = x_i \quad (3)$$

обратное преобразование x_i из вероятностного отображения выполняется.

Свойством вероятностного отображения является то, что каждое значение не зависит от предыдущего и последующего, и для выполнения операций сложения и умножения в вероятностном процессоре требуется в сотню раз меньший объем аппаратных элементов. Вероятностное преобразование имеет и свои минусы: более низкий частотный диапазон обрабатываемых сигналов при работе в реальном масштабе времени, обратную зависимость точности от быстроты действия.

С помощью определения дисперсии (4), квадратичной (5) и абсолютной погрешностей (6) выполнен анализ количественных характеристик этой зависимости [4].

$$D(x_i^*) = \frac{1}{K^2} \sum_{j=1}^K \sum_{l=1}^2 [y_{ijl} - M(y_{ijl})]^2 P_l = \frac{1}{K} [F_{x_i}(R) - F_{x_i}^2(R)] \quad (4)$$

$$\sigma(x_i^*) = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{F_{x_i}(R) - F_{x_i}^2(R)} \quad (5)$$

$$\Delta_{БП} = \sqrt{2\Phi^{-1}(P)} \sigma(x_i^*) = \frac{\sqrt{2\Phi^{-1}(P)}}{\sqrt{K}} \sqrt{F_{x_i}(R) - F_{x_i}^2(R)} \quad (6)$$

На основании выражения (6) решена задача определения ошибки, которая проявляется при вероятностном преобразовании исходной величины. В результате определено, что при увеличении количества статистических испытаний K величина погрешности уменьшается.

Для выявления количественных закономерностей оценены и рассмотрены случаи, когда вспомогательная случайная функция распределена нормально с интегральным законом.

$$F(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-0,5\xi^2} d\xi \quad (7)$$

Если применить функцию Лапласа, подставленное выражение преобразится в следующий вид

$$F(R) = 0,5 \left[1 + \Phi \left(\frac{r - m_r}{\sigma_r} \right) \right] \quad (8)$$

где m_r и σ_r - математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение вспомогательной случайной функции $R(t)$.

Используя полученное выражение для приведенной погрешности УВП получено

$$\gamma_{ВП} = \frac{\sqrt{2}\Phi^{-1}(P)100\%}{\sqrt{K}} \times$$

$$\sqrt{\left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{x_i - m_r}{\sigma_r} \right) \right] - \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{x_i - m_r}{\sigma_r} \right) \right] \right\}^2 \right\}} \quad (9)$$

На основании (9) выявлено, что погрешность вероятностного преобразования уменьшается при определенном количестве статистических испытаний. В частности, при даже небольшим значении $K=144$, погрешность не превышает 8%.

В случае, когда вспомогательный случайный сигнал $R(t)$ подчиняется равномерному закону распределения, абсолютная погрешность преобразуется в следующий вид

$$\Delta_{ВП} = \frac{\sqrt{2}\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{x_i(1-x_i)} \quad (10)$$

Если $x_i = 0,5$ оценка погрешности сверху будет иметь значение

$$\Delta_{ВП_{\max}} \leq 0,7\Phi^{-1}(P)/\sqrt{K} \quad (11)$$

Используя доверительную вероятность $P = 0,9973$, получено, что $0,7\Phi^{-1}(P) = 1,645$.

В итоге

$$\Delta_{ВП_{\max}} \leq \frac{1,645}{\sqrt{K}}$$

$$\text{и} \quad \gamma_{ВП_{\max}} \leq 164,5/\sqrt{K} \% \quad (12)$$

В результате проведенных исследований принято, что наиболее целесообразно использование вероятностной формы представления данных при выполнении большого количества групповых операций умножения и сложения, а именно, при выполнении корреляционного, дисперсионного и спектрального анализа [5].

Погрешность вероятностного умножения определена, используя метод последовательного нахождения дисперсии и среднеквадратического отклонения оценки.

$$D\left(\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K y_{qj}\right) = \frac{1}{K^2} \sum_{j=1}^K D(y_{qj}) =$$

$$= \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left[\frac{Q}{q=1} y_{qj} - M \left(\frac{Q}{q=1} y_{qj} \right) \right]^2 \quad P_l = \frac{1}{K} \prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R) \left[1 - \prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R) \right] \quad (13)$$

Выражение для абсолютной погрешности умножения вероятностно преобразованных сигналов примет вид [6]

$$\Delta_{BV} = \frac{1,41\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{\prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R) \left[1 - \prod_{q=1}^Q F_{x_q}(R) \right]}, \quad (14)$$

откуда следует, что при фиксированном числе испытаний погрешность вероятностного умножения достигает максимального значения при $x_1 x_2 = 0,5$. Таким же методом определена абсолютная погрешность при суммировании [7].

$$\Delta_{BC} = \sqrt{2}\Phi^{-1}(P) \sigma \left(\sum_{q=1}^Q x_q \right)^* =$$

$$= \frac{1,41\Phi^{-1}(P)}{\sqrt{K}} \sqrt{\sum_{q=1}^Q F_{x_q}(R_q) [1 - F_{x_q}(R_q)]}. \quad (15)$$

Сравнивая погрешность представления данных, нетрудно подсчитать, что для достижения соизмеримой погрешности в 0,39% величину количества статистических испытаний следует выбирать $K \sim 180000$.

Заключение

Выполненные расчеты при использовании

различных законов распределения вспомогательных случайных величин показывают, что полученные результаты позволяют сделать выводы, что в реальном масштабе времени могут обрабатываться сигналы $f_B = 20 \text{ МГц}$, что вполне допустимо требованиям ядерной энергетики и промышленности.

Использование вероятностной формы представления информации в измерительных устройствах позволяет получить наилучшее соответствие и сочетание точности, быстродействия и аппаратного объема.

Список литературы

1. Скрябина Е.В. Средства обработки информации с первичных преобразователей и методы диагностики технического оборудования ЯЭУ. Доклад// Сборник «Десятая Международная научно-практическая конференция по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс ЯЭУ», октябрь 2012 г Севастополь.
2. Гладкий В.С. Вероятностные вычислительные модели / В.С. Гладкий. - М.: Наука, 1973. - 300 с.
3. Лившиц Н.А. Пугачёв В.Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления: В 2 т., Т. 1 – М.: Советское радио, 1963. – 896 с/
4. Сапожников Н.Е., К вопросу о точности преобразователей «вероятность-число»; - Теберда: сб. Всесоюзной школы-семинара "Передача, обработка и отображение информации", 1993
5. Сапожников Н.Е., К вопросу о точности вероятностного умножения, - Севастополь: сб. "Подходы в улучшении профессионального становления выпускников высшей школы", СВВМИУ, 1992 г.
6. Сапожников Н.Е. О точности измерения дисперсии цифро-вероятностным методом // Приборостроение. - Вып.17, 1974 - С.13-22.
7. Сапожников Н.Е., О погрешности вероятностного сложения, - Теберда: сб. Всесоюзной школы-семинара "Передача, обработка и отображение информации", Теберда-Харьков, 1991

References

1. Scriabina E.V. Information processing tools from primary converters and diagnostic methods for nuclear power plant technical equipment. Report// Collection of the Tenth International Scientific and Practical Conference on Atomic Energy "Safety, Efficiency, nuclear power plant resource", October 2012 Sevastopol.
2. Gladkiy V.S. Probabilistic computational models / V.S. Gladkiy, Moscow: Nauka Publ., 1973, 300 p.
3. Livshits N.A. Pugachev V.N. Probabilistic analysis of automatic control systems: In 2 volumes, vol. 1 – Moscow: Soviet Radio, 1963. – 896 p./
4. Sapozhnikov N.E., On the issue of the accuracy of

the "probability-number" transformations; - Teberda: collection of the All-Union school-seminar "Transmission, processing and display of information", 1993

5. Sapozhnikov N.E., On the issue of the accuracy of probability multiplication, Sevastopol: collection of "Approaches to improving the professional development of graduates of higher education", St. Petersburg State Medical University, 1992.
6. Sapozhnikov N.E. On the accuracy of variance measurement by the digital-probabilistic method // Instrumentation. - Issue 17, 1974 - С.13-22.
7. Sapozhnikov N.E., On the error of probabilistic addition, Teberda: collection of the All-Union school-seminar "Transmission, processing and display of information", Teberda-Kharkov, 1991

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 535.417

Исследование ширины интерференционных полос**В.В. Довгаленко¹, С.С. Чернобаев², Д.В. Кукуруз³.***ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, fizik71@yandex.ru**¹Старший преподаватель кафедры «Физика»; ²студент кафедры «Ядерные энергетические установки»;
³студент кафедры «Ядерные энергетические установки»*

Статья поступила 04.02.2025 г. после доработки 07.02.2025 г.

Аннотация

В статье представлено описание лабораторной работы «Исследование ширины интерференционных полос», разработанной с использованием установки ФПВ 05-3-2 для студентов направления подготовки 14.05.02 «Проектирование и эксплуатация атомных станций» и «Система контроля и управления атомных станций», 14.03.01 - «Ядерная энергетика и теплофизика», 16.03.03 - «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» с целью повышения качества усвоения теоретического материала по теме «Колебания и волны».

Ключевые слова: физика, лабораторная работа, свет, интерференция, длина волны.

Investigation of the width of interference fringes**Dovgalenko V.V., Chernobaev S.S., Kukuruz D.V.***Sevastopol state University, 33 Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia, fizik71@yandex.ru**¹ Senior lecturer of the department of «Physics»; ² student of the department of «Nuclear power plants»; ³ student of the department of «Nuclear power plants»*

Received 04.02.2025 y.; received in final form 07.02.2025 y.

Annotation

The article presents a description of the laboratory work " Investigation of the width of interference fringes ", developed using the FPV 05-3-2 installation for students of the training direction 14.05.02 "Design and operation of nuclear power plants" and "Control and management system of nuclear power plants", 14.03.01 - "Nuclear power and thermophysics", 16.03.03 - "Refrigeration, cryogenic equipment and life support systems" in order to improve the quality of assimilation of theoretical material on the topic "Vibrations and waves".

Keywords: physics, laboratory work, light, interference, wavelength.

Введение

Основные законы оптики известны еще с древних веков. Так, к концу XVII века появились две теории света - корпускулярная теория, предложенная Исааком Ньютоном, и волновая теория, выдвинутая Робертом Гуком и Кристианом Гюйгенсом. По теории Ньютона скорость распространения света в среде должна быть всегда больше скорости его распространения в вакууме, что, согласно постулатам Эйнштейна, невозможно.

По современным представлениям свет, с точки зрения электромагнитной природы света, представляет собой поперечные электромагнитные волны, распространяющиеся в вакууме со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Волновая природа света проявляет себя в явлениях интерференции, дифракции, дисперсии и поляризации.

Одним из первых, кто выдвинул гипотезу о волновой природе света, был Пифагор, который считал, что свет — это поток маленьких частиц, которые возникают при колебаниях светящихся тел. Эта идея была развита в корпускулярной

теории света. Однако, эта теория не могла объяснить некоторые явления, связанные с распространением света, такие, как дифракция и интерференция.

В нашей работе мы рассмотрим явление интерференции.

Интерференцией световых волн называется явление, возникающее при сложении когерентных волн. В результате интерференции происходит ослабление или усиление интенсивности света, в зависимости от соотношения фаз складываемых волн, т. е. происходит перераспределение энергии волн в пространстве, согласно закону сохранения энергии. Условием интерференции волн одной и той же длины является их когерентность, т. е. согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. Это явление обычно характеризуется чередующимися в пространстве максимумами и минимумами интенсивности света. Конкретный вид такого распределения интенсивности света в пространстве или на экране, куда падает свет, называется интерференционной картиной. Для наблюдения интерференции необходимо использовать монохроматические (неограниченные в пространстве волны одной строго определенной частоты и постоянной амплитуды) источники света, такие как лазеры, что в нашей работе мы и будем применять.

Для получения когерентных волн применяются различные методы. До появления лазеров во всех приборах для наблюдения интерференции света когерентные лучи получали разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих от одного и того же источника. Первым это осуществил английский ученый Томас Юнг. В 1801 году Юнг провел демонстрационный эксперимент по наблюдению интерференции света, получив интерференцию от двух щелевых источников света. Этот опыт Юнга стал классическим и доказал волновую природу света, что в свою очередь вызвало ожесточенные нападки на него со стороны сторонников корпускулярной теории света.

Для полноценного понимания природы света студентам необходимо провести лабораторные работы, позволяющие эмпирически подтвердить волновую природу света. Такая демонстрация волновых свойств света может быть осуществлена посредством экспериментов на установке ФПВ 05-3-2, которая позволяет наглядно увидеть зависимость ширины интерференционной полосы от расстояния от экрана до источника света.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Разработать лабораторную работу «Исследование ширины интерференционной полосы», выполняемую, на установке ФПВ 05-3-2.
2. Внедрить данную лабораторную работу в учебный процесс для студентов технических специальностей направлений подготовки 14.05.02 «Проектирование и эксплуатация атомных станций» и «Система контроля и управления атомных станций», 16.03.03 - «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».

Основная часть

Лабораторная работа – это вид учебной деятельности, в процессе которой выполняются практические задачи, эксперименты и исследования для получения и закрепления знаний.

Лабораторные работы можно классифицировать по:

- уровню сложности;
- основной задаче работы;
- методике выполнения;
- предметной области;
- уровню наглядности.

Разделение по уровню сложности.

По уровню сложности лабораторные работы можно разделить на 3 группы:

1) работы начального уровня разработаны для школьников и студентов 1-го курса. В основном являются метрологическими и включают в себя простые эксперименты: измерение физических величин (как правило, основных) и/или наблюдение базовых физических явлений/проявлений основных законов физики в природе;

2) работы среднего уровня разработаны для студентов средних курсов (2-3). Они включают в себя многостадийные вычисления, а также углублённое изучение законов механики, термодинамики и электричества;

3) работы продвинутого уровня предназначены для студентов выпускных курсов, магистров и аспирантов. Они включают в себя не только многоступенчатые расчёты, но и эксперименты, требующие глубинного понимания физики и умения комплексно анализировать физические явления.

Классификация по основной задаче.

По этому критерию лабораторные работы

можно условно разделить на 2 категории: метрологические и исследовательские.

Суть метрологических лабораторных работ состоит в измерении величин, необходимых для вычисления какой-либо константы, умении вычислять погрешности измеряемых величин, установлении классов точности измерительных приборов.

Примером метрологической лабораторной работы в курсе физики является лабораторная работа "Измерение плотности вещества", так как в этой работе плотность высчитывается за счёт измерения параметров тела: диаметра, высоты, массы и т.д. и вычислений над ними.

Исследовательская лабораторная работа направлена на изучение какого-либо конкретного явления, а также направлена на выявление зависимости одних физических величин от других. В этом случае акцент делается не столько на измерение величин, сколько на проведение самого эксперимента, в ходе которого это явление и наблюдается.

Примером исследовательской лабораторной работы является "Изучение явления дифракции света". В ходе этой работы проводится минимальное количество измерений и акцент ставится на наблюдение явления дифракции светового луча, испускаемого источником и проходящего через дифракционную решётку.

Классификация по методике выполнения работы.

Исходя из методики проведения лабораторных работ по физике, можно выделить три основных направления.

1. Наблюдение и анализ различных явлений, процессов.

В ходе выполнения работ такого типа целью является научить студентов видеть и понимать физические явления в природе, а также сопоставлять эти явления с законами физики.

Примером такой работы может стать "Изучение явления преломления света", так как целью этой работы является демонстрация физического явления и его следствий.

2. Изучение устройства и принципов работы оборудования.

Такие лабораторные работы, как правило, нацелены на обучение работе с приборами для проведения физических экспериментов и рассчитаны на обучающихся 7-8 классов.

Примером такой работы является "Изучение электроизмерительных приборов". В ходе этой работы учащиеся знакомятся с амперметром, вольтметром и др. контрольно-измерительными

приборами.

3. Исследование качественных и количественных зависимостей между явлениями.

Эти работы, требуют от обучающихся базовых знаний физики, её законов, а также умений их анализировать. Такие работы можно отнести к метрологическим, ведь для вычисления зависимостей между величинами требуется большое количество разноплановых измерений.

Примером такой работы является "Динамика вращательного движения". В ходе этой работы вычисляется и эмпирически доказывается зависимость между угловым ускорением и моментом силы при постоянном моменте инерции.

Классификация по предметной области.

Этот критерий разделяет лабораторные работы на категории, в зависимости от того, какой раздел физики исследуется в них.

- Механика: изучение движения тел, сил, энергии и импульса.
- Термодинамика: исследование тепловых процессов, изменения температуры, давления и объема газов.
- Электричество и магнетизм: эксперименты с электрическими цепями, магнитными полями и электромагнитными волнами.
- Оптика: исследование световых волн, преломления, отражения и дифракции света.
- Ядерная физика: измерение радиоактивного излучения, исследование ядерных реакций.

По уровню наглядности.

Этот критерий отвечает за то, кто и в каком формате (электронном или материальном) выполняет работу.

- *Демонстрационные лабораторные работы* проводятся преподавателем перед студентами для демонстрации физического явления.
- *Практические лабораторные работы* студенты выполняют самостоятельно с целью экспериментального подтверждения и проверки теоретических положений (законов, зависимостей).
- *Компьютерные лабораторные работы* при проведении которых используются компьютерные модели и симуляции для изучения физических процессов.

Цели лабораторной работы

Помимо достижения конкретных целей, каждая лабораторная работа, в зависимости от ее содержания, также способствует:

- овладению навыками работы с контрольно-

измерительными приборами и другим лабораторным оборудованием;

- выработке умения применять математические формулы и физические законы для вычисления различных величин;
- умению применять знания на практике;
- получению навыков работы в команде;
- возможности утвердиться в выбранной профессии.

В заключение следует добавить, что лабораторный практикум – неотъемлемая часть учебного процесса, благодаря которому можно убедиться, что физика – это не просто абстрактный набор формул и терминов, а логичная система закономерностей, по которым мы существуем в этом мире.

Лабораторную работу «Исследование ширины интерференционной полосы» можно отнести к исследовательской, выполняемой на установке ФПВ-05-3-2.

Порядок выполнения лабораторной работы обучающиеся могут найти в методическом пособии, составленном специально под данную работу.

В начале лабораторной работы студенту предлагается ознакомиться с устройством установки (рис.1).

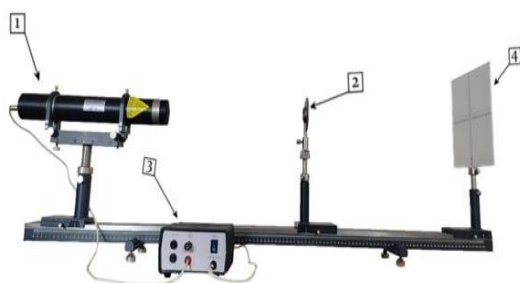


Рис. 1. Установка «ФПВ 05-3-2»: 1 – лазер; 2 - объект с щелями; 3 - приборная доска. 4 – экран.

Как было сказано выше, первым опытом, доказавшим явление интерференции света и тем самым подтвердившим волновую природу света, был опыт Юнга (1801 г). Он и был взят нами за основу в разработке данной лабораторной работы.

Схематичное изображение опыта Юнга представлено на рис. 2.

Далее в работе представлена формула (ее вывод подробно дан в вышеуказанном методическом пособии) для вычисления периода интерференционной решетки, которая указывает на ли-

нейную зависимость ширины интерференционной полосы от расстояния щелей до экрана:

$$\Delta y = \frac{L}{d} \lambda, \quad (1)$$

где d – расстояние между щелями (37500,4 нм); L – расстояние от объекта (двух щелей) до экрана; Δy – период интерференционной решетки (ширина интерференционной полосы или расстояние между соседними минимумами интенсивности); λ – длина волны красного цвета, равная 632,82 нм.

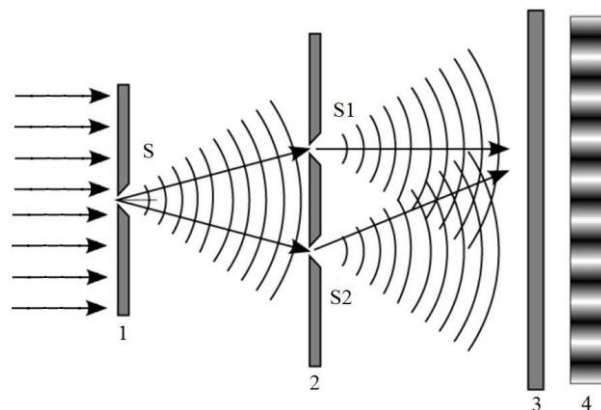


Рис. 2. Схема опыта Юнга

Целью выполнения лабораторной работы является подтверждение справедливости формулы (1).

Для этого студентам придется рассчитать период интерференционной решетки, по формуле:

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{N},$$

где Δr – расстояние от крайнего минимума до центра; N – общее число минимумов, деленное на 2. Данные расчеты проводятся несколько раз (по указанию преподавателя) при разных расстояниях от объекта до экрана.

Для линеаризации формулы (1) вводится коэффициент пропорциональности k :

$$k = \frac{\lambda}{d}.$$

Подставляя в (1), получаем:

$$\Delta y = kL.$$

Затем необходимо построить график зависимости $\Delta y = f(L)$. Если график покажет прямо пропорциональную зависимость, то следует путем аппроксимации графика прямой, определить коэффициент наклона k . Для большей точности выполнения работы рекомендуется воспользоваться приложением Excel и определить k , используя функцию «ЛИНЕЙН». После этого

можно будет определить расстояние между щелями по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{k}$$

Для оценки точности полученного результата, студенты должны сравнить его с паспортными данными оборудования.

Ниже представлены результаты вычислений одного из студентов, выполнявших данную лабораторную работу (рис. 3), а также интерференционная решетка, полученная в ходе ее выполнения (рис. 4).

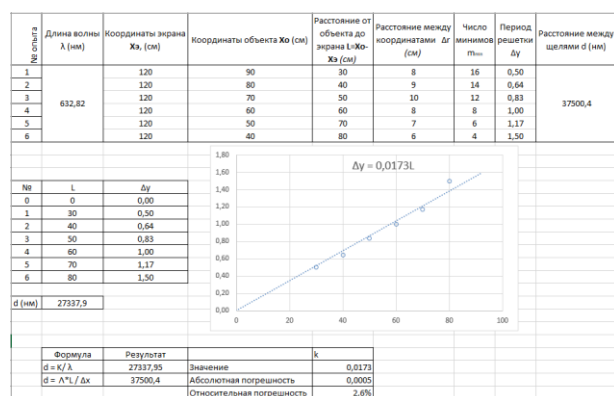


Рис. 3. Результаты проведения работы

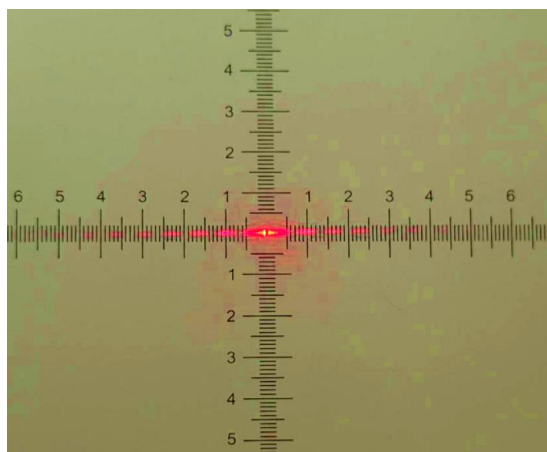


Рис. 4. Интерференционная решетка.

Заключение

В представленной лабораторной работе по теме «Исследование ширины интерференционной полосы» была детально изучена зависимость ширины интерференционных полос от расстояния между экраном и источником света. Экспериментально подтверждено, что ширина полос возрастает с увеличением расстояния до экрана, что соответствует теоретическим предсказа-

ниям, основанным на принципах волновой оптики.

Полученные результаты демонстрируют важность точного контроля и измерения расстояний в интерференционных экспериментах. Знание этой зависимости позволяет не только лучше понять фундаментальные аспекты волновой природы света, но и применять эти знания в практических задачах, таких как настройка оптических приборов и систем.

Для студентов технических специальностей данный эксперимент является полезным упражнением с целью освоения навыков работы с оптическим оборудованием и анализа экспериментальных данных. Кроме того, выполнение таких работ способствует развитию критического мышления и понимания сложных физических явлений, что крайне важно для их профессионального роста и успешной карьеры в сфере науки и техники.

Список литературы

1. Марьин С.С. Понятие интерференции света и методы ее наблюдения / Марьин С.С. // в сборнике: Молодежь: наука и творчество. Сборник трудов Студенческого конкурса творческих работ. 2017. С. 244-249.
2. Баранова Л.В., Байсова Б.Т. Интерференция света. учебно-методическое пособие по курсам «Оптика» и «Общий физический практикум» / Омск, 2020.
3. Экспериментальное изучение интерференции света в вузе. Иванова М.С., Михайлин Д.И. В сборнике: Проблемы учебного физического эксперимента. Сборник научных трудов XXIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор: В. В. Майер. 2019. С. 51-53.
4. Интеграция различных видов лабораторных работ при обучении физике. Кучеренко Л.В., Слабженникова И.М. Физическое образование в ВУ-Зах. 2020. Т. 26. № 1. С. 71-80.
5. Юнг Т. Об интерференции света и ее проявлениях / Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки. – М.: Высшая школа, 1989. – 576 с.
6. Методика организации и проведения самостоятельной работы студентов в рамках физического практикума. Логанова Л.М., Малиновская В.А. Современные вопросы теории и практики обучения в вузе. 2008. № 8. С. 96-100.
7. Природа света. Баркар А.П. В сборнике: Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире. Сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции.

Уфа, 2024. С. 6-10.

8. Довгаленко В.В. Определение расстояния между двумя щелями интерференционным методом. / Довгаленко В.В. // Энергетические установки и технологии: науч. Журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2023. – Т. 9. - № 4, С. 47-50.

References

1. Maryin S.S. The concept of light interference and methods of its observation / Maryin S.S. // in the collection: Youth: science and creativity. Collection of works of the Student creative works competition. 2017. pp. 244-249.
2. Baranova L.V., Baisova B.T. Interference of light. educational and methodical manual for the courses «Optics» and «General Physical practice» / Omsk, 2020.
3. Experimental study of light interference at the university. Ivanova M.S., Mikhailin D.I. In the collection: Problems of educational physical experiment. Collection of scientific papers of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Responsible editor: V. V. Mayer. 2019. pp. 51-53.
4. Integration of different types of laboratory work in teaching physics. Kucherenko L.V., Slabzhennikova I.M. Physical education in universities. 2020. Vol. 26. No. 1. pp. 71-80.
5. Jung T. On the interference of light and its manifestations / Golin G.M., Filonovich S.R. Classics of physical science. – M.: Higher School, 1989. – 576 p
6. Methods of organizing and conducting independent work of students in the framework of a physical workshop. Logunova L.M., Malinovskaya V.A. Modern issues of theory and practice of higher education. 2008. No. 8. pp. 96-100.
7. The nature of light. Barkar A.P. In the collection: Fundamental and applied scientific research: innovation in the modern world. Collection of scientific articles based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference. Ufa, 2024. pp. 6-10.
8. Dovgalenko V.V. Determination of the distance between two slits by the interference method. / Dovgalenko V.V. // Power plants and technologies: scientific. Journal. – Sevastopol: FGAOU IN SevSU, 2023. – Vol. 9. - No. 4, P. 47-50.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (В ЭНЕРГЕТИКЕ)

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

Эффективность применения модулярной арифметики в информационных системах**Е.А. Контылева¹, С.А. Маврин¹**¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, eakontyleva@sevsu.ru

Статья поступила 03.02.2025 г.; после доработки 05.02.2025 г.

Аннотация

В статье рассматриваются основные принципы модулярной арифметики, её применение в информационных системах, проводится оценка эффективности использования данной методологии в современных вычислительных задачах.

Ключевые слова: модулярная арифметика, информационные системы, криптографические технологии.

The effectiveness of modular arithmetic in information systems**E.A. Kontyleva¹, S.A. Mavrin¹**¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
eakontyleva@sevsu.ru

Received 03.02.2025 y.; received in final form 05.02.2025 y.

Abstract

The article discusses the basic principles of modular arithmetic, its application in information systems, and evaluates the effectiveness of using this methodology in modern computing tasks.

Keywords: modular arithmetic, information systems, cryptographic technologies.

Введение

Модулярная арифметика представляет мощный инструмент в области информатики и криптографии, обеспечивая эффективные вычислительные методы и безопасность данных.

Известна она и как остаточная арифметика, играющая ключевую роль в современных вычислительных системах [5]. Основная идея заключается в выполнении операций над целыми числами в пределах определенного множества [3], что особенно актуально в контексте обработки больших данных и криптографических алгоритмов.

Как отмечают многие исследователи, такие методы позволяют не только значительно сократить объём вычислений, но и повысить уровень безопасности, особенно в системах, подверженных киберугрозам [6].

Постановка задачи

В данной статье рассматриваем и исследуем эффективность применения методов логической обработки информации в модулярной системе счисления в информационных системах (криптография, сетевые протоколы, приложения).

Проведенные исследования

Модулярная арифметика основывается на базовых операциях, для которых ключевым моментом является остаток от деления. Для двух целых чисел (a) и (b) и заданного натурального числа (m):

- Сложение: $((a+b) \bmod m)$;
- Вычитание: $((a-b) \bmod m)$;
- Умножение: $((a \times b) \bmod m)$.

Эти операции имеют определенные свойства, такие как коммутативность и ассоциативность, что делает их особенно удобными для реализации в вычислительных системах. Указанные операции могут быть легко адаптированы для работы с большими числами, что снижает требования к вычислительной мощности.

Применение в криптографии.

Одним из ключевых применений модулярной арифметики является криптография. Алгоритмы, такие как RSA, основываются на операции модульного Exponentiation, что обеспечивает безопасность данных. Модулярное вычисление позволяет эффективно управлять большими числами, используемыми в ключах шифрования.

Криптографические протоколы, такие как RSA и Диффи-Хеллман, зависят от модулярной арифметики для обеспечения безопасности передачи данных.

При использовании методов, основанных на больших простых числах и модулярных операциях, достигается высокая степень защиты информации.

1. Алгоритм Диффи-Хеллмана.

Этот протокол используется для обмена ключами по открытым каналам [1]:

- Пользователь А выбирает секретное число (a) и отправляет $(A = g^a \bmod p)$ пользователю В.
- Пользователь В выбирает секретное число (b) и отправляет $(B = g^b \bmod p)$ пользователю А.
- Оба могут вычислить общий секретный ключ:
 - $(KA \equiv B^a \bmod p)$;
 - $(KB \equiv A^b \bmod p)$.

Модулярная арифметика здесь обеспечивает безопасность при передаче, поскольку вычисление логарифма в конечных полях является трудной задачей.

2. Алгоритм RSA.

В алгоритме RSA:

1. Генерируются два больших простых числа.
2. Вычисляется их произведение (модуль (n)).
3. Модулярные операции применяются для генерации открытого и закрытого ключей, что делает процесс шифрования и расшифрования более безопасным.

Модулярная арифметика в криптографии используется для реализации различных алгоритмов, обеспечивающих конфиденциальность и целостность данных. Рассмотрим более детально некоторые ключевые криптографические протоколы [2].

Принципы работы:

1. Генерация ключей: Выбор двух больших простых чисел (p) и (q).
2. Определение модуля: $n = p \cdot q$.
3. Определение функции Эйлера: $(\phi(n) = (p-1)(q-1))$, которая используется для выбора открытого ключа.
4. Выбор открытого ключа: (e), такое что $(1 < e < \phi(n))$.
5. Вычисление закрытого ключа: $(d \equiv e^{-1} \bmod \phi(n))$.

Шифрование и расшифрование:

- Сообщение (m) шифруется как $(c \equiv m^e \bmod n)$.
- Расшифровка выполняется с помощью $(m \equiv c^d \bmod n)$.

Эта схема гарантирует безопасность за счёт сложности факторизации больших чисел. Атака на RSA, основанная на разложении (n), делает невозможным получение закрытого ключа без знания простых сомножителей (p) и (q).

3. Elliptic Curve Cryptography.

Эллиптическая криптография (ECC) — это метод шифрования, основанный на алгебраической структуре эллиптических кривых над конечными полями. Оптимизация алгоритмов в контексте криптографии, включая ECC, крайне важна для повышения производительности и безопасности [7]. Вот некоторые ключевые подходы и методы оптимизации:

Основные методы оптимизации:

1. Сокращение размера ключа:
 - Использование меньших ключей для достижения того же уровня безопасности, что уменьшает вычислительные затраты и требования к памяти.
2. Эффективные алгоритмы умножения:
 - Разработаны алгоритмы, такие как умножение на базу (double-and-add), для более эффективного выполнения операций на эллиптических кривых.

- Применение Winfrey's Method или Montgomery Ladder для ускорения вычислений с использованием эллиптических кривых.

3. Использование заранее вычисленных значений:

- Предварительное вычисление определенных значений может быть использовано для ускорения операций в дальнейшем. Например, можно заранее вычислить значения точки на кривой, что сокращает общее время вычислений.

4. Подбор кривых:

- Выбор эллиптической кривой с хорошими математическими свойствами может значительно ускорить вычисления. Это включает в себя анализ и выбор хороших множителей.

5. Оптимизация на уровне аппаратного обеспечения:

- Использование многопоточной обработки и распараллеливание задач для увеличения производительности. Например, некоторые операции могут быть выполнены параллельно на разных ядрах процессора.

- Использование специализированных токенов или аппаратных модулей для выполнения криптографических операций может значительно увеличить скорость по сравнению с программными реализациями.

6. Устойчивость к атакам:

- Важно учитывать, как оптимизации могут повлиять на безопасность. Например, некоторые алгоритмы могут быть уязвимы к методам атаки через временные каналы, поэтому защиты должны быть внедрены, чтобы минимизировать этот риск.

ECC использует свойства эллиптических кривых, где операции над точками кривой реализуются с помощью модулярной арифметики:

- Основная операция заключается в сложении двух точек на кривой, которая требует вычисления координат новых точек в пределах заданного модуля.

- ECC обеспечивает тот же уровень безопасности, что и RSA, при значительно меньших размерах ключей, что делает её более эффективной для использования в мобильных и встроенных системах.

Преимущества ECC:

1. Высокий уровень безопасности: ECC обеспечивает такой же уровень безопасности, как и традиционные методы шифрования (например, RSA), но при меньших размерах ключей. Это делает его более эффективным.

2. Скорость: Меньшие ключи уменьшают вычислительные затраты и время обработки, что

особенно важно для мобильных и встроенных устройств [4].

Оптимизация криптографических алгоритмов, особенно в контексте эллиптической криптографии, направлена на увеличение скорости вычислений, уменьшение потребления ресурсов и улучшение общей безопасности.

Важно находить баланс между эффективностью и защитой, чтобы сохранить как производительность, так и устойчивость к потенциальным угрозам.

3. Эффективность по энергии: ECC потребляет меньше энергии, что критично для устройств с ограниченной батареей.

Применения:

- Шифрование данных: ECC часто используется для передачи защищенной информации.

- Цифровые подписи: Эллиптические кривые могут создавать цифровые подписи, обеспечивая целостность и подлинность сообщения.

- VPN и HTTPS: ECC поддерживает протоколы, обеспечивающие безопасное соединение в сети.

Параллельные вычисления и оптимизация.

С увеличением объёмов данных и сложностью задач, параллельные вычисления становятся необходимым подходом для повышения производительности алгоритмов, использующих модулярную арифметику.

Метод оптимизации алгоритмов:

- Быстрое возведение в степень: Для модулярного возведения в степень используется метод "быстрого возведения", который разбивает операции на более мелкие, позволяя существенно сократить количество умножений:

- $(x^n \bmod m)$ может быть вычислено за логарифмическое время ($O(\log n)$) с использованием метода "разделяй и властвуй".

- Замена операций:

- Вместо стандартных операций умножения и деления используются более быстрые методы, например, алгоритм Карацубы для умножения больших чисел.

Метод параллелизации:

- Разделение больших вычислений на подзадачи, которые могут выполняться одновременно. Например, для алгоритма RSA можно распараллелить шифрование нескольких сообщений, увеличив скорость обработки.

- Параллельные библиотеки и аппаратные реализации: Проекты, такие как OpenMP и CUDA, предоставляют инструменты для реализации параллельных алгоритмов. Аппаратные решения, основанные на FPGA и ASIC, также ис-

пользуются для оптимизации криптографических операций, обеспечивая программируемую обработку модульных вычислений.

3. Примеры практического применения.

Некоторые современное применение параллельных вычислений в модулярной арифметике:

- Блокчейн-технологии применяют параллельные алгоритмы для валидации транзакций и вычисления хешей.

- Системы шифрования для облачного хранения данных, где множество запросов к базам данных могут быть распараллелены для ускорения ответа.

Объективно оценивая эффективность модулярной арифметики, можно утверждать, что она является неотъемлемым инструментом в контексте современных информационных систем, обеспечивая как вычислительную эффективность, так и безопасность данных. Тем не менее, необходимо продолжать исследования в данной области для оптимизации существующих алгоритмов и разработки новых подходов, способных учесть растущие требования информационных технологий.

Заключение

Модулярная арифметика является краеугольным камнем современных криптографических технологий и оптимизации вычислений. Понимание её применений и методов позволяет разрабатывать более безопасные и производительные информационные системы, что особенно важно в условиях растущих киберугроз и увеличения объёмов обрабатываемых данных.

Список литературы

1. Герасимов, А. А. Сравнительный анализ реализации протоколов Диффи-Хеллмана и Эль-Гамала в эллиптической криптографии // Проблемы современного мира глазами молодежи : сборник научных трудов. – Москва : Российский университет дружбы народов, 2015. – С. 13-23.
2. Емельянова Е.Л., Усольцев Л.П. Самарский алгоритм практической реализации методики М.Винера в RSA-криптографии // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды Международной научно-технической конференции, Самара, 14–16 марта 2017 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. – С. 185-189.
3. Андреев Р.Н., Ирхин В.П., Чепелев М.Ю., Плотников А.Е. Анализ применения цифровых демодуляторов в модулярной системе счисления // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы : сборник материалов

Международной научно-практической конференции : в 2 т., Воронеж, 20–21 мая 2020 года. Том 1. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2020. – С. 414-418.

4. Ахмеров А.С., Резяпов И.Н. Сравнительный анализ алгоритмов асимметричного шифрования RSA и ECC // Мавлютовские чтения : материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции: в 7 томах , Уфа, 26–28 октября 2021 года. Том 4. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 326-330.
5. Барсов В. И., Краснобаев В. А., Контылева Е. А. Исследование методов логической обработки информации в модулярной системе счисления // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2012. – №. 1. – С. 120-125.
6. Контылева Е.А. Исследование методов логической обработки информации в модулярной системе счисления для информационной безопасности // Энергетические установки и технологии. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 130-134.
7. Ибрагимов У.М. Эллиптические кривые в криптографии // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: в 3-х томах, Курск, 04–05 июня 2014 года. Том 1. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 232-234.

References

1. Gerasimov, A. A. Comparative analysis of the implementation of the Diffie-Hellman and El Gamal protocols in elliptical cryptography // Problems of the modern world through the eyes of youth : a collection of scientific papers. – Moscow : Peoples' Friendship University of Russia, 2015. – pp. 13-23.
2. Yemelyanova E.L., Usoltsev L.P. Samara algorithm for the practical implementation of the method M.Wiener in RSA Cryptography // Promising Information Technologies (PIT 2017) : proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Samara, March 14-16, 2017. – Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017. – pp. 185-189.
3. Andreev R.N., Irkhin V.P., Chepelev M.Yu., Plotnikov A.E. Analysis of the use of digital demodulators in the modular number system // Equipment and safety of facilities of the penal enforcement system : collection of materials of the International Scientific and Practical Conference : in 2 volumes, Voronezh, May 20-21, 2020. Volume 1. Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2020. – pp. 414-418.
4. Akhmerov A.S., Rezyapov I.N. Comparative analysis of RSA and ECC asymmetric encryption algorithms // Mavlyutov readings : materials of the XV

- All-Russian Youth Scientific Conference: in 7 volumes, Ufa, October 26-28, 2021. Volume 4. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2021. – pp. 326-330.
5. Barsov V. I., Krasnobaev V. A., Kontyleva E. A. investigation of methods of logical processing of information in the modular system of counting //Science and technology of Air Forces of the Armed Forces of Ukraine. – 2012. – №. 1. - pp. 120-125.
 6. Kontyleva E. A. Investigation of methods of logical information processing in a modular number system for information security // Power plants and technologies. – 2024. – Vol. 10, No. 1. – pp. 130-134.
 7. Ibragimov U.M. Elliptic curves in cryptography //Innovations, quality and service in engineering and technology: Collection of scientific papers of the 4th International Scientific and Practical Conference: in 3 volumes, Kursk, June 04-05, 2014. Volume 1. – Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2014. – pp. 232-234.

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

Разработка метода повышения помехоустойчивости и пропускной способности радиоканалов с ограниченными частотными и энергетическими ресурсами на основе применения фазочастотных модулированных сигналов

Е.А. Контылева¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, eakontyleva@sevsu.ru

Статья поступила 29.01.2025 г.; после доработки 24.02.2025 г.

Аннотация

В статье рассматриваются основные характеристики радиоканалов с ограниченными частотными и энергетическими ресурсами и выбор класса сигналов для передачи данных при применении фазочастотных модулированных сигналов с расширенным основанием для построения устройств их синхронизации.

Ключевые слова: модулированные сигналы, информационные системы, ограниченные частотные ресурсы.

Development of a method to increase the noise immunity and bandwidth of radio channels with limited frequency and energy resources based on the use of phase-frequency modulated signals

E.A. Kontyleva¹

¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
eakontyleva@sevsu.ru

Received 29.01.2025 y.; received in final form 24.02.2025 y.

Abstract

The article examines the main characteristics of radio channels with limited frequency and energy resources and the choice of a class of signals for data transmission when using phase-frequency modulated signals with an extended basis for constructing devices for their synchronization.

Keywords: modulated signals, information systems, limited frequency resources

Введение

На современном этапе развития цивилизации полнота, своевременность и достоверность доведения информации от источников до получателей играет ключевую роль в функционировании любых государственных институтов и информационных систем, что нельзя не учитывать при решении задач, связанных с разработкой и созданием перспективных систем управления информационными системами в оборонной промышленности и энергетике.

Необходимо отметить, что при создании высокоэффективных систем управления заслуживает внимания перспектива построения широко разветвленной сети разнородных каналов связи, способной обеспечить максимальную эффективность такой системы в сложной помеховой обстановке [1].

Постановка задачи

Провести оценку основных характеристик радиоканалов с ограниченными частотными и

энергетическими ресурсами и выбор класса сигналов для передачи данных; исследовать частотно-энергетическую эффективность различных методов формирования и передачи фазочастотных модулированных сигналов с расширенным основанием.

Проведенные исследования

Опыт эксплуатации существующих метеорных систем связи, в частности системы "Transtac", обеспечивающей автоматическое определение местонахождения подвижных транспортных средств и дуплексную связь с ними [2], позволил выявить ряд специфических особенностей этого вида радиосвязи (рис. 1).

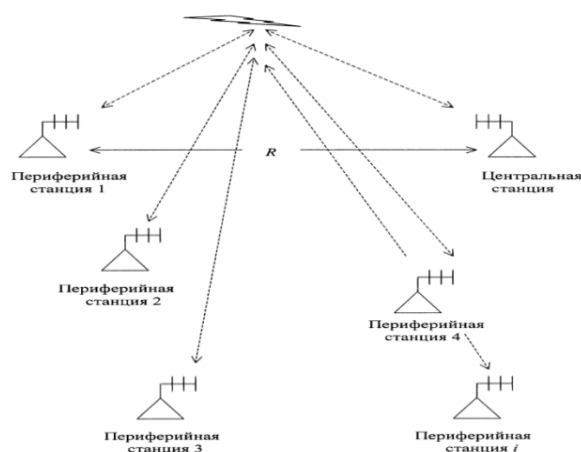


Рис. 1 Специфические особенности радиосвязи

В частности "зеркальный" характер отражения радиоволн от метеорного следа позволяет принимать отраженный сигнал лишь на территории весьма ограниченного участка земной поверхности, что обеспечивает определенную степень скрытности, недоступную для обычных средств радиосвязи и как следствие защищенность от преднамеренных помех [3].

Кроме этого линии метеорной радиосвязи отличаются повышенной устойчивостью к ионосферным возмущениям и искусственным воздействиям, вызывающим резкое возрастание ионизации и поглощения радиоволн. Направленность распространения сигналов в метеорных системах связи значительно уменьшает взаимные помехи между радиоприемниками [4], работающими на близких частотах [5]. Другие достоинства метеорного радиоканала, такие как экономичность, отсутствие "зоны молчания", высокая электромагнитная совместимость также объясняют появление и развитие во многих странах мира но-

вых специализированных метеорных радиотехнических систем. Однако метеорным системам связи присущи и существенные недостатки, непосредственно влияющие на широкое внедрение этого вида связи. Это низкая помехоустойчивость и пропускная способность, вызванные природой существования метеорного радиоканала [6].

Анализ вышеизложенного подтверждает актуальность разработки предложений по повышению помехоустойчивости и пропускной способности прерывистых радиоканалов с ограниченными частотными и энергетическими ресурсами [7], в частности метеорных, при передаче информационных сообщений, сигналов управления и оповещения.

Определенные перспективы в плане решения указанных задач открываются при использовании для передачи данных в метеорном радиоканале фазочастотных модулированных сигналов с расширенным основанием, что определило объект и предмет исследования.

Известно, что рабочий цикл метеорного радиоканала с количественной точки зрения в значительной степени зависит от выбранного порога отношения сигнал/шум на входе приёмного устройства, необходимого для обеспечения заданной достоверности, что в свою очередь накладывает дополнительные требования на энергетическую эффективность применяемого класса сигналов. С точки зрения пропускной способности, кроме энергетического параметра существенное влияние на применимость того или иного класса сигналов оказывает удельная скорость передачи информации.

На рисунке представлены графические зависимости, иллюстрирующие изменения параметра G от требуемого значения вероятности ошибки для различных типов сигналов (рис. 2).

Не трудно заметить, что значение параметра G возрастает почти линейно с уменьшением качества передачи примерно одинаково для всех представленных сигналов, при этом лучшими характеристиками обладают методы двухчастотной, четырёхфазной модуляции и сигналы с модуляцией минимальным сдвигом (ММС).

Результаты сравнительной оценки эффективности различных методов передачи фазочастотных модулированных сигналов с позиции параметров G и $\rho_{\text{треб}}$ для различных значений вероятности ошибки, обеспечивающих определённое значение рабочего цикла позволили сделать вывод о перспективности использования в радиоканале с ограниченными частотными и энер-

гетическими ресурсами [8] фазочастотного модулированного сигнала реализующего принципы многоосновного кодирования высокой кратности, позволяющие разместить 16 и более сигналов в той же полосе частот, которая требуется для некодированной передачи, что хорошо видно на примере сигналов с ММС и МООК (табл. 1).

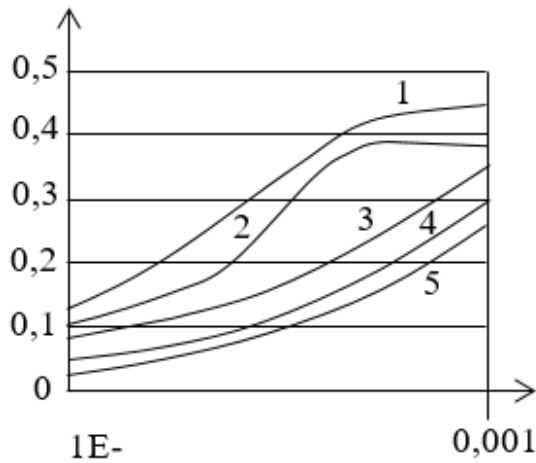


Рис. 2 Зависимость параметра G от требуемого значения вероятности ошибки для различных типов сигналов: 1 – 2f-4, 2 – ММС, 3 – 4f-4, 4 – ФМ-4, 5 – МООК

$$C \approx A \left(\frac{BP_m l_n}{N_0} \right)^{1/2} \left(\frac{\beta_R}{\rho_{\text{треб}}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{треб}}$ – значение отношения сигнал/шум, обеспечивающее требуемое качество передачи данных в МРК;

l_n – количество бит данных содержащихся в одном пакете;

A – коэффициент, учитывающий параметры МРК (значение рабочей частоты, характеристики приёмной и передающей антенны и другие факторы);

P_m – мощность передатчика;

β_R – удельная скорость передачи информации ((бит/сек)/Гц);

N_0 – спектральная мощность шума;

B – полоса частот занимаемая сигналами.

$$G = \sqrt{\frac{\beta_R}{\rho_{\text{треб}}}}. \quad (2)$$

Таблица 1. Сравнительная оценка различных методов передачи ФЧМ сигналов

Метод	η	$\rho_{\text{треб}}$		G	
		$P_{\text{ош}} = 10^{-3}$	$P_{\text{ош}} = 10^{-6}$	$P_{\text{ош}} = 10^{-3}$	$P_{\text{ош}} = 10^{-6}$
ФМ-2	0,62	4,8	11,33	0,36	0,23
ФМ-4	1,23	4,8	11,33	0,51	0,33
ФМ-8	1,85	11	37	0,41	0,22
2f – 2 φ	0,94	4,8	11,33	0,42	0,29
2f – 4 φ	1,15	3,7	8,5	0,56	0,37
2f – 8 φ	1,54	8	28	0,44	0,23
4f – 2 φ	0,96	3,7	8,5	0,51	0,34
4f – 4 φ	0,87	3,125	6,84	0,53	0,36
8f – 2 φ	0,78	3,125	6,84	0,5	0,34
8f – 4 φ	0,58	2,7	5,4	0,46	0,33
16f – 2 φ	0,58	2,7	5,4	0,46	0,33
МООК-3	0,93	3,7	8,5	0,5	0,33
МООК-4	0,62	3,125	6,84	0,45	0
КФМС	1,23	4,8	11,33	0,51	0,33
КФМС-3	0,93	3,7	8,5	0,5	0,33
КФМС-4	0,62	3,125	6,8	0,45	0,3
ММС	1,37	4,8	11,33	0,53	0,35
ММС-3	1,03	3,7	8,5	0,53	0,35
ММС-5	0,43	2,7	5,4	0,4	0,28

Математическое описание и общие принципы формирования фазочастотных модулированных сигналов с расширенным основанием.

Аналитическая модель “элементарного” фазочастотного модулированного сигнала

$$S_i(t) = S_0 \cos(\omega_{p_i} t + \varphi_{q_i} + \varphi_0), \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$;

$t \in (0, T)$;

T – интервал существования сигнала (интервал дискретности);

ω_{p_i} – постоянная на интервале длительности сигнала несущая частота, принимающая при дискретной частотной модуляции 2α значений;

φ_{q_i} – дискретное значение фазы сигнала i -го типа, определяемое на множестве 2β возможных значений;

S_0 и φ_0 – постоянные амплитуда и начальная фаза сигнала.

Общее число различных сигналов N в ансамбле будет равно $N = 2^{\beta+\alpha}$.

Каждый из сигналов будет переносить $k = \log_2 N = \alpha + \beta$ двоичных элементов передаваемого сообщения.

Обобщённая математическая модель фазо-частотного модулированного сигнала с постоянной огибающей

$$S_{\Sigma}(t) = S_0 \sum_{i=1}^n \left\{ g_{li}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_{qi}) + g_{mi}(t - \tau_0) \sin(\omega_0 t + \varphi_{qi}) \right\}, \quad (4)$$

где g_{li} и $g_{mi}(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ - модулирующие функции, отличные от нуля почти всюду на интервале времени $[(i-1)T_c, iT_c]$.

В случае одночастотного сигнала $l_i = m_i = 1$ для всех $i = 1, 2, \dots, n$, $\tau_0 = 0$; $T_c = T$ и

$$g_{li}(t) = g_{mi}(t) = g_1(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{rect} \left[t - (i-1)T_c \right],$$

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq T_c \\ 0, & x(0, x)T_c. \end{cases}$$

Для многочастотных многофазовых сигналов $g_{li}(t)$ и $g_{mi}(t)$ представляют собой косинусоидальные функции, находящиеся в квадратуре

$$g_{li}(t) = \cos \left\{ \frac{\Delta\Omega}{2} (2l_i - 1) [t - (i-1)T_c] \right\},$$

$$g_{mi}(t) = \sin \left\{ \frac{\Delta\Omega}{2} (2L_i - 1) [t - (i-1)T_c] \right\}.$$

Одной из важных оценок эффективности различных видов передачи МОК сигналов с постоянной огибающей является занимаемая этими сигналами полоса частот, что, в свою очередь, связано с расчётом их спектров.

Заключение

В ходе исследования были проанализированы и выбраны классы сигналов для передачи данных в радиоканалах с ограниченными частотными и энергетическими ресурсами. Учёт осо-

бенностей возникновения и существования метеорного радиоканала требует, при выборе методов передачи информации в этом канале в качестве показателей эффективности его функционирования, использовать усреднённые параметры. В частности, при сравнении различных видов сигналов и методов их приёма такими параметрами являются помехоустойчивость и реальная пропускная способность.

Список литературы

1. Тузов Г. И. Статистическая теория приема сложных сигналов : научное издание / Г. И. Тузов. - Москва : Советское радио, 1977. - 397 с.
2. Титков С. Б. Технические предложения по использованию метеорной связи / С. Б. Титков // Защита информации. Инсайд. - 2006. - № 3(9). - С. 74-80.
3. Окунев Ю. Б. Системы связи с инвариантными характеристиками помехоустойчивости. — Москва : Связь, 1973. — 79 с.
4. Журавлев Д. В. Основы современной радиоэлектроники : Учебное пособие / Д. В. Журавлев ; Воронежский государственный технический университет. - Воронеж, 2013. - 236 с.
5. Семенов А.М. Широкополосная радиосвязь. — Москва : Воениздат, 1970. — 278 с.
6. Сердюков В. С. Перспективные методы повышения скорости передачи информации в каналах метеорной связи / В. С. Сердюков, С. П. Белов, А. О. Орехов // Экономика. Информатика. - 2024. - Т. 51, № 1. - С. 241-249.
7. Арсеньев М. В. Оценка параметров модели потока импульсных помех по результатам экспериментальных измерений в каналах управления информационных систем и электротехнических комплексов / М. В. Арсеньев, Д. О. Шелухин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2006. - Т. 2, № 2. - С. 15-18.
8. Кочубей Р. И. Требования к радиоканалам передачи корректирующей информации на основе сигналов с комбинированными видами модуляции / Р. И. Кочубей, М. М. Бычковский, Н. Н. Зайкин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2024. - № 3. - С. 98-101.

References

1. Tuzov G. I. Statistical theory of complex signal reception : a scientific publication / G. I. Tuzov. - Moscow : Soviet Radio, 1977. - 397 p.
2. Titkov S. B. Technical proposals for the use of meteor communications / S. B. Titkov // Information protection. Inside. - 2006. - № 3(9). - Pp. 74-80.
3. Okunev Yu.B. Communication systems with invariant noise immunity characteristics. Moscow : Svyaz

- Publ., 1973. 79 p.
4. Zhuravlev D. V. Fundamentals of modern radio electronics : A textbook / D. V. Zhuravlev ; Voronezh State Technical University. – Voronezh, 2013. – 236 p.
 5. Semenov A.M. Broadband radio communications. Moscow : Voenizdat Publ., 1970. 278 p.
 6. Serdyukov V. S. Promising methods of increasing the speed of information transmission in meteor communication channels / V. S. Serdyukov, S. P. Belov, A. O. Orekhov // Economy. Informatics. - 2024. – Vol. 51, No. 1. – pp. 241-249.
 7. Arsenyev M. V. Evaluation of the parameters of the pulse interference flow model based on the results of experimental measurements in the control channels of information systems and electrotechnical complexes / M. V. Arsenyev, D. O. Shelukhin // Electrotechnical and information complexes and systems. - 2006. – Vol. 2, No. 2. – pp. 15-18.
 8. Kochubey R. I. Requirements for radio channels for transmitting corrective information based on signals with combined types of modulation / R. I. Kochubey, M. M. Bychkovsky, N. N. Zaikin [et al.] // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. - 2024. – No. 3. – pp. 98-101.

УДК 004.422.81

Вопрос актуальности проблемы целенаправленных кибератак на критическую информационную инфраструктуру

Е.Г. Сафонова¹, А.О. Егорова², С.А. Маврин²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, Liza.safonova.2002@mail.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 04.02.2025 г.; после доработки 06.02.2025 г.

Аннотация

В статье проводится анализ существующих киберугроз на актуальность целенаправленных кибератак на объекты критической информационной инфраструктуры. Приводятся статистические данные, позволяющие сделать вывод об актуальности тех или иных компьютерных инцидентов в отношении критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Выявлены ключевые проблемы в борьбе с киберугрозами, а также приведены меры и рекомендации, направленные на обеспечение защиты критической информационной инфраструктуры от кибератак.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, кибератаки, киберугрозы, информационная безопасность.

The issue of relevance of the problem of targeted cyberattacks on critical information infrastructure

E.G. Safonova¹, A.O. Egorova², S.A. Mavrin²¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia, Liza.safonova.2002@mail.ru²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia

Received 04.02.2025 y.; received in final form 06.02.2025 y.

Abstract

The article analyzes existing cyber threats for the relevance of targeted cyber attacks on critical information infrastructure facilities. Statistical data are provided that allow us to draw a conclusion about the relevance of certain computer incidents in relation to the critical information infrastructure of the Russian Federation. Key issues in the fight against cyber threats have been identified, as well as measures and recommendations aimed at protecting critical information infrastructure from cyber attacks.

Keywords: critical information infrastructure, cyberattacks, cyber threats, information security.

Введение

В последнее время объекты критической информационной инфраструктуры (КИИ) подвержены постоянным кибератакам, ведь это особо значимый ресурс в киберпространстве, с

помощью которого в нынешних реалиях государства борются за лидерство в мире.

Под критической информационной инфраструктурой понимаются информационные системы, телекоммуникационные сети и автоматизированные системы управления, функ-

ционирующие в сферах, определенных Федеральным законом от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ [1]. Вывод из строя даже одного из этих элементов нарушит работоспособность всей системы, что приведет к остановке или полному прекращению работы жизненно необходимой инфраструктуры. Не случайно одним из приоритетных направлений развития в Российской Федерации, согласно Доктрине информационной безопасности, является «повышение защищенности критической информационной инфраструктуры и устойчивости ее функционирования» [2].

На данный момент нет целостного согласованного определения понятию «кибератака», в связи с чем, существует множество различных трактовок по всему миру, что затрудняет выработку единых мер и рекомендаций по противодействию кибератакам [3]. В Соединенных Штатах Америки, согласно Инструкции CNSS № 4009 Комитета по системам национальной безопасности США, термин «кибератака» определен как «атака через киберпространство, направленная на использование предприятием киберпространства с целью нарушения, выведения из строя, уничтожения или злонамеренного контроля вычислительной среды/инфраструктуры; или нарушения целостности данных или кражи контролируемой информации» [4]. В нормативно-правовых актах Российской Федерации не используется термин «кибератака», вместо него в Федеральном законе № 187-ФЗ отражено понятие «компьютерная атака», подразумевающее «целенаправленное воздействие программных и (или) программно-аппаратных средств на объекты критической информационной инфраструктуры, сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов, в целях нарушения и (или) прекращения их функционирования и (или) создания угрозы безопасности обрабатываемой такими объектами информации» [1].

Следует отметить, что кибератака (компьютерная атака) — это «целенаправленное воздействие», цель которого — нарушение или полное прекращение функционирования компьютерной сети. Как утверждает доктор юридических наук Шинкареца Г.Г., кибератаки чаще всего имеют политические мотивы, тем самым отличаясь от обычных киберпреступлений, совершаемых, как правило, ради получения денежной выгоды [3]. То есть, атаки, главной целью которых является кража персональных данных, интеллектуальной собственности или просто интернет-мошенничество, будут отнесены в категорию киберпреступлений. В

то время как любые агрессивные действия в киберпространстве, затрагивающие национальную безопасность, от лица государства или совершенные негосударственным субъектом, будут расценены как кибератака.

Целенаправленные кибератаки, их еще называют «таргетированными» [5], представляют собой большую угрозу безопасности для общества и государства, нежели обычные киберпреступления. Подтверждением этого служат показатели ущерба мировой экономике, которые по оценкам Всемирного экономического форума составили 180 триллионов рублей в 2021 году и 600 триллионов рублей в 2022 году [6]. Ущерб от кибератак для России в 2023 году составил более 156 миллиардов рублей [7]. Киберпреступники, совершающие целенаправленные атаки, высоко мотивированны, тщательно продумывают сценарии атак, имеют четко выстроенную структуру и цели, обладают высоким уровнем подготовки и техническими возможностями для реализации кибератак, что делает их особо опасными. Таких киберпреступников называют «хактивисты», они посредством кибератак привлекают внимание общественности к социальным, политическим и другим вопросам [8]. Наиболее известные хактивистские группировки, такие как Anonymous, IT Army of Ukraine, GhostSec, NB65, нарушают работоспособность субъектов КИИ: государственных органов, IT-компаний, предприятий финансового, энергетического и промышленного секторов [9], что наносит крупный репутационный и экономический ущерб как отдельным компаниям, так и стране в целом.

Целью работы является определение значимости проблемы целенаправленных кибератак на КИИ. Для этого необходимо провести анализ статистики по киберугрозам, выявить ключевые проблемы в борьбе с кибератаками и разработать меры и рекомендации, направленные на обеспечение защиты КИИ от кибератак.

Анализ статистических данных по киберугрозам

Первые теории, которые впоследствии легли в основу компьютерных вирусов (разновидность кибератак), были выдвинуты еще в 1949 году Джоном фон Нейманом [10].

Появление Интернета в 1983 году и распространение электронной почты в конце 1990-х создало условия для совершенствования и массового распространения киберугроз. В XXI веке, благодаря повсеместной автоматизации и

цифровизации, кибератаки вышли на новый уровень. В работе [11] Середкин С.П. описывает крупнейшие кибератаки на КИИ в период с 2010 по 2021 год и анализирует статистику за 2022 год, которая демонстрирует рост количества кибератак в 15 раз по сравнению с предыдущим годом.

Согласно статистике от Positive technologies за 2023 год, доля целевых атак возросла и составила 78% от общего количества. Последствиями успешных кибератак стали утечки конфиденциальной информации (67%), в основном персональных данных и коммерческой тайны, и нарушение основной деятельности (44%) [12]. Источник [13] сообщает о том, что в результате одной кибератаки в начале 2024 года были скомпрометированы 500 миллионов записей о россиянах, что превышает

показатель всего прошлого года (300 миллионов записей). А общее количество киберпреступлений в 2024 году, согласно спрогнозированным данным, практически в 3 раза превышает показатель предыдущего года и оценивается в 14542 угрозы [14].

Хактивисты используют данные, полученные в результате утечки, для совершения «точечных» атак на государственные и медицинские учреждения, финансовые организации, IT-компании, предприятия, занимающиеся торговлей, промышленностью и наукой (см. рис. 1). По данным Национального координационного центра по компьютерным инцидентам за 2023 год количество кибератак на объекты КИИ увеличилось на 16% в сравнении с годом ранее и составило 65 тыс. [15].

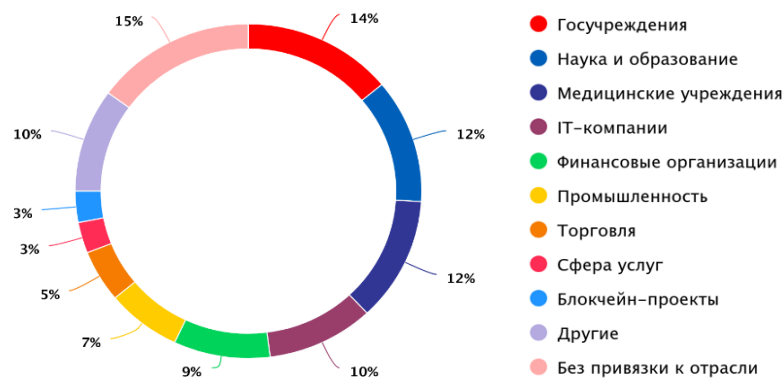


Рис. 1. Категории жертв по отраслям.

Учитывая высокую степень зависимости общества и государства от КИИ, хактивисты нацелены на вывод из строя именно этой инфраструктуры, так как успешная атака повлечет наиболее серьезные последствия [16]. Так, например, сбой в работе финансовых учреждений, транспортных сетей и энергетических систем могут привести к значительным финансовым потерям, нарушению производственных процессов, а также к нарушению жизнеобеспечения населения и ухудшению качества жизни. Помимо этого, особую опасность представляют кибератаки на военные объекты и системы управления обороной, так как в этом случае под угрозой находится национальная безопасность. Далее рассмотрим основные проблемы в борьбе с киберугрозами.

Ключевые проблемы в борьбе с киберугрозами

- 1) Совершенствование киберугроз и увеличение их количества
Как было сказано ранее, кибератаки еже-

годно видоизменяются и совершенствуются, становятся более продуманными, что затрудняет обеспечение стабильной и непрерывной работы необходимой для жизнедеятельности инфраструктуры.

Стоит обратить внимание, что в современных условиях на повышение сложности кибератак особое влияние оказывает развитие искусственного интеллекта (ИИ), технологии и инструменты ИИ в разы упрощают хактивистам задачи по поиску новых уязвимостей и проведению атак. ИИ помогает киберпреступникам создавать убедительный контент, который впоследствии, распространяясь через фишинговые рассылки, с помощью методов социальной инженерии, используется для обмана и кражи данных.

- 2) Использование зарубежного оборудования и программного обеспечения (ПО)

Иностранные компании, в связи с обострением конфликта между Россией и Украиной, прекратили оказание технической поддержки для своих продуктов и поставку ПО и средств за-

щиты информации (СЗИ) на территорию Российской Федерации. Среди них: Microsoft, HP, Dell, Cisco, SAP, Poly, Avaya, Oracle, IBM, TSMC, Nokia и Ericsson, Samsung, Apple [16]. Это стало серьезной проблемой не только для субъектов КИИ, но и для всех отраслей деятельности в России, функционирование которых существенно затруднялось в таких условиях [17]. В особенности уход зарубежного оборудования и программных продуктов отразился на промышленности, где очень важна исправность используемых контроллеров, датчиков и прочих систем «нижнего уровня», а также ПО, которое ими управляет. Аналитики российской ассоциации электронных коммуникаций утверждают, что «нехватка оборудования и комплектующих становится одним из основных факторов, которые будут оказывать негативное влияние на рост IT-отрасли наравне с экономическим общим спадом и санкционным давлением» [16].

В связи с необходимостью обеспечивать непрерывную работу всех бизнес-процессов жизненно важной инфраструктуры, российским руководством было выдвинуто обязательство для владельцев КИИ до 2025 года перейти на отечественное ПО [18]. Также, не менее важные задачи для обеспечения безопасности общества и государства от киберугроз определены Правительством в утвержденной 20 мая 2023 года Концепции [19], цель которой — достижение Российской Федерацией к 2030 году технологического суверенитета, включая создание собственной научной, кадровой и технологической базы критических и сквозных технологий, а также увеличение доли высокотехнологичной отечественной продукции до 75%.

Однако, процесс импортозамещения затруднен тем, что при переходе от зарубежных продуктов к отечественным нередко возникают проблемы с интеграцией и обеспечением совместимости новых решений с уже существующей инфраструктурой. Подтверждением вышесказанного могут послужить результаты исследования ведущей компании в области кибербезопасности «РТК-Солар», которые показали, что в 45% случаев проблемы внедрения российских средств защиты возникают именно из-за их несовместимости с последними версиями отечественных операционных систем и платформами виртуализации [20].

3) Нехватка специалистов в области кибербезопасности

IT-сфера на данный момент испытывает серьезный дефицит квалифицированных кадров,

особенно в области информационной и кибербезопасности. Заместитель председателя правления Сбербанка Кузнецов С.К., в рамках Восточного экономического форума, который проходил 10-13 сентября 2023 года, заявил: «Оцениваю дефицит кадров по специальностям в области кибербезопасности минимум в 50 тыс. человек.» [21]. Такой дефицит специалистов обусловлен комплексом факторов:

- сложность и специфика профессии: работа в области кибербезопасности требует глубоких знаний в различных областях, включая сетевые технологии, программирование, криптографию и правовые аспекты;
- несоответствие образовательных программ: из-за стремительного развития технологий и появления новых угроз, существующие образовательные программы зачастую не адаптированы под решение современных проблем в области кибербезопасности;
- недостаток финансирования: недостаточное финансирование образовательных программ и исследовательских работ в области кибербезопасности тормозит развитие отрасли.

Меры и рекомендации, направленные на обеспечение защиты КИИ от кибератак

1) Применение ИИ для защиты от кибератак

Машинное обучение и искусственный интеллект способны быстро и точно анализировать большой объем данных, например, их можно использовать для решения множества типовых задач, обнаружения аномалий в поведении пользователей, анализа сетевого трафика и предсказания потенциальных атак, это способствует оптимизации процессов защиты и упростит работу специалистов по информационной безопасности.

Кроме того, перспективным направлением в области кибербезопасности выглядит разработка специализированного ПО на основе ИИ, которое сможет отличать сгенерированный контент (от англ. content — «содержание, содержимое») от созданного человеком. Такое решение позволило бы уменьшить количество жертв, ведущихся на фишинговые рассылки, сгенерированные с помощью того же ChatGPT.

2) Финансирование предприятий, относящихся к субъектам КИИ, для обеспечения кибербезопасности

Организации активно выделяют средства на новые разработки в области информационной безопасности и информационных технологий,

инвесторы вкладывают деньги в IT-стартапы, но все же, хочется отметить, что ключевую роль в данном вопросе играет государство, так как оно является основным источником финансирования.

Однако, бюджет распределяется неравномерно между различными секторами экономики, что впоследствии приводит к тому, что некоторые организации, относящиеся к КИИ, остаются без должного уровня защиты.

Множество предприятий, работающих в промышленной отрасли, вынуждено осуществлять свою деятельность на устаревшем оборудовании и программном обеспечении, что делает их уязвимым звеном для киберпреступников. Для решения данной проблемы государство со своей стороны может:

- предоставлять гранты или субсидии на разработку и внедрение систем защиты от кибератак, которые будут включать в себя финансирование покупки программного обеспечения, аппаратных средств, обучение персонала и проведение аудита безопасности;
 - предоставлять налоговые льготы субъектам КИИ, вкладывающим средства в кибербезопасность, что способствует увеличению частных инвестиций в защиту;
 - закупать программное обеспечение и услуги по кибербезопасности у отечественных производителей, стимулируя их развитие;
 - создавать государственные программы страхования киберрисков для субъектов КИИ, снижая финансовые риски от кибератак.
- 3) Разработка и внедрение современных образовательных программ

Необходимо модифицировать существующие образовательные программы, сделать упор на практическое применение знаний и умений, чтобы студенты получали необходимые навыки для решения реальных задач, которые в дальнейшем смогут использовать после обучения.

Кроме того, программы должны постоянно обновляться и дополняться с учетом появления новых уязвимостей и угроз.

К тому же, образовательные учреждения должны тесно взаимодействовать с предприятиями и организациями, работающими в отрасли кибербезопасности: организовывать лекции и семинары для студентов, отправлять обучающихся на практику и стажировки, разрабатывать совместные проекты — все это необходимо для повышения качества образования и как следствие увеличения количества квалифицированных кадров.

Выводы

В сложившейся в мире обстановке, основной целью киберпреступников являются субъекты КИИ, как наиболее уязвимые элементы инфраструктуры, атака на которые позволит нанести максимальный ущерб стране.

Для решения данной проблемы в статье были приведены:

- анализ статистических данных, который показал, что с каждым годом увеличивается количество кибератак и растет наносимый ими ущерб государству;
- основные проблемы в борьбе с киберугрозами: совершенствование кибератак, трудности с импортозамещением и нехватка квалифицированных кадров;
- меры и рекомендации, позволяющие устранить или минимизировать угрозы безопасности КИИ.

Список литературы

1. Федеральный закон от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»: [Электронный ресурс] – ГАРАНТ.РУ. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71730198/> (дата обращения: 08.02.2024).
2. Указ Президента РФ от 5 декабря 2016 г. № 646 «Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации»: [Электронный ресурс] – ГАРАНТ.РУ. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71556224/> (дата обращения: 08.02.2024).
3. Шинкарецкая Галина Георгиевна ПРОБЛЕМА ВЫРАБОТКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИБЕРАТАКИ – Международное право. 2023. №2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-vyrabotki-opredeleniya-kiberataki> (дата обращения: 22.02.2024).
4. National Information Assurance (IA) Glossary: [Электронный ресурс] – dni.gov. – Режим доступа: https://www.dni.gov/files/NCSC/documents/nittf/CNSSI-4009_National_Information_Assurance.pdf (дата обращения: 08.02.2024).
5. Котенко Игорь, Хмыров Семен Сергеевич АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ АТРИБУЦИИ НАРУШИТЕЛЕЙ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ АТАК – Вопросы кибербезопасности. 2022. №4 (50). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-i-metodik-ispolzuyemyh-dlya-atributsii-narushiteley-kiberbezopasnosti-pri-realizatsii-tselevykh-atak> (дата обращения: 24.02.2024).
6. Лавров: потери мировой экономики от кибератак могут составить \$8 трлн в 2022 году:

- [Электронный ресурс] – ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/9567725> (дата обращения: 24.02.2024).
7. Путин поручил совершенствовать борьбу с преступлениями с использованием ИТ: [Электронный ресурс] – ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestiya/20419691> (дата обращения: 24.02.2024).
 8. Хактивизм: [Электронный ресурс] – kaspersky.ru. – Режим доступа: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/hacktivizm/> (дата обращения: 24.02.2024).
 9. Урожай сливов: утечки персональных данных россиян выросли в 40 раз: [Электронный ресурс] – iz.ru. – Режим доступа: <https://iz.ru/1457616/ivan-chernousov/urozhai-slivov-utechki-personalnykh-dannykh-rossiian-vyrosli-v-40-raz> (дата обращения: 24.02.2024).
 10. История киберзащиты: от 40-х годов до наших дней – Avast. – Режим доступа: <https://blog.avast.com/ru/history-of-cybersecurity-avast> (дата обращения: 22.02.2024).
 11. Середкин, С. П. Особенности кибератак на объекты критической информационной инфраструктуры в современных условиях / С. П. Середкин // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2022. – № 4(16). – С. 56-66. – DOI 10.26731/2658-3704.2022.4(16).56-66. – EDN YTMDF.
 12. Отчет компании Positive Technologies: Актуальные киберугрозы: II квартал 2023 года: [Электронный ресурс] – Positive Technologies. – Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q2/> (дата обращения: 11.02.2024).
 13. В результате крупного инцидента в 2024 году в сеть утекли 500 млн записей о россиянах – ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/obschestvo/20065237> (дата обращения: 22.02.2024).
 14. Дыбля Татьяна Владимировна, Тарасов Владислав Олегович, Косников Сергей Николаевич ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ – Прикладные экономические исследования. 2023. №3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-obespecheniya-bezopasnosti-v-usloviyah-tsifrovoy-transformatsii> (дата обращения: 14.03.2024).
 15. Атаки на объекты КИИ не уменьшаются, среди топ-угроз: DDoS, трояны и человеческий фактор: [Электронный ресурс] – Коммерсантъ. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/6679041> (дата обращения: 24.02.2024).
 16. Айти в себя: как ИТ-сектор прожил год после начала «спецоперации» на Украине: [Электронный ресурс] – Forbes. – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/tehnologii/485317-ajti-v-seba-kak-it-sektor-prozil-god-posle-nachala-specooperacii-na-ukraine> (дата обращения: 29.04.2024).
 17. Бизнес умоляет власти разрешить использовать пиратский иностранный софт. Сейчас за него сажают на семь лет: [Электронный ресурс] – cnews.ru. – Режим доступа: https://www.cnews.ru/news/top/2022-12-16_biznes_umolyaet_vlasti_razreshit (дата обращения: 07.05.2024).
 18. Указ Президента РФ от 30 марта 2022 г. № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»: [Электронный ресурс] – ГАРАНТ.РУ. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/403784114/> (дата обращения: 11.05.2024).
 19. Распоряжение Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 г.»: [Электронный ресурс] – ГАРАНТ.РУ. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406831204/> (дата обращения: 13.05.2024).
 20. Исследование «Удовлетворенность российскими технологиями кибербезопасности»: [Электронный ресурс] – SOLAR. – Режим доступа: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/3166/> (дата обращения: 18.05.2024).
 21. Сбер оценил дефицит кадров в области кибербезопасности минимум в 50 тыс. человек: [Электронный ресурс] – ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/18697979> (дата обращения: 23.05.2024).
 22. Автоматизация выбора мер по обеспечению безопасности объекта КИИ соответствующей категории значимости при составлении модели угроз / М. И. Ожиганова, А. О. Егорова, А. О. Миронова, А. А. Головин // Энергетические установки и технологии. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 130-135. – EDN CWQOZN.

References

1. Federal Law of July 26, 2017 No. 187-FZ “On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation”: [Electronic resource] // GARANT.RU. Available at: <https://base.garant.ru/71730198/> (date of access: 02.08.2024).
2. Decree of the President of the Russian Federation of December 5, 2016 No. 646 “On Approval of the Doctrine of Information Security of the Russian Federation”: [Electronic resource] // GARANT.RU. Available at: <https://base.garant.ru/71556224/> (date of access: 02.08.2024).
3. Shinkaretskaya Galina Georgievna THE PROBLEM OF DEVELOPING A DEFINITION OF CYBER-ATTACK // International Law. 2023. No.

2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-vyrabotki-opredeleniya-kiberataki> (date of access: 02.22.2024).
4. National Information Assurance (IA) Glossary: [Electronic resource] // dni.gov. Available at: https://www.dni.gov/files/NCSC/documents/nittf/CNSSI-4009_National_Information_Assurance.pdf (date of access: 02.08.2024).
5. Kotenko Igor, Khmyrov Semyon Sergeevich ANALYSIS OF MODELS AND METHODS USED TO ATTRIBUTE CYBERSECURITY VIOLATORS WHEN CARRYING OUT TARGETED ATTACKS // Cybersecurity Issues. 2022. No. 4 (50). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-modeley-i-metodik-ispolzuemyh-dlya-atributsii-narushiteley-kiberbezopasnosti-pri-realizatsii-tselevykh-atak> (accessed: 02.24.2024).
6. Lavrov: global economic losses from cyber attacks could amount to \$8 trillion in 2022: [Electronic resource] // TASS. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/9567725> (date of access: 24.02.2024).
7. Putin ordered to improve the fight against crimes using IT: [Electronic resource] // TASS. Available at: <https://tass.ru/proisshestiya/20419691> (date of access: 24.02.2024).
8. Hactivism: [Electronic resource] // kaspersky.ru. Available at: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/hactivism/> (date of access: 24.02.2024).
9. Harvest of leaks: leaks of personal data of Russians have increased 40 times: [Electronic resource] // iz.ru. Available at: <https://iz.ru/1457616/ivan-cher-nousov/urozhai-slivov-utehki-personalnykh-dannykh-rossiian-vyrosli-v-40-raz> (date of access: 24.02.2024).
10. History of cyber defense: from the 40s to the present day // Avast. Available at: <https://blog.avast.com/ru/history-of-cybersecurity-avast> (date of access: 22.02.2024).
11. Seredkin, S. P. Features of cyber attacks on critical information infrastructure objects in modern conditions / S. P. Seredkin // Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems. - 2022. - No. 4 (16). - P. 56-66. – DOI 10.26731/2658-3704. 2022. 4 (16). 56-66. – EDN YTMDF.
12. Positive Technologies report: Current cyber threats: Q2 2023: [Electronic resource] // Positive Technologies. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2023-q2/> (accessed: 11.02.2024).
13. As a result of a major incident in 2024, 500 million records about Russians leaked online // TASS. Available at: <https://tass.ru/obschestvo/20065237> (accessed: 22.02.2024).
14. Dyblya Tatyana Vladimirovna, Tarasov Vladislav Olegovich, Kosnikov Sergey Nikolaevich SECURITY TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION // Applied economic research. 2023. No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-obespecheniya-bezopasnosti-v-usloviyah-tsifrovoy-transformatsii> (date of access: 03/14/2024).
15. Attacks on critical information infrastructure facilities are not decreasing, among the top threats are DDoS, Trojans and the human factor: [Electronic resource] // Kommersant. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/6679041> (date of access: 24.02.2024).
16. IT in yourself: how the IT sector lived a year after the start of the “special operation” in Ukraine: [Electronic resource] // Forbes. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/6679041> (date of access: 29.02.2024).
17. Businesses beg the authorities to allow the use of pirated foreign software. Now they imprison for seven years for it: [Electronic resource] // cnews.ru. Available at: https://www.cnews.ru/news/top/2022-12-16_biznes_umolyaet_vlasti_razreshit (date of access: 07.05.2024).
18. Decree of the President of the Russian Federation of March 30, 2022 No. 166 “On measures to ensure technological independence and security of the critical information infrastructure of the Russian Federation”: [Electronic resource] // GARANT.RU. Available at: <https://base.garant.ru/403784114/> (date of access: 11.05.2024).
19. Order of the Government of the Russian Federation of May 20, 2023 No. 1315-r “On approval of the Concept of technological development for the period up to 2030”: [Electronic resource] // GARANT.RU. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406831204/> (date of access: 13.05.2024).
20. Study “Satisfaction with Russian Cybersecurity Technologies”: [Electronic resource] // SOLAR. Available at: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/3166/> (date of access: 18.05.2024).
21. Sber estimated the shortage of personnel in the field of cybersecurity at at least 50 thousand people: [Electronic resource] // TASS. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/18697979> (date of access: 23.05.2024).
22. Automation of the selection of measures to ensure the security of a critical information infrastructure facility of the corresponding significance category when compiling a threat model / M. I. Ozhiganova, A. O. Egorova, A. O. Mironova, A. A. Golovin // Power plants and technologies. - 2021. - Vol. 7, No. 2. - P. 130-135. - EDN CWQOZN.

УДК 656.612

Повышение экологической безопасности судна путем модернизации установки по обработке сточных вод

С.Е. Тверская

ФГАОУ ВО «Севастопольского государственного университета», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, svettverskaya@mail.ru

Статья поступила 07.02.2025 г.; после доработки 10.02.2025 г.

Аннотация

С целью повышения экологических показателей судна в статье предложена экспериментальная установка по обработке сточных вод (СВ). В установке использованы современные методы очистки и обеззараживания до параметров, позволяющих повторное использование СВ для технологических целей, что существенно снизит их сброс за борт, а следовательно, даст возможность получить значительный экологический эффект.

Ключевые слова: экологическая безопасность, сточные воды, обработка, фильтрация, озонирование, ультрафиолетовое облучение.

Improving the environmental safety of the vessel by modernizing the sewage waters treatment plant

S.E. Tverskaya²

Sevastopol State University, 33 Universitetskayast, c. Sevastopol,
299053, Russia, svettverskaya@mail.ru

Received 07.02.2025 y.; received in final form 10.02.2025 y.

Abstract

In order to improve the environmental performance of the vessel, the article proposes an experimental plant for sewage waters treatment (SW). The unit uses modern methods of purification and disinfection to parameters that allow the reuse of SW for technological purposes, which will significantly reduce their discharge overboard, and therefore make it possible to obtain a significant environmental effect.

Keywords: environmental safety, sewage waters, treatment, filtration, flotation, ozonation, ultraviolet irradiation.

Введение

К одному из вредных веществ («загрязнителю морского бассейна») Международная морская организация относит «сточные воды». Это отражено в главном документе по предотвращению загрязнения морской среды – Конвенции МАРПОЛ 73/78 (Приложение IV) [1,2].

К сточным водам (СВ) Конвенция относит все стоки из фановой системы (туалетов, писсуаров, унитазов); все стоки из медицинских помещений (раковин, ванн, шпигатов); стоки из помещений с животными; прочие стоки, смешанные

с перечисленными выше.

На современных транспортных судах суточное накопление СВ составляет $10 \div 20 \text{ м}^3$, а на пассажирских судах – $100 \div 200 \text{ м}^3$. В связи с этим защита окружающей среды от сточных вод является актуальной задачей обеспечения экологической безопасности судна.

В настоящее время пока Конвенция разрешает сброс с судов сточных вод: необработанных – за пределами 12 миль от ближайшего берега при условии, что они сбрасываются постепенно при скорости судна не менее 4 узлов; измельченных и обеззараженных – на расстоянии

более 3 миль.

В последнем случае судно должно быть оборудовано одобренной (имеющей сертификат) установкой по обработке СВ. Установки, поставляемые на суда после 1 января 2016 года, должны соответствовать требованиям Резолюцией МЕРС 227(64) [3], в частности обеспечивать очистку сточных вод до определенных показателей. Эти показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные стандарты стока СВ

Показатель	Максимально допустимое численное значение
Биохимическая потребность в кислороде (БПК ₅)	25 мг/л
Среднее количество общего содержания взвешенных частиц	35 мг/л
Среднее количество кишечных палочек (коли-индекс)	1000 шт/л
Водородный показатель рН	6÷8,5

В настоящее время требования Конвенции применяются к судам валовой вместимостью 400 и более, а также к судам вместимостью менее 400, имеющих на борту более 15 человек. При этом для пассажирских судов введен особый район (Балтийское море), в котором сброс сточных вод вообще запрещен.

На судах мирового флота наиболее распространены физико-химические и биохимические установки для очистки и обеззараживания сточных вод [4].

Пропускная способность установки по обработке сточных вод, л/сут, определяется по формуле:

$$Q = nq,$$

где n – число людей;

q – суточный расход сточных вод на одного человека, л (принимается по действующим нормам).

Все установки имеют свои преимущества и недостатки. Однако общим недостатком для действующих установок является невозможность применения обработанных сточных вод повторно, например, для технических нужд.

Помимо этого, в данных установках для обеззараживания СВ используются хлорсодержащие препараты. При хлорировании стоков, содержащих большое количество органики, образуются диоксины, отрицательно воздействующие на окружающую среду. Поэтому на выходе

из установок должно обеспечиваться содержание остаточного хлора в стоке – не более 0,5 мг/л.

В связи с этим рекомендуется применять другие методы обеззараживания – озонирование, ультрафиолетовое облучение и пр. [5].

Исходя из вышеизложенного, для уменьшения вредного влияния сточных вод на окружающую среду целью работы является разработка современных методов очистки и обеззараживания СВ до параметров, позволяющих повторное их использование для технологических целей.

Изложение основного материала

Количество сточных вод, образующихся на судне, зависит от водопотребления. Поэтому уменьшить вредное влияние СВ на окружающую среду можно за счет его сокращения или применения оборотных систем, позволяющих не сбрасывать СВ за борт, а использовать их повторно для технических нужд.

В первом случае нужно обеспечить уменьшение расхода воды через водозаборную арматуру за счет дросселирования потока воды при различных давлениях или снижения времени холостого истечения. Однако в настоящее время не разработаны достаточно надежные, удобные в применении и недорогие устройства, позволяющие открывать и закрывать запорную арматуру по сигналу датчика. Применение вакуумной сточно-фановой системы требует больших затрат на модернизацию всей системы, что экономически оправдано только для вновь строящихся судов.

Второй случай более интересен с точки зрения использования его на судах. Оборотные системы могут найти применение в системах технической воды: для смыва унитазов, в качестве питательной воды котлов, в системах охлаждения СЭУ и в газоочистителях. Для возможности применения оборотных систем необходимо очищать и обеззараживать СВ до определенных кондиций.

В статье предлагается модернизация установки по обработки сточных вод типа «Нептуматик» (Швеция), которая будет обрабатывать СВ до такой параметров, позволяющих применять их повторно, а следовательно, даст возможность получить значительный экологический эффект.

Принципиальная схема действующей на современных судах установки «Нептуматик» (Швеция) представлена на рис. 1 [6].

Принцип работы установки следующий. Из сборной цистерны сточные воды поступают на фильтр грубой очистки (решетку) 10, который

отделяет крупные загрязнения, периодически сбрасываемые в шламовый танк 8.

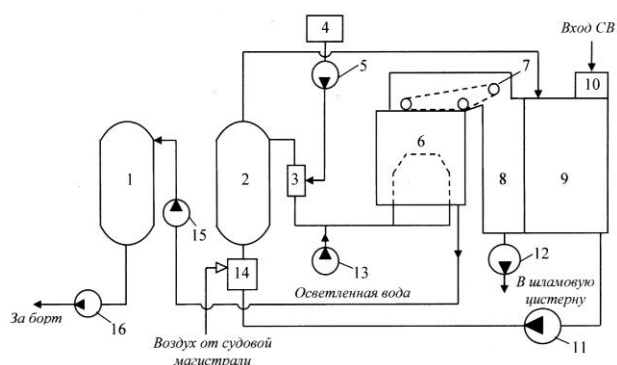


Рис. 1. Принципиальная схема установки по обработке СВ типа «Нептуматик» (Швеция):

- 1 – выпускной танк; 2 – напорный танк;
3 – смеситель; 4 – расходный бак; 5 – насос-дозатор коагулянта; 6 – флотационный танк; 7 – скребковый транспортер; 8 – шламовый танк; 9 – приемный танк; 10 – фильтр грубой очистки; 11 – циркуляционный насос; 12 – шламовый насос; 13 – насос-дозатор хлора; 14 – смеситель; 15 – перекачивающий насос; 16 – откачивающий насос СВ

Предварительно очищенные СВ поступают в приемный танк 9 и далее с помощью циркуляционного насоса 11 подаются в смеситель 14. В смесителе СВ смешиваются с воздухом, который подается из судовой магистрали сжатого воздуха. Далее смесь СВ с воздухом поступает в напорный танк, в котором поддерживается давление $0,18 \div 0,2$ МПа.

Поддержание повышенного давления обусловлено обеспечением необходимого контакта и растворения воздуха в СВ. Часть не растворившегося воздуха в смеси с СВ возвращается в приемный танк. Основное количество СВ, насыщенное воздухом, поступает в смеситель 3, в который одновременно из расходного бака 4 насосом-дозатором 5 подается коагулянт (хлорное железо). Коагулянт необходим для ускорения процесса очистки.

Затем СВ подаются в флотационный танк 6, в котором происходит процесс флотации: при сбросе давления из СВ выделяется воздух, пузырьки воздуха прилипают к частицам загрязнений и ускоренно выносят их на поверхность раздела «вода-воздух» в виде пены (флотошлама). Флотошлам удаляется с поверхности скребковым транспортером 7 в шламовый танк 8. При срабатывании датчика уровня шлам откачивается насосом 12 в шламовую цистерну. Бактерицидный реагент (хлор) подается насосом-дозатором 13 в СВ перед флотационной камерой.

Очищенные и обеззараженные СВс помощью насоса 15 поступают в выпускной танк 1, из которого откачиваются насосом 16 и сбрасываются за борт.

Преимущества данной установки – быстрое введение в действие, автоматизация процессов, высокая производительность, малая зависимость от солености, температуры стоков и содержания химических веществ.

К недостаткам установки относится значительная доля образующегося шлама – до 5-10 % от объема обработанных сточных вод и относительно невысокая степень очистки: по взвешенным веществам – до 80%, по биологическим показателям – до 75%. К настоящему времени сформировалась технологическая схема доочистки СВ, позволяющая использовать их повторно для технологических целей:

- фильтрация на зернистых фильтрах;
- адсорбция (поглощение вредных веществ) с помощью сорбента;
- обеззараживание.

Для обеспечения более высокого качества СВ предлагается ввести дополнительные элементы в установку, которые обеспечат требуемую доочистку и обеззараживание СВ. А именно, выполнить следующие мероприятия.

- 1) Хлорирование заменить озонированием. Обеззараживающее действие озона выше, чем хлора благодаря большому окислительному потенциалу (озон действует быстрее хлора в $15 \div 20$ раз [6]). Обработка сточных вод озоном основана на перемешивании определенного количества озонозооной смеси в объеме СВ. Механизм воздействия озона заключается в разрушении ферментов бактерий, что приводит к нарушению обмена веществ клеток и, следовательно, к их гибели. Для обеззараживания предварительно очищенных СВ доза озона составляет всего $5 \div 7$ г/м³ при времени контакта со стоками около 10 минут [6]. Рекомендуемое соотношение озонозооной смеси и СВ составляет от 1/4 до 1/8. Хорошим смесительным устройством является эжектор. При этом максимальную эффективность озонирования можно получить при озонифлотации, то есть при первичном введении озона перед флотационным танком. Поэтому предлагается озон направить на смешение со сжатым воздухом с помощью газо-воздушного эжектора перед напорным танком.
- 2) Ввести в установку дополнительный напорный песчаный фильтр.
- 3) Вместо контактного устройства применить

- контактный фильтр с гранулированной загрузкой активированным углем (ГАУ).
- 4) В качестве дополнительного дезинфектора использовать бактерицидные ультрафиолетовые лучи (УФЛ) после напорного фильтра. Ультрафиолетовая лампа мощностью 100 Вт обеспечивает дезинфекцию $5 \text{ м}^3 \text{ СВ}$ в сутки [7]. При этом она может автоматически очищаться от образующихся отложений с помощью металлических щеток.
 - 5) Для повторного использования СВ величина их водородного показателя pH должна быть не ниже 6,5. Для обеспечения необходимой кислотности предлагается в установку ввести узел нейтрализации СВ. Наиболее приемлемым с этой точки зрения является способ пропускания СВ через слой мраморной крошки, представляющей по химическому составу известняк, при времени контакта не более 3 минут и скорости потока $(1,2 \div 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

Таким образом, предлагается новая экспериментальная установка, которая позволит качественно очистить и обеззаразить сточные воды и позволит резко сократить сброс СВ за борт вплоть до полного прекращения в связи с возможностью их повторного использования в технических целях.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 2.

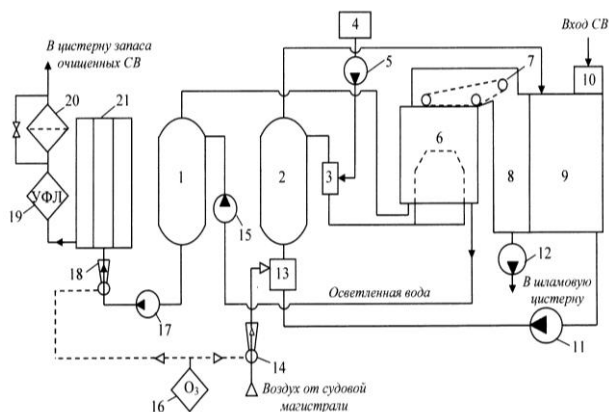


Рис.2. Принципиальная схема модернизированной установки по обработке СВ:

- 1 – напорный фильтр; 2 – напорный танк;
 3 – смеситель; 4 – расходный бак; 5 – насос-дозатор коагулянта; 6 – флоатационный танк; 7 – скребковый транспортер; 8 – шламовый танк; 9 – приемный танк;
 10 – фильтр грубой очистки; 11, 12, 15, 17 – насос;
 13 – смеситель; 14, 18 – эжектор; 16 – озонатор;
 19 – установка бактерицидная; 20 – фильтр известковый; 21 – контактный фильтр с ГАУ

Процесс очистки и обеззараживания СВ в установке состоит из следующих процессов:

- отстаивание СВ в приемном танке;
- насыщение воздухом и озоном СВ перед напорным танком;
- напорная озонифлотация;
- фильтрация на песчаном фильтре;
- вторичное озонирование осветленных СВ;
- адсорбция на ГАУ в контактном фильтре;
- дезинфекция СВ УФ-облучением;
- нейтрализация СВ в известковом фильтре (мраморной крошкой) (случае, если показатель pH превышает 6,5, вода направляется в обход фильтра).

Заключение

С целью повышения экологических показателей судна в статье предложена экспериментальная установка по обработке сточных вод. В установке использованы современные методы очистки и обеззараживания, а именно, хлорирование стоков заменено озонированием, введены дополнительные фильтроэлементы (песчаный фильтр, контактный фильтр с ГАУ и известковый фильтр) и использован дополнительный дезинфектор УФЛ. В результате на выходе установки сточные воды будут обработаны до параметров, позволяющих повторное использование для технологических целей. Это существенно снизит сброс СВ за борт, а следовательно, даст возможность получить значительный экологический эффект.

Список литературы

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 года (МАРПОЛ 73/78). Книги I и II. – СПб.: ЗАО "ЦНИИМФ", 2017 – 760 с.
2. Истомин В.И. Конвенционные требования к безопасности судоходства: учебное пособие / В.И. Истомин, Л.Е. Курочкин, С.Е. Тверская. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 136 с.
3. Резолюция МЕРС.227(64). Руководство 2012 года по осуществлению стандартов стока и проведению рабочих испытаний установок для обработки сточных вод // Бюллетень №15 изменений и дополнений к Конвенции МАРПОЛ 73/78. – СПб. ЗАО «ЦНИИМФ», 2014. – С. 136-159.
4. Леонов В.Е. Защита окружающей среды при эксплуатации судов: монография / В.Е. Леонов, В.И. Дмитриев. – М.: МОСКНИГА, 2017. – 252 с.
5. Курочкин Л.Е. Экологическая безопасность на морских судах: учебное пособие / Л.Е. Курочкин, В.И. Истомин. – М.: Центркаталог, 2020. –

108 с.

6. Истомин В.И. Повышение экологической безопасности судов в соответствии с новыми требованиями Приложения IV Конвенции МАРПОЛ 73/78 / В.И. Истомин, В.П. Кот, С.Е. Тверская // Вестник СевНТУ. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – Вып. 129: Машиностроение и транспорт. – С.86-89.
7. Ермошкин Н.Г. Судовые установки очистки сточных вод: способы и схемы очистки, устройство и эксплуатация: учебное пособие / Н.Г. Ермошкин, В.Н. Калугин, Э.В. Корнилов, И.Н. Кулешов. – Одесса: ФЕНИКС. – 56 с.

References

1. The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended by the Protocol of 1978 (MARPOL 73/78). Books I and II. – SPb.: ZAO TsNIIMF, 2017. – 760 p.
2. Istomin V.I. Conventional requirements for the safety of shipping: textbook / V.I. Istomin, L.E. Kurochkin, S.E. Tverskaya. – M.: University textbook: INFRA-M, 2017. – 136 p.
3. Resolution MEPC.227(64). 2012 Guidelines for the implementation of flow standards and performance testing of sewage water treatment plants // Bulletin No. 15 of amendments and additions to the MARPOL Convention 73/78. – SPb.: ZAO TsNIIMF, 2014. – pp. 136-159.
4. Leonov V.E. Environmental protection during the operation of ships: monograph / V.E. Leonov, V.I. Dmitriev. – M: MORKNIGA, 2017. – 252 p.
5. Kurochkin L.E. Environmental safety on sea vessels: textbook / L.E. Kurochkin, V.I. Istomin. – M.: Tsentrkatalog, 2020. – 108 p.
6. Istomin V.I. Increasing the environmental safety of ship in accordance with the new requirement of Annex IV of the MARPOL 73/78 Convention / V.I. Istomin, V.P. Kot, S.E. Tverskaya // Bulletin of SevNTU. – Sevastopol: SevNTU Publishing House, 2012. – Issue. 129: Mechanical engineering and transport. – pp. 86-89.
7. Ermoshkin N.G. Ship sewage water treatment plants: methods and schemes of treatment, design and operation: textbook / N.G. Ermoshkin, V.N. Kalugin, E.V. Kornilov, I.N. Kuleshov. – Odessa: PHOENIX. – 56 p.

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 628.312

Эффективность сорбции катионов Cu^{2+} и Fe^{3+} , катионитом КУ-2-8, модифицированным фуллереномО.В. Ведищева¹, О.В. Ворник¹, Е.А. Магдыч¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ovvedisheva@mail.sevsu.ru, ovvornik@mail.sevsu.ru, eamacaduch@mail.sevsu.ru

Статья поступила 12.02.2025 г.; после доработки 14.02.2025 г.

Аннотация

Очистка производственных и сточных вод от ионов металлов является одной из ключевых проблем современности, успешное решение которой, позволяет реализовывать политику ресурсо- и энергосбережения. Ионы металлов, присутствующие в воде, делают ее не пригодной как для промышленного, так и для бытового использования. Повышенная концентрация ионов металлов, приводит к коррозии систем трубопроводов и аппаратов на всех производствах. Использование воды, с повышенным содержанием ионов металлов приводит к негативным последствиям для человеческого организма.

Статья посвящена изучению эффективности процесса сорбции ионов меди (II) и железа (III) из растворов катионитом КУ-2-8, модифицированным фуллереном. Представлены экспериментальные данные доказывают эффективность модифицированного сорбента в сравнении с немодифицированным в процессе сорбции ионов металлов из водных растворов как в статических, так и в динамических условиях.

Ключевые слова: примеси, сточные воды, катионит, ионный обмен, сорбция, модифицированный катионит, очистка, ДОО, ПДОО, эффективность сорбции.

Efficiency of sorption of Cu^{2+} and Fe^{3+} cations with KU-2-8 cationite modified with fullereneO.V. Vedishcheva¹, O.V. Vornik¹, E.A. Magdych¹¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia, ovvedisheva@mail.sevsu.ru, ovvornik@mail.sevsu.ru, eamacaduch@mail.sevsu.ru

Received 12.02.2025 y.; received in final form 14.02.2025 y.

Abstract

Purification of industrial and wastewater from metal ions is one of the key problems of today, the successful solution of which allows implementing a policy of resource and energy conservation. The metal ions present in the water make it unsuitable for both industrial and domestic use. The increased concentration of metal ions leads to corrosion of piping systems and apparatuses in all industries. The use of water with a high content of metal ions leads to negative consequences for the human body.

The article is devoted to the study of the efficiency of the sorption of copper (II) and iron (III) ions from solutions with CU-2-8 KA-thionite modified with fullerene. Experimental data are presented to prove the effectiveness of a modified sorbent in comparison with an unmodified one in the process of sorption of metal ions from aqueous solutions under both static and dynamic conditions.

Keywords: impurities, wastewater, cationite, ion exchange, sorption, modified cationite, purification, DOE, sorption efficiency.

Введение

Ограниченность пресных водных ресурсов является одной из глобальных экологических проблем современности. Параллельно физическому и инфраструктурному дефициту, в последнее время растет вклад так называемого химического дефицита водных ресурсов, спровоцированного ежедневным увеличением объемов сточных вод, содержание примесей в которых не позволяет их дальнейшее использование. Особым фактором, влияющим на качество воды, пригодной для питья и технологических процессов является содержание в ней ионов металлов, так как значительная концентрация ионов металлов в воде приводит к коррозионным процессам и как следствие к выходу из строя трубопроводов, технологических аппаратов и прочего производственного оборудования, что в конечном итоге сказывается как на выходе, так и на качестве получаемых продуктов. С другой стороны, ионы металлов обладают высокой биологической активностью, что позволяет им, замещая другие ионы, внедряться в обменные процессы в организме, что приводит к нарушению метаболизма и тяжелым интоксикациям. Все вышесказанное обуславливает особую актуальность поиска новых более эффективных и современных способов очистки производственных и бытовых сточных вод от ионов металлов.

В настоящее время одним из основных методов очистки жидких стоков является сорбция, а поиск и синтез новых эффективных сорбентов можно считать первостепенной задачей водоподготовки.

В настоящем исследовании рассматривается процесс сорбции ионов меди (II) и железа (III) из водных растворов модифицированным катионитом КУ-2-8 и приводится оценка его эффективности.

Основная часть

Целью исследования является определение сорбционных свойств катионита, модифицированного фуллереном в различных режимах сорбции.

Исследование проводилось в несколько этапов:

- 1) исследование эффективности сорбции ионов металлов немодифицированным катионитом КУ-2-8;
- 2) исследование эффективности сорбции ионов металлов модифицированным катионитом КУ-2-8.

2.1 Эксперимент с немодифицированным катионитом КУ-2-8

Исследуемые растворы готовили в соответствии с методикой, приведенной в [1]: «измерения массовой концентрации общего железа с сульфосалициловой кислотой» и «определение массовой концентрации меди с диэтилдитиокарбаматом натрия». В соответствии с [1] было взвешено 5 г катионита, который дальше был помещен в хроматографическую колонку.

Для построения градуировочного графика в мерные колбы было налито 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20 мл рабочего стандартного раствора железоаммонийных квасцов, после этого все колбы были доведены до метки с помощью дистиллированной воды.

Определение оптической плотности проводили на фотометре фотоэлектрическом КФК-3-«ЗОМЗ». Каждая колба измерялась 3 раза, после чего определяли среднее значение оптической плотности. По полученным результатам строили градуировочный график, который приведен на рисунке 1. Результаты определения оптической плотности исследуемых растворов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Данные для построения градуировочного графика раствора железоаммонийных квасцов

C , мг/мл	A			$A_{\text{ср}}$
	1	2	3	
0	0,352	0,353	0,353	0,3526
0,1	0,402	0,4	0,4	0,4006
0,2	0,491	0,491	0,491	0,491
0,5	0,582	0,581	0,581	0,5816
1	0,87	0,869	0,87	0,8696
1,5	1,091	1,09	1,089	1,09
2	1,34	1,338	1,339	1,339

Определение динамической обменной емкости и полной динамической обменной емкости катионита.

Способность ионитов к ионному обмену характеризуется обменной емкостью, т.е. количеством функциональных групп, принимающих участие в обмене, которое выражается в эквивалентных единицах и относится к единице количества ионитов. Обменная емкость может быть определена как в статических, так и в динамических условиях, поэтому существуют понятия статической обменной емкости и динамической обменной емкости.

ДОЕ (динамическая обменная емкость) – обменная емкость ионита, определяемая по появлению данного иона в вытекающем из колонки раствора (по «проскоку») (мг-экв/дм³).

ПДОЕ (полная динамическая обменная емкость) – определяется по полному прекращению

извлечения данного иона из раствора, т.е. в момент выравнивания концентрации поглощаемого иона в растворе и фильтрате при пропускании раствора через колонку с ионитом (мг-экв/дм³).

Сущность динамического метода определения обменной емкости заключается в том, что через уплотненный слой ионита, находящегося в колонке, непрерывно пропускают раствор насыщающего иона до установления сорбционного равновесия между исходным раствором и сорбентом. По мере пропускания раствора через колонку в ней образуется сорбционный слой, т.е. в верхней ее части наступает полное насыщение ионита, затем фронт сорбции передвигается вниз по колонке. Когда фронт достигает конца колонки, наступает «проскок» насыщающего иона в фильтрат.

С момента формирования насыщенного слоя сорбция происходит при режиме параллельного переноса фронта сорбции. Дальнейшее пропускание исходного раствора приводит к тому, что по всей толщине сорбента достигается полной насыщение, т.е. наступает равновесие. С этого времени концентрация фильтрата становится равной концентрации исходного раствора [1].

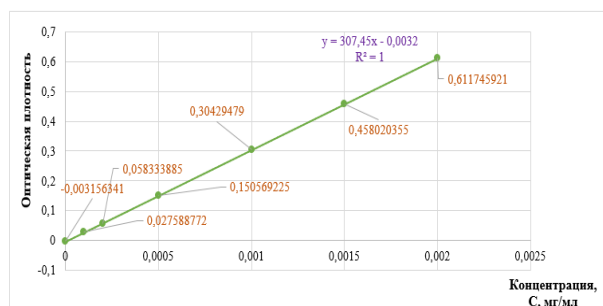


Рис. 1. Градуировочный график раствора железоаммонийных квасцов

Расчет ДОЕ, ПДОЕ для раствора железа, пройденного через немодифицированный катионит.

Расчет динамической и полной динамической обменной емкости происходит по формулам [2]:

$$\text{ДОЕ} = \frac{C \cdot V_{\text{проскок}}}{V_{\text{катионирования}}} \quad (1)$$

$$\text{ПДОЕ} = \frac{C \cdot V_{\text{полн}}}{V_{\text{катионита}}} \quad (2)$$

Где: C — концентрация ионов (катионов для катионита, анионов для анионита) в пропускаемом растворе, мг-экв/дм³;

$V_{\text{проскок}}$ — количество воды, пропущенной через фильтр до проскока поглощаемого иона, дм³;

$V_{\text{полный}}$ — количество воды, пропущенной через фильтр до момента выравнивания концентраций, дм³;

$V_{\text{ионита}}$ — объем ионита, дм³.

Объем ионита рассчитывают по формуле:

$$V_{\text{ионита}} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

Где: r — радиус колонки, дм; h — высота слоя ионита, дм.

Для расчета ДОЕ и ПДОЕ на немодифицированном катионите был пропущен раствор железа до появления проскока. Проскок определялся качественными реакциями на ионы железа с желтой кровяной солью ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$), при взаимодействии с которой образуется осадок синего цвета.

После «проскока» пропускание раствора происходило до равновесия концентраций.

Значения оптической плотности раствора железа после «проскока» и рассчитанные концентрации представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты пропущенного раствора железа через не модифицированный катионит

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг/мл
1	25	1	0,549	0,0017
2	25	1	0,668	0,0021
3	25	1	0,755	0,0024
4	25	1	0,824	0,0026
5	25	1	0,967	0,0031
6	25	1	1,043	0,0034
7	25	1	1,123	0,0036
8	25	1	1,229	0,0040
9	25	1	1,441	0,0046
10	25	1	1,599	0,0052
11	25	1	1,733	0,0056

по формулам (1-3) определены:

ДОЕ — 705 мг-экв/дм³;

ПДОЕ — 955 мг-экв/ дм³;

$V_{\text{проскок}}$ - 775 мл = 0,775 дм³

$V_{\text{полный}}$ - 1050 мл = 1,050 дм³

$V_{\text{катионита}}$ - 0,003925 дм³

Далее по описанному выше алгоритму в соответствии с [1] были приготовлены стандартные растворы меди. Полученные данные оптической плотности и градуировочный график приведены в таблице 3 и на рисунке 2 соответственно.

Для расчета ДОЕ и ПДОЕ на немодифицированном катионите был пропущен раствор меди до появления проскока. Качественная реакция на ион меди — реакция с аммиаком, при вза-

имодействии с которым образуется сине-фиолетовая окраска. Отбиралось несколько капель из хроматографической колонки раствора железа в стеклянные бюксы, объемом 8 мл, после чего, через пипетку Пастера добавлялось несколько капель приготовленного раствора аммиака, для определения объема пройденного раствора до «проскока».

После «проскока» пропускание раствора происходило до равновесия концентраций. Каждый объем раствора отбирался в мерный цилиндр, откуда далее брали 1 мл из каждого цилиндра и подготавливали в колбах для определения значений оптической плотности.

Значения оптической плотности раствора железа после «проскока» для равновесия и расчета концентрации представлены в таблице 4. Далее, рассчитывали ДОЕ, ПДОЕ для раствора меди, пройденного через немодифицированный катионит по формулам (1-3).

Таблица 3. Данные для построения градуировочного графика раствора сернокислой меди

С, мг/мл	А			А _{ср}
	1	2	3	
0	0,051	0,051	0,051	0,0511
0,1	0,055	0,055	0,055	0,055
0,2	0,073	0,072	0,073	0,0726
0,5	0,107	0,108	0,108	0,1076
1	0,2	0,201	0,2	0,2003
1,5	0,373	0,374	0,374	0,3736
2	0,495	0,495	0,495	0,495

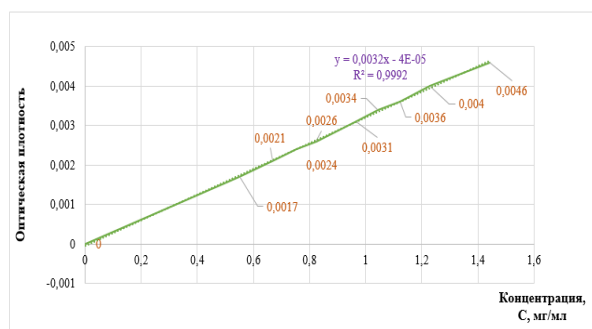


Рис. 2. Градуировочный график раствора сернокислой меди

2.2 Эксперимент с модифицированным катионитом КУ-2-8 в статическом и динамическом режиме

Модификация катионита происходила следующим образом, 5 г взвешенного катионита поместили в раствор фуллерен-15-краун-5-эфир, приготовленный смешиванием навески смеси фуллеренов объемом 5 мл и 25 мл 15-краун-5-эфир раствора [3].

Навеска смеси фуллеренов готовилась в день проведения анализа. Было отобрано 125 мкл фуллерена и помещено в колбу на 25 мл, и доведено до метки дистиллированной водой.

Таблица 4. Результаты пропущенного раствора меди через немодифицированный катионит

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг/мл
1	25	1	0,128	0,0010
2	25	1	0,352	0,0018
3	25	1	0,477	0,0023
4	25	1	0,614	0,0028
5	25	1	0,839	0,0030
6	25	1	1,102	0,0033
7	25	1	1,386	0,0056
8	25	1	1,540	0,0062
9	25	1	1,631	0,0065
10	25	1	1,855	0,0074

Таблица 5. Результаты пропущенного раствора железа через модифицированный катионит в статическом режиме

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг-экв/мл
1	25	1	0,623	0,0020
2	25	1	0,703	0,0022
3	25	1	0,788	0,0025
4	25	1	0,878	0,0028
5	25	1	0,961	0,0031
6	25	1	1,051	0,0034
7	25	1	1,163	0,0037
8	25	1	1,248	0,0040
9	25	1	1,328	0,0043
10	25	1	1,419	0,0046
11	25	1	1,502	0,0048
12	25	1	1,587	0,0050
13	25	1	1,677	0,0054
14	25	1	1,730	0,0055
15	25	1	1,735	0,0056

Катионит, находящийся в растворе фуллерен-15-краун-5-эфир, был помещен в мерные стаканы, один из которых на протяжении суток стоял при комнатной температуре и светом помещения (статический режим), а другой перемещивался на магнитной мешалке 16 часов (динамический режим) [4-6].

Значения оптической плотности раствора железа после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в статическом режиме представлены в таблице 5.

Расчет ДОЕ, ПДОЕ для раствора железа, пройденного через модифицированный катионит в статическом режиме.

$$\text{ДОЕ} - 811 \text{ экв/дм}^3$$

$$\text{ПДОЕ} - 1039 \text{ экв/дм}^3$$

$$V_{\text{проскок}} - 892 \text{ мл} = 0,892 \text{ л}$$

$$V_{\text{полный}} - 1142 \text{ мл} = 1,142 \text{ л}$$

$V_{\text{катионита}} - 0,003925$

Значения оптической плотности раствора железа после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в динамическом режиме представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты пропущенного раствора железа через модифицированный катионит в динамическом режиме

№ пробы	V пробы, мл	V алик-воты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг-экв/мл
1	25	1	0,593	0,0019
2	25	1	0,673	0,0021
3	25	1	0,754	0,0023
4	25	1	0,836	0,0025
5	25	1	0,926	0,0028
6	25	1	1,01	0,0032
7	25	1	1,096	0,0035
8	25	1	1,181	0,0038
9	25	1	1,271	0,0040
10	25	1	1,356	0,0042
11	25	1	1,439	0,0045
12	25	1	1,524	0,0048
13	25	1	1,607	0,0051
14	25	1	1,689	0,0053
15	25	1	1,735	0,0056

Результаты расчета ДОО, ПДОО для раствора железа, пройденного через модифицированный катионит в динамическом режиме.

ДОО - 817 мг-экв/л

ПДОО - 1158 мг-экв/л

$V_{\text{проскок}} - 898 \text{ мл} = 0,898 \text{ л}$

$V_{\text{полный}} - 1273 \text{ мл} = 1,273 \text{ л}$

$V_{\text{катионита}} - 0,003925$

Значения оптической плотности раствора меди после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в статическом режиме представлены в таблице 7.

Результаты расчета ДОО, ПДОО для раствора меди, пройденного через модифицированный катионит в статическом режиме.

ДОО - 815 мг-экв/л

ПДОО - 1014 мг-экв/л

$V_{\text{проскок}} - 1024 \text{ мл}$

$V_{\text{полный}} - 1274 \text{ мл}$

$V_{\text{катионита}} - 0,003925$

Значения оптической плотности раствора меди после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в динамическом режиме представлены в таблице 8.

Результаты расчета ДОО, ПДОО для раствора меди, пройденного через модифицированный катионит в динамическом режиме.

ДОО - 821 мг-экв/л

ПДОО - 1020 мг-экв/л

$V_{\text{проскок}} - 1031 \text{ мл}$

$V_{\text{полный}} - 1281 \text{ мл}$

$V_{\text{катионита}} - 0,003925$

Таблица 7. Результаты пропущенного раствора меди через модифицированный катионит в статическом режиме

№ пробы	V пробы, мл	V алик-воты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг-экв/мл
1	25	1	0,144	0,0010
2	25	1	0,368	0,0019
3	25	1	0,568	0,0026
4	25	1	0,763	0,0033
5	25	1	0,988	0,0042
6	25	1	1,138	0,0047
7	25	1	1,303	0,0053
8	25	1	1,465	0,0059
9	25	1	1,643	0,0066
10	25	1	1,856	0,0074

Таблица 8. Результаты пропущенного раствора меди через модифицированный катионит в динамическом режиме

№ пробы	V пробы, мл	V алик-воты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг-экв/мл
1	25	1	0,146	0,0010
2	25	1	0,395	0,0020
3	25	1	0,560	0,0026
4	25	1	0,787	0,0034
5	25	1	1,002	0,0042
6	25	1	1,130	0,0047
7	25	1	1,470	0,0060
8	25	1	1,675	0,0067
9	25	1	1,756	0,0071
10	25	1	1,856	0,0074

2.3 Эксперимент с модифицированным катионитом КУ-2-8 в статическом и динамическом режиме с ультразвуком

Процесс модификации катионита аналогичен описанному в п. 2.2. После добавления катионита в раствор фуллерен-15-краун-5-эфир и проведения одного катионита в статическом, а другого в динамическом режиме следовала ультразвуковая обработка катионита в течении 10 минут [7].

Значения оптической плотности раствора железа после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в статическом режиме с использованием ультразвуковой обработки представлены в таблице 9.

Результаты расчета ДОО, ПДОО для раствора железа, пройденного через модифицированный катионит в статическом режиме с ультразвуковой обработкой.

ДОО - 842 мг-экв/л

ПДОО - 1183 мг-экв/л

$V_{\text{проскок}} - 926 \text{ мл}$

$V_{\text{полный}} - 1301 \text{ мл}$

$V_{\text{катионита}} - 0,003925$

Значения оптической плотности раствора железа после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в динамическом режиме с использованием ультразвуковой обработки представлены в таблице 10.

Таблица 9. Результаты пропущенного раствора железа через модифицированный катионит в статическом режиме с использованием ультразвуковой обработки

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг-экв/мл
1	25	1	0,560	0,0018
2	25	1	0,645	0,0020
3	25	1	0,723	0,0022
4	25	1	0,800	0,0025
5	25	1	0,888	0,0028
6	25	1	0,972	0,0030
7	25	1	1,057	0,0032
8	25	1	1,144	0,0034
9	25	1	1,228	0,0036
10	25	1	1,318	0,0039
11	25	1	1,393	0,0042
12	25	1	1,481	0,0045
13	25	1	1,576	0,0050
14	25	1	1,654	0,0053
15	25	1	1,731	0,0056

Результаты расчета ДОЕ, ПДОЕ для раствора железа, пройденного через модифицированный катионит в динамическом режиме с ультразвуковой обработкой.

ДОЕ - 846 мг-экв/л

ПДОЕ - 1187 мг-экв/л

V_{проскок} - 930 мл

V_{полный} - 1305 мл

V_{катионита} - 0,003925

Значения оптической плотности раствора меди после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в статическом режиме с использованием ультразвуковой обработки представлены в таблице 11.

Результаты расчета ДОЕ, ПДОЕ для раствора меди, пройденного через модифицированный катионит в статическом режиме с ультразвуковой обработкой:

ДОЕ - 856 мг-экв/дм³

ПДОЕ - 1055 экв/дм³

V_{проскок} - 1076 мл

V_{полный} - 1326 мл

V_{катионита} - 0,003925

Значения оптической плотности раствора меди после «проскока» для равновесия и расчета концентрации в динамическом режиме с использованием ультразвуковой обработки представлены в таблице 12.

Результаты расчета ДОЕ, ПДОЕ для раствора меди, пройденного через модифицированный катионит в динамическом режиме с ультразвуковой обработкой.

ДОЕ - 857 экв/дм³

ПДОЕ - 1057 экв/дм³

V_{проскок} - 1077 мл

V_{полный} - 1327 мл

V_{катионита} - 0,3925

Диаграмма значений ДОЕ и ПДОЕ для раствора железа представлена на рисунке 3.

Таблица 10. Результаты пропущенного раствора железа через модифицированный катионит в динамическом режиме с использованием ультразвуковой обработки

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг-экв/мл
1	25	1	0,580	0,0018
2	25	1	0,665	0,0020
3	25	1	0,748	0,0022
4	25	1	0,827	0,0025
5	25	1	0,915	0,0028
6	25	1	0,991	0,0032
7	25	1	1,078	0,0035
8	25	1	1,168	0,0038
9	25	1	1,256	0,0040
10	25	1	1,34	0,0043
11	25	1	1,42	0,0045
12	25	1	1,505	0,0048
13	25	1	1,584	0,0050
14	25	1	1,684	0,0053
15	25	1	1,735	0,0056

Таблица 11. Результаты пропущенного раствора меди через модифицированный катионит в статическом режиме с использованием ультразвуковой обработки

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг/мл
1	25	1	0,153	0,0011
2	25	1	0,414	0,0020
3	25	1	0,588	0,0027
4	25	1	0,826	0,0036
5	25	1	1,052	0,0044
6	25	1	1,186	0,0049
7	25	1	1,543	0,0062
8	25	1	1,758	0,0070
9	25	1	1,813	0,0072
10	25	1	1,856	0,0074

По диаграмме ДОЕ и ПДОЕ для раствора железа можно сделать вывод, что при модификации катионита фуллереном, а также ультразвуковой обработке модифицированного катионита показывают лучшие результаты сорбционных свойств по сравнению с не модифицированным катионитом.

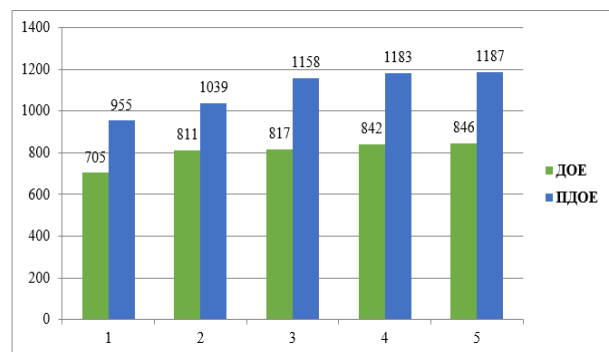


Рис. 3. Диаграмма значений ДОО и ПДОО для раствора железа

- 1 – не модифицированный катионит,
 2 – модифицированный катионит (статика), 3 – модифицированный катионит (динамика),
 4 – модифицированный катионит с ультразвуковой обработкой (статика),
 5 – модифицированный катионит с ультразвуковой обработкой (динамика)

Таблица 12. Результаты пропущенного раствора меди через модифицированный катионит в динамическом режиме с использованием ультразвуковой обработки

№ пробы	V пробы, мл	V аликвоты, мл	Оптическая плотность А	Концентрация в пробе, мг/мл
1	25	1	0,151	0,0010
2	25	1	0,390	0,0019
3	25	1	0,602	0,0027
4	25	1	0,808	0,0035
5	25	1	1,047	0,0044
6	25	1	1,206	0,0050
7	25	1	1,381	0,0056
8	25	1	1,552	0,0063
9	25	1	1,741	0,0070
10	25	1	1,856	0,0074

Разница между статическим и динамическим режимом модификации катионита не большая, из этого можно сделать вывод, что необходимость динамического режима практического интереса не представляет.

Диаграмма значений ДОО и ПДОО для раствора меди представлена на рисунке 4.

По диаграмме ДОО и ПДОО для раствора меди можно сделать вывод, что при модификации катионита фуллереном, а также ультразвуковой обработке модифицированного катионита показывают лучшие результаты сорбционных свойств по сравнению с не модифицированным катионитом.

Разница между статическим и динамическим режимом модификации катионита не большая, из этого можно сделать вывод, что необходимость динамического режима практического интереса не представляет.

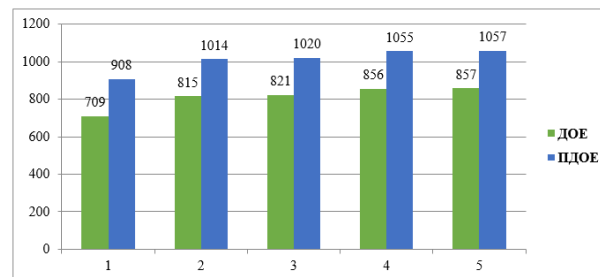


Рис. 4. Диаграмма значений ДОО и ПДОО для раствора меди

- 1 – не модифицированный катионит,
 2 – модифицированный катионит (статика), 3 – модифицированный катионит (динамика),
 4 – модифицированный катионит с ультразвуковой обработкой (статика),
 5 – модифицированный катионит с ультразвуковой обработкой (динамика)

Заключение

В результате проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1) модифицированный катионит показывает лучшие результаты динамической обменной емкости и полной динамической обменной емкости по сравнению с не модифицированным.

2) модифицированный катионит, подвергавшийся ультразвуковой обработке показал чуть более высокие результаты динамической и полной динамической обменной емкости по сравнению с модифицированным катионитом без обработки.

3) статические и динамические режимы модифицированного катионита показали схожие результаты обменных емкостей. Из этого можно сделать вывод, что необходимость динамического режима практического интереса не представляет.

Список литературы

- ГОСТ 4011-72 Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа (с Изменениями N 1, 2).
- Комарова И.В. Универсальный подход к расчету и оптимизации схемы ионообменной водоподготовки // Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12. Вып. 5 С. 683–691
- В.В. Самонин, М.Л. Подвизников, Е.А. Спиридонова В.Г. Исакова, Г.И. Исаков, Очистка воды ионообменными смолами, модифицированными фуллеренами // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», № 11 (103) 2011, С. 78–81
- В.Ф. Селеменев, О.Б. Рудаков, С.Ю. Никитина Влияние температуры на процесс набухания ионитов в воде и этаноле // Пиво и Напитки. 2015

Вып.4, С. 32–35

5. Седов В.М., Подосенова Н.Г., Андожская Ю.С. Параметры сорбции ЛПНП на фуллеренсодержащем силикагеле // Эфферентная терапия. 1998. Т. 4, № 2. С. 33. 2
6. Багровская Н.А., Алексеева О.В. Сорбционные свойства целлюлозы, модифицированной фуллеренами // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2009. Вып. 2 (28). С. 52–59.32
7. Патент РФ №2006122887/15, 27.06.2006 СОРБЕНТ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО УГЛЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ФУЛЛЕРЕН, И СПОСОБ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

References

1. GOST 4011-72 Voda pit`evaya. Me-tody` izmeneniya massovoj koncentracii obshhego zhe-leza (s Izmeneniyami N 1, 2).
2. Komarova I.V. Universal`ny`j pod-xod k raschetu i optimizacii sxemy` ionoobmennoj vodopodgotovki // Sorbcionny`e i xromatografiche-skie processy`. 2012. Т. 12. Vy`p. 5 С. 683–691
3. V.V. Samonin, M.L. Podvyaznikov, E.A. Spiridonova V.G. Isakova, G.I. Isakov, Ochistka vody` ionoobmennymi` smolami, modifitsirovanny`mi fullerunami // Mezhdunarodny`j nauchny`j zhurnal «Al`ternativnaya e`nergetika i e`kologiya», № 11 (103) 2011, S. 78–81
4. V.F. Selemenev, O.B. Rudakov, S.Yu. Nikitina Vliyanie temperatury` na process nabuxa-niya ionitov v vode i e`tanole // Pivo i Napitki. 2015 Vy`p.4, S. 32–35
5. Sedov V.M., Podosenova N.G., An-dozhskaya Yu.S. Parametry` sorbcii LPNP na fulle-ren-soderzhashhem silikagele // E`fferentnaya terapiya. 1998. Т. 4, № 2. С. 33. 2
6. Bagrovskaya N.A., Alekseeva O.V. Sorbcionny`e svoystva cellyulozy`, modifitsirovan-noj fullerunami // Zhidkie kristally` i ix prakti-cheskoe ispol`zovanie. 2009. Vy`p. 2 (28). S. 52–59.32
7. Patent RF №2006122887/15, 27.06.2006 SORBENT NA OSNOVE AKTIVNOGO UGLYa, SODERZhASHhEGO FULLEREN, I SPOSOB EGO POLUChENIYa.

УДК 628.166

Дезинфицирующие хлорсодержащие препараты: анализ активного хлора и расчет экономической эффективности использования

Львов А.В.¹, Черкашина Н.И.²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, fizik71@yandex.ru

Статья поступила 10.02.2025 г. после доработки 12.02.2025 г.

Аннотация

В работе представлены результаты изучения эффективности дезинфекции пресной воды растворами гипохлорита натрия с анолитом и электролизным гипохлоритом. Дана сравнительная характеристика выбранным дезинфицирующим препаратам, вводимых в пресную воду. Выявлена зависимость концентрации остаточного активного хлора в пресной воде после введения различных дезинфектантов, с течением времени. Представлены расчеты по экономически выгодному использованию гипохлорит натрия, полученный на месте применения при помощи электролизной установки и концентрату, который оказался на порядок дешевле.

Ключевые слова: пресная вода, водоподготовка, хлорирование, гипохлорит натрия, остаточный активный хлор

Chlorine-containing disinfectants: analysis of active chlorine and calculation of economic efficiency of use

Lvov A.V., Cherkashina N.I.

Sevastopol state University, 33 Universitetskaya street, Sevastopol, 299053, Russia, cherkashina@sevsu.ru

Received 10.02.2025 y.; received in final form 12.02.2025 y.

Annotation

The paper presents the results of studying the effectiveness of disinfection of fresh water with solutions of sodium hypochlorite with anolyte and electrolytic hypochlorite. A comparative characteristic of the selected disinfectants injected into fresh water is given. The dependence of the concentration of residual active chlorine in fresh water after the introduction of various disinfectants over time has been revealed. Calculations are presented on the cost-effective use of sodium hypochlorite obtained at the site of application using an electrolysis plant and concentrate, which turned out to be an order of magnitude cheaper.

Keywords: fresh water, water treatment, chlorination, sodium hypochlorite, residual active chlorine.

Введение

Целью водоподготовки пресной воды является соответствие ее нормативам СанПиН [1] по обеззараживанию хлорированием. В Российской Федерации дезинфекция является обязательной стадией водоподготовки пресной воды. По сравнению с физическими и другими химическими методами хлорирование является самым дешевым и эффективным методом обеззараживания пресной воды.

Целью данной работы является исследование эффективности обеззараживания пресной

воды растворами гипохлорита натрия.

Предметом исследований является пресная вода г. Севастополя.

Методика исследований

Для исследований были приготовлены растворы гипохлорита натрия, полученные разными способами - гипохлорит натрия прямого безмембранного электролиза, анолит электролизного мембранного метода, гипохлорит натрия, полученный химическим способом. Электролизный

гипохлорит и анолит производят непосредственно электролизом с получением растворов с базовой концентрацией по активному хлору 10-15 г/л. Химический гипохлорит марки А (концентрация активного хлора 170-190 г/л) разбавляют до требуемого содержания активного хлора (10-15 г/л) [2, 5].

В питьевую воду вводилось такое количество хлорсодержащего препарата, чтобы исходное содержание общего активного хлора было 1,5-1,7 г/л. А в соответствии с санитарными нормами содержание остаточного активного свободного хлора должно составлять и поддерживаться 0,3-0,5 мг/л или по связанному активному хлору 0,8-1,2 мг/л. В работе изучено изменение концентрации общего активного хлора в пресной воде с течением времени. Не учитывалась хлорпоглощаемость воды в первые сутки, так как этот показатель зависит от многих факторов и учесть его практически невозможно.

Основная часть

Значение концентраций остаточного активного хлора в пресной воде после введения различных дезинфектантов с течением времени приведены на рисунке 1.

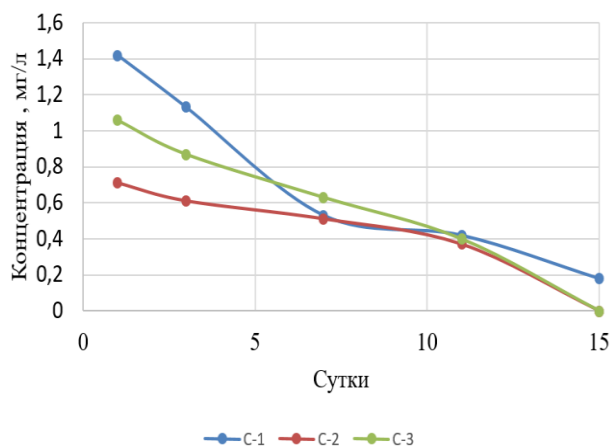


Рис.1 Зависимость концентрации остаточного активного хлора в пресной воде после введения различных дезинфектантов, с течением времени: С1-Химический гипохлорит натрия, С2-Электролизный гипохлорит натрия, С3 –Анолит

Очевидно, что наиболее эффективным средством в обеззараживании воды является электролизный гипохлорит натрия, так как концентрация активного хлора в течении первых 7 суток падает с минимальной скоростью. В то время как у химического гипохлорита и анолита происходит резкое падение концентрации активного

хлора. Химический гипохлорит тоже является эффективным средством в обеззараживании воды, потому что изначально концентрация остаточного активного хлора в пресной воде больше и активный хлор сохраняется более 15 суток.

Эксперименты проведены при температуре 25°C и давлении 101 324,716 Па (в расчетах не учитывалось влияние pH исходного раствора, которое находилось в диапазоне 7,5-9). Также были определены скорости падения концентрации активного хлора в пресной воде, результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 Скорость падения концентрации активного хлора для различных дезинфицирующих препаратов

Дезинфицирующий препарат, вводимый в пресную воду	Скорость падения концентрации активного хлора, ΔC , г/л*сутки
Химический гипохлорит натрия	0,083
Электролизный гипохлорит натрия	0,047
Анолит	0,71

По данным таблицы можно сказать, что наиболее эффективным препаратом для дезинфекции воды является электролизный гипохлорит натрия, так как скорость падения концентрации активного хлора у него меньше, чем у других дезинфектантов.

Пресную воду запрещается обрабатывать, например, хлорорганическими препаратами, то для обеззараживания пресной воды наиболее эффективным и разрешенным средством является гипохлориты натрия разного способа приготовления. На скорость падения содержания остаточного активного хлора также оказывает некоторое влияние pH базового раствора дезинфектанта, а также pH самой пресной воды.

Для оценки эффективности необходимо провести экономический расчет с учетом применения химического гипохлорита натрия и гипохлорита полученного электролизной установкой. Для этого необходимо рассчитать общую стоимость концентрированного ГПХН в зависимости от объема его использования, с учетом гарантийного техобслуживания электролизной установки.

Расчетные условия: обработка воды объемом 1000 куб.м в сутки; норма ГПХН 2000 г/сутки из расчета исходной концентрации 1,5-2,0 г/л общего активного хлора.

Химический ГПХН (концентрат)

Имеющий в продаже в Севастополе концентрированный гипохлорит натрия имеет концентрацию 140 г/л, поставляется в канистрах по 23 кг (20 л.), стоимость – 1500руб. Таким образом, объем ГПХН, необходимый для хлорирования по норме по формуле 1.1:

$$V = \frac{2000}{140} = 14,5 \text{ л/сутки} \quad (1.1)$$

Учитывая естественный распад ГПХН с потерей активного хлора, требуется применить коэффициент 1,5:

$$V = 14,5 \times 1,5 = 21,8 \frac{\text{л}}{\text{сутки}} \quad (1.2)$$

Т.е. при обычном хлорировании требуется одна канистра в день на объем 1000 м³/сут. В месяц потребуется 30 канистр, общая стоимость концентрированного ГПХН составит

$$1500 \text{ руб} \times 30 \text{ дней} = 45000 \text{ руб}$$

Гипохлорит натрия, полученный на месте применения при помощи электролизной установки

ГПХН имеет концентрацию 8 г/л, таким образом, для установления начальных условий необходимо:

$$V = \frac{2000}{80} = 250 \text{ л/сутки}$$

Для производства такого количества гипохлорита потребуется 20 кг соли в сутки, при цене 15 руб/кг ее стоимость составит

$$20 \times 15 = 300 \text{ руб/сутки}$$

Электроэнергия:

$$3,5 \text{ А} \times 12 \text{ В} \times 18 \text{ электролизеров} \times 10 \text{ час} \times 1,25 = 9450 \text{ ВА} = 9,5 \text{ кВт/сутки}$$

При стоимости киловатт-часа, равной 6 руб, получим: $9,5 \times 6 = 57 \text{ руб/сутки}$

Вода: 250л в сутки, при стоимости кубометра воды со стоками - 60 руб получим:

$$0,250 \times 60 = 15 \frac{\text{руб}}{\text{сутки}}$$

Таким образом, для получения необходимого количества гипохлорита в сутки требуется

$$300 + 57 + 15 = 372 \text{ руб}$$

$$\text{В месяц } 372 \times 30 = 11160 \text{ руб}$$

Добавим гарантийное техобслуживание электролизной установки

$$11160 + 10000 = 21160 \frac{\text{руб}}{\text{мес}}$$

Очевидно, что при использовании гипохлорита, полученного на электролизной установке, ежемесячная выгода составляет 23840 рубля. В год – 286080 рублей.

Следует также указать, что получаемый при помощи электролизной установки гипохлорит может безопасно применяться при обработке душевых, туалетов и других помещений.

Заключение

При сравнительном анализе препаратов хлорирования можно сказать, что наиболее рациональным как в экологическом, так и технологическом аспектах является использование электролизного гипохлорита натрия, который менее дефицитен, дешевле по сравнению с другими препаратами, содержащими активный хлор, менее токсичен.

Список литературы

1. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». 2021. 988 с.
2. ГОСТ 2874 – 82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. 1995. 6 с.
3. Аракчеев Е.Н. Современная перспективная технология обеззараживания воды и стоков/Аракчеев Е.Н., Брунман В.Е., Брунман М.В., Волков А.Н., Дьяченко В.А. и др// Гигиена и санитария. М.обл, Мьт.:94(4) – 2015.-25-32с.
4. Маслов Р.В. Перспективные методы обеззараживания питьевых и сточных вод/ маслов Р.В., Гринь В.Г.// В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам 76-й научно – практической конференции студентов по итогам НИР за 2020 год. Краснодар.: - 2021. – С.324-327.
5. ГОСТ 18190 – 72 Вода питьевая. Методы определения содержания остаточного активного хлора. 2009. 7 с.

References

1. Sanitary norms and rules of PiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the

- safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans". 2021. 988 p.
2. State standard 2874 – 82 Drinking water. Hygienic requirements and quality control. 1995. 6 p.
 3. Arakcheev E.N. Modern promising technology of disinfection of water and wastewater/Arakcheev E.N., Brunman V.E., Brunman M.V., Volkov A.N., Dyachenko V.A. and others// Hygiene and sanitation. Moscow region, Myt.:94(4) – 2015.-25- 32c.
 4. Maslov R.V. Promising methods of disinfection of drinking and wastewater/ maslov R.V., Grin V.G.// In the collection: Scientific support of the agro-industrial complex. Collection of articles based on the materials of the 76th scientific and practical conference of students on the results of research in 2020. Krasnodar.: - 2021. – pp.324-327.
 5. State standard 18190 – 72 Drinking water. Methods for determining the content of residual active chlorine. 2009. 7 p.

УДК 621.778.074

Анализ способов разделения элементов бинарных труб

Л.Н. Пичугова¹, Н.К. Корнеева², А.Н. Вишняков³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kebpf2015@mail.ru, ²korneeva_nk@mail.ru, ³2012vian04@gmail.com3

Статья поступила 04.02.2025 г.; после доработки 06.02.2025 г.

Аннотация

В статье проанализированы различные способы разделения элементов бинарных труб. Авторы тезисно описали процессы, происходящие при воздействии на трубы схемы силового нагружения. Предложен способ разделения элементов бинарных труб с использованием перепрофилированной оболочки (волоки).

Ключевые слова: элементы бинарных труб, освобождение оболочки от сердечника, обкатка, метод знакопеременного изгиба.

Analysis of methods for separating elements of binary pipes

L.N. Pichugova¹, N.K. Korneeva², A.N. Vishnykov³Sevastopol state University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 2990053, Russia, ¹kebpf2015@mail.ru,
²korneeva_nk@mail.ru, ³2012vian04@gmail.com3

Received 04.02.2025 y.; received in final form 06.02.2025 y.

Annotation

The article analyzes various methods of separating binary pipe elements. The authors briefly describe the processes occurring when pipes are subjected to a power loading scheme. A method for separating elements of binary pipes using a reprofiled shell (drag) is proposed.

Keywords: elements of binary pipes, release of the shell from the core, rolling, method of alternating bending.

Введение

В связи с возрастанием значения утилизации ценных отходов, наблюдающимся в современной технико-экономической реальности, проблемы разделения металлов из сочлененных композиций приобретают особую актуальность. Немалая доля изделий, подлежащих утилизации, содержит составляющие, разнородные по материалу, причем эти составляющие соединены друг с другом с натягом. Примером указанных конструкций являются теплообменные элементы кожухотрубчатых теплообменников, выполненных в виде труб, включающих оболочку, посаженную с натягом на сердечник. В случае трубчатых сердечников такие трубы называют бислойными [1].

По аналогии со сказанным, уместно составным трубам, включающим сердечник нетрубчатого сечения, например, звездообразного [2], присвоить термин – «бинарные трубы». Упомянутые бинарные трубы утилизируют при монтаже, либо ремонте теплообменного оборудования (в том числе на АЭС), где возникает проблема разделения оболочки и сердечника, так как совместная композиция неприемлема для переплава.

Целью данной статьи является анализ существующих способов разделения элементов бинарных труб, а также авторами предложен способ разделения с использованием перепрофилирования оболочки.

Постановка задачи

Рассмотрим возможные решения поставленной технической задачи.

В бинарных трубах под воздействием остаточных тангенциальных напряжений сжатия, наведенных в оболочке при изготовлении, возникают радиальные деформации, приводящие к значительным радиальным напряжениям на границе «оболочка-сердечник». Сдвиг компонентов, как в продольном, так и в тангенциальном направлении, исключен вследствие сопротивления трению. Поэтому вытягивание сердечника из бинарной трубы не представляется возможным без предварительного создания зазора между оболочкой и сердечником. Последнее требует изменение размеров обоих элементов в месте сочленения сердечника и охватывающей оболочки, что может быть осуществлено либо после увеличения диаметра оболочки, например, за счет ее «распираания» от действия остаточных тангенциальных напряжений после разрезки по образующей вдоль трубы [3], а также за счет раздачи оболочки пластической деформации, либо после уменьшения диаметра сердечника при обеспечении оболочкой по внутреннему диаметру размера большего, чем у сердечника.

Результаты исследования

Рассмотрим принципиально возможные способы.

Механическая разрезка труб ведет к появлению значительных отходов и, кроме того, затруднена в связи с практической непрямолинейностью трубы. Поэтому этот путь целесообразен лишь при экономической оправданности, что определяется конкретными условиями производства, например, крупносерийностью. Разделение компонентов посредством пластической деформации предполагало возможным следующие варианты:

Первый вариант – раздача оболочки внутренним давлением жидкости. Этот вариант пластической деформации не производителен, так как требует гидроизоляции концевых участков при подводе жидкости, что является трудоемким процессом. Оборудование для такого способа отсутствует.

Второй вариант – утонение и вздутие надреберной стенки оболочки без удлинения сердечника. Для реализации данного способа требуется создания сложной специальной оснастки, так как ориентация оболочки относительно инструмента при звездообразном сердечнике представляет большую трудность.

Третий вариант – увеличение диаметра оболочки без утонения ее стенки, этот вариант более производителен и может быть реализован на действующем оборудовании. Данный вариант возможен при деформации, осуществляемой методом знакопеременного изгиба при одновременном кручении [2]. При этом возникают осевые напряжения сжатия вдоль продольной оси трубы, превышающие предел текучести оболочки, что приводит к «распуханию» (раздаче) оболочки. Машины, осуществляющие знакопеременный изгиб с одновременным кручением распространены в трубном производстве, поэтому рассматриваемый вариант доступен и целесообразен для промышленного внедрения.

На рис.1 приведена схема реализации третьего варианта «обкатка с кручением». Вращающиеся валки гиперболоидной поверхностью имеют с обкатываемой трубой достаточно большую площадь соприкосновения. Труба при этом приобретает в каждой паре валков незначительную овальность. Труба получает одновременно упруго-пластические деформации в разных направлениях, труба расширяется в диаметре и выпрямляется по длине [4].

Многочисленные пропуски трубы через валки увеличивают эффект расширения, приводя к появлению зазора между оболочкой и сердечником, достаточного для вытягивания сердечника из оболочки.

Скорость прокатки пропуска через валки не является фактором, сдерживающим процесс с точки зрения производительности, так как достаточно высока (до 1 м/с). Способ апробирован и показал свою результативность. При сжатии трубы косорасположенными гиперболоидными валками деформация сердечника весьма мала. Лишь незначительно изгибаются ребра, так как по причине высокой жесткости сечения бинарной трубы существенная оваллизация ее исключена.

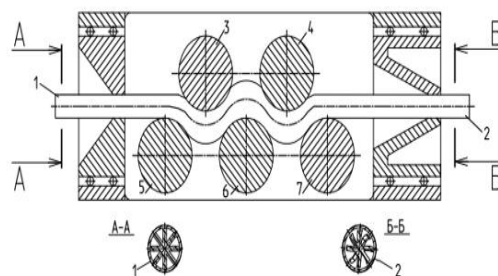


Рис.1 Освобождение оболочки от сердечника обкаткой.

1 – заготовка; 2 – элементы после обкатки; 3÷7 – валки.

Авторами предлагается вариант разделение компонентов бинарной трубы методом протягивания через овальные волокна. Рассмотрим его.

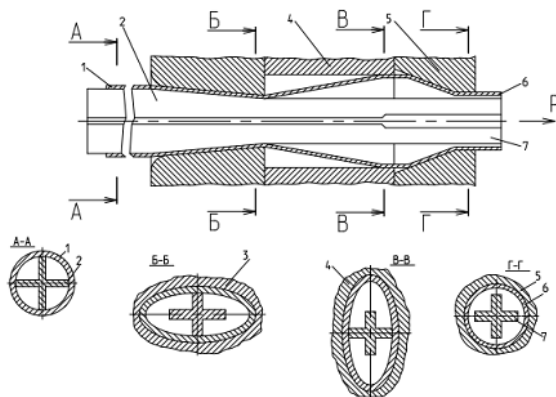


Рис.2 Освобождение оболочки от сердечника протягиванием.

1 – оболочка; 2 – сердечник; 3÷5 – волокна; 6÷7 – деформированные элементы.

Вариант представлен на рис.2. В этом техническом решении, протягивая трубы через набор овальных волок, добиваются последовательной осадки всех ребер. В последней волоке – профилируют овальную оболочку в круглую. Так как при профилировании с малым обжатием периметр оболочки не изменяется, сердечник с уменьшенной высотой ребер оказывается освобожденным от оболочки. Его извлечение методом вытягивания не вызывает затруднений. Осуществление способа возможно на промышленных волочильных станках и не требует дорогой оснастки.

Заключение

В данной работе проанализированы различные варианты освобождения оболочек, охватывающих с натягом сердечники, от этих сердечников, с целью утилизации компонентов бинарных труб. Приемлемыми для осуществления на существующем оборудовании являются варианты: деформация знакопеременным изгибом с кручением (схема «изгиб с перегибом»). Предложен авторский вариант: волочение в блок овальных волок с повернутыми относительно друг друга осями симметрии отверстий, что позволяет добиться последовательной осадки всех ребер и появляется зазор между сердечником и оболочкой. Предложенный способ может быть рекомендован для использования в производственных условиях трубного производства.

Список литературы

1. Колмогоров, В.Л. Остаточные контактные напряжения после редуцирования бислойной трубы / В. Л. Колмогоров, И.А. Соколов. - Москва: Metallurgy, 1968. – 212 с
2. Старостин, Ю. С. Рёбристые трубы из алюминиевых сплавов / Ю. С. Старостин, М. Ф. Головинов, В. Р. Каргин. – Москва : Metallurgy, 1983. – 133 с. : ил. – (Пробл. цв. металлургии) .
3. Авторское свидетельство № 590092 А1 СССР, МПК В23Д 21/00. Способ разделения труб : № 2363926 : заявл. 24.05.1976 : опубл. 30.01.1978 / В. Д. Бараник, В. Н. Назаровский ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я В-2330. – EDN NUTAON.
4. Семенов, Ю. Л. Отделка профилей и труб давлением / Ю.Л. Семенов. - Москва: Metallurgy, 1972. - 232 с.
5. Каргин, Б. В. Специальные виды волочения труб / Б. В. Каргин, В. Р. Каргин. - Самара : Изд-во МИР, 2013. - 174 с. : ил. - Библиогр.: с. 157-167 (100 назв.). - 250 экз. - ISBN 978-5-98972-092-7. - Текст : непосредственный.

References

1. Kolmogorov, V. L. Residual contact stresses after reduction of a bilayer pipe / V. L. Kolmogorov, I. A. Sokolov. - Moscow: Metallurgy, 1968. – 212 p.
2. Starostin, Yu. S. Ribbed pipes made of aluminum alloys / Yu. S. Starostin, M. F. Golovinov, V. R. Kargin. - Moscow: Metallurgy, 1983. - 133 p. : country. – (problem. cv. metallurgy).
3. Author's certificate No. 590092 A1 USSR, MPK B23D 21/00. Pipe separation method: No. 2363926: application 24.05.1976: publ. 30.01.1978 / V. D. Baranik, V. N. Nazarovsky; applicant ENTERPRISE P/A B-2330. – EDN NUTAON
4. Semenenko, Yu. L. Finishing of profiles and pipes by pressure / Yu. L. Semenenko. - Moscow: Metallurgy, 1972. - 232 p.
5. Kargin, B. V. Special types of pipe drawing / B. V. Kargin, V. R. Kargin. - Samara: Publishing house MIR, 2013. - 174 p. : ill. - Bibliography: p. 157-167 (100 titles). - 250 copies. - ISBN 978-5-98972-092-7. - Text: non-direct.

УДК 66.067.9

Изучение возможности применения инкапсулированных сорбентов на основе хитозана

Э.В. Ткаченко, Л.А. Яковишин, С.А. Федорова, С.В. Русяев

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
evtkachenko@mail.sevsu.ru, chemsevtu@rambler.ru, s.a.fedorova@sevsu.ru, S.Rusyaev@list.ru

Статья поступила 03.02.2025 г.; после доработки 05.02.2025 г.

Аннотация

Изучен механизм получения инкапсулированных сорбентов на основе хитозана для извлечения тяжелых металлов. Разработаны оптимальные условия получения инкапсулированных сорбентов на основе хитозана и лаурилсульфата натрия. Определено, что на образование полиэлектролитного комплекса влияет скорость добавления хитозана и время пребывания комплексов в растворе. Методом вольтамперометрии доказана сорбционная способность разработанного полиэлектролитного комплекса. Так степень извлечения ионов свинца из водных растворов составляет в среднем 80-85%.

Ключевые слова: сорбенты, хитозан, инкапсулирование, катионы Pb^{2+}

Studying the possibility of using encapsulated sorbents based on chitosan

E.V. Tkachenko, L.A. Yakovishin, S.A. Fedorova, S.V. Rusyaev

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia
evtkachenko@mail.sevsu.ru, chemsevtu@rambler.ru, s.a.fedorova@sevsu.ru, S.Rusyaev@list.ru

Received 03.02.2025 y.; received in final form 05.02.2025 y.

Abstract

The mechanism of obtaining encapsulated sorbents based on chitosan for the extraction of heavy metals has been studied. Optimal conditions for the production of encapsulated sorbents based on chitosan and sodium lauryl sulfate have been developed. It was determined that the formation of a polyelectrolyte complex is influenced by the rate of chitosan addition and the residence time of the complexes in solution. The sorption capacity of the developed polyelectrolyte complex was proved by voltammetry. Thus, the degree of extraction of lead ions from aqueous solutions is on average 80-85%.

Keywords: sorbents, chitosan, encapsulation, Pb^{2+} cations

Введение

Основными целями при разработке новых видов сорбентов является повышение поглощающих свойств, улучшение и стандартизация их структуры, а также рост технико-экономических показателей сорбционных процессов.

Основным способом улучшения технологического процесса обычно является подбор нового материала, измерение его характеристик в

уже существующей схеме и сравнение с используемым материалом. [1, 2].

Применение конкретного сорбционного материала в желаемом виде и форме часто бывает затруднено физико-химическими показателями среды: сорбент теряет свои свойства при определенных значениях pH, температуре, его невозможно применить при малом или высоком давлении. С целью применения поглощающего ма-

териала с конкретными свойствами при условиях среды, в которых он переходит в растворимое состояние, был разработан метод инкапсулирования веществ.

Цель исследования

Предложить механизм взаимодействия хитозана с лаурилсульфатом натрия, выявить оптимальные условия и разработать инкапсулированные сорбенты.

Инкапсулирование – это заключение в нерастворимую оболочку целевого вещества для исключения влияния как окружения на данное вещество, так и вещества на окружение.

Хитозан – полимерный полисахарид, образованный деацетилированием хитина, имеющий, как правило, более 50% деацетилированных обменных групп. Сорбционные свойства хитозана вызваны уменьшением числа N-ацетилглюкозаминных фрагментов и увеличением числа более активных N-глюкозаминных фрагментов, число которых может достигать 95% (рисунок 1).

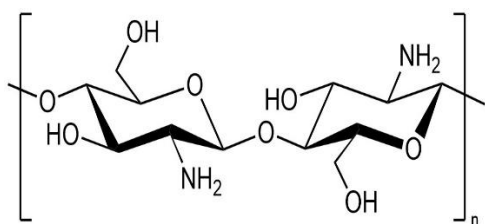


Рис. 1 Структурная формула хитозана

Хитозан применяется в медицине в качестве радиопротектора, БАДа, компонента перевязочных и стерилизационных материалов, носителя лекарственных препаратов с антикоагуляционной активностью; в промышленности хитозан также нашёл своё применение как сорбент, эффективно извлекающий катионы тяжёлых металлов и жиры из водной среды.

Сорбция хитозаном происходит за счёт наличия практически в каждом звене активной аминогруппы, обладающей свободной электронной парой. Она позволяет вступать в донорно-акцепторное взаимодействие со свободными электронными орбиталями множества металлов. Координированно связанный ион металла становится частью общей структуры полисахаридной молекулы. В меньшей степени катионы металлов координирует неподелённая электронная пара кислорода в шестичленном цикле [3, 4].

При всех достоинствах хитозана – отсутствии каких-либо негативных эффектов при его

нахождении в воде и являясь продуктом переработки органических отходов, он не может быть классифицирован как универсальный сорбент, поскольку его твёрдая форма представлена в виде порошка, обладающего относительно неразвитой линейной структурой и имеющего неправильную форму каждой частицы. Помимо этого, хитозан растворим при пониженном значении pH – в растворах разбавленных кислот, кроме серной кислоты и органических многоосновных кислот.

Для придания хитозану нужных свойств его подвергают модификации. Изменение химического состава макромолекулы может происходить с образованием более прочного, сшитого вещества, композита или комплекса, обладающего новыми свойствами [5].

Так, для устранения воздействия кислой среды и сохранения поглощающих способностей предложено протектировать хитозан нерастворимой плёнкой. В данном случае целесообразно рассмотреть новую нерастворимую капсулу как частицу, состоящую из двух фаз: жидкого хитозана, выступающего в роли сорбента, локализованного в плёночной оболочке и твёрдой нерастворимой во внешней среде плёнки, выступающей в роли оболочки и протектора от распространения сорбента в объём раствора (рис. 2) [6].

При этом попадание раствора в водную фазу диффузией через плёнку приводит к взаимодействию сорбента с извлекаемым из раствора веществом, а обратного уноса вещества с растворённым хитозаном не происходит. Таким образом, целевое вещество концентрируется в капсулах, которые можно отделить от очищенного раствора.



Рис. 2 Структурная модель капсулированного нерастворимой плёнкой хитозана

Плёнка должна представлять собой, с одной стороны, полупроницаемую мембрану, через которую возможно необратимое попадание извлекаемого компонента в фазу сорбента; с другой

стороны, при взаимодействии с хитозаном новообразованная глобула должна обладать правильной формой и механической устойчивостью. Для осуществления данных условий можно представить строение плёнки в виде мономолекулярного нерастворимого слоя, состоящего с одной стороны из молекул растворённого хитозана, с другой стороны – из вещества, связанного с активными группами каждого звена хитозана [7, 6].

Получение нерастворимой плёнки базируется на полиэлектролитных свойствах хитозана, а именно на способности образования интерполиэлектролитных комплексов (ИПЭК) и комплексов поверхностно-активного вещества с полиэлектролитом (ПАВ-ПЭ).

ИПЭК представляет собой продукт взаимодействия катионного и анионного электролитов, образованный вследствие электростатических взаимодействий, противоположно заряженных макроионов. Полученный ИПЭК направлен к фазе растворителя своей гидрофобной частью, а ионогенные группы расположены внутри плёнки (рис. 3).

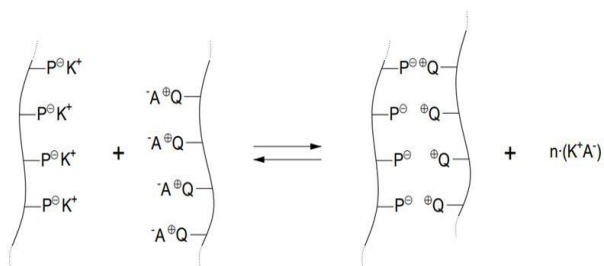


Рис. 3 Схема образования интерполиэлектролитного комплекса

Формирование ИПЭК имеет ряд недостатков:

- 1) Растворимость плёнки зависит от стехиометрического соотношения компонентов – плёнка ИПЭК нерастворима только при мольном соотношении компонентов, близких или равных единице;
- 2) Формируемая глобула имеет ряд структурных деформаций – образующиеся полости, называемые «хвостами» и «петлями», вызваны стерическими несоответствиями между полиэлектролитными компонентами;
- 3) Реакцию взаимодействия необходимо инициировать – взаимодействие полиэлектролитов со слабодиссоциирующими ионогенными группами интенсифицируется коррективкой pH и ионной силы раствора. Отличными от ИПЭК свойствами обладает

полиэлектролит, модифицированный поверхностно-активным веществом.

Образование ПАВ-ПЭК происходит момент, называемый критической концентрацией агрегатообразования (ККА). ККА является величиной, характеризующей интенсивность степени связывания ПЭ с ПАВ. До наступления ККА смесь двух компонентов представляет собой взаимодействие изолированных молекул ПАВ со свободными группами ПЭ, после наступления ККА степень связывания стремительно растёт, наступает превращение в мицеллу с гидрофобным ядром и гидрофильной внешней частью, окружённой полиэлектролитом.

В зависимости от степени связывания получаются стехиометрические и нестехиометрические комплексы с различными свойствами [7].

Поверхностно-активное вещество состоит из полярной гидрофильной головной части и неполярного гидрофобного «хвоста». Заряд ПАВ определяется зарядом его головной части. При взаимодействии противоположно заряженных ПЭ и ПАВ образуются комплексы ПАВ-ПЭ, образованные как следствие электростатических сил между ионогенными группами ПЭ и головными группами ПАВ и гидрофобных взаимодействий неполярного фрагмента ПАВ (рис. 4).

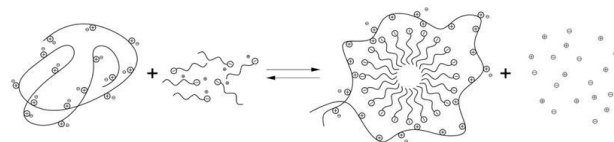


Рис. 4 Схема образования ПАВ-полиэлектролитного комплекса

Достоинствами данного способа связывания является относительная простота получения плёнки с заданными свойствами. При этом они во многом определяются его составом комплекса, который имеет несколько специфических областей.

Технология получения инкапсулированных сорбентов

Для получения сорбентов в стакан помещали 20 мл анализируемого раствора свинца концентрацией 1000 мкг/л и 20 мл раствора додецилсульфата натрия с концентрацией 0,2 моль/л. Взаимное разбавление двух веществ обеспечивает оптимум концентраций ПАВ и металла. В смесь добавляли 30 мл гептана для эмульгирования хитозана.

Перемешивание раствора с помощью магнитной мешалки осуществляли при минимально возможной скорости с сохранением границы раздела органической и водной фазы.

После начала перемешивания из бюретки по каплям в раствор вносили солянокислый раствор хитозана концентрацией 0,05 моль/л. Органическая фаза позволяла осуществлять введение хитозана с достаточно высокой скоростью 5 – 8 капель в секунду. Каждая капля в растворе превращалась в микрокапсулу (рис. 5). Для добавления хитозана в раствор по каплям применялся шприц, при этом диаметр образующихся капель не превышал 1 мм в диаметре.



Рис. 5 Общий вид инкапсулированных сорбентов

Методом вольтамперометрии доказана сорбционная способность разработанного электролитного комплекса. Так степень извлечения ионов свинца из водных растворов составляет в среднем 80-85%.

При определении сорбционной способности микрокапсулы следует учитывать поглощение всеми фазами, через которые проникает извлекаемое вещество (рис. 6). Наличие заметных поглощающих способностей у плёнки или у материала, из которого она образована, может влиять на общий механизм сорбции. Так, помимо диффузии извлекаемого вещества через плёнку и адсорбции на ней возможны хемосорбция, распределение вещества между плёнкой и непосредственно хитозаном [8, 9]. Эти явления влияют на кинетику процесса сорбции, а также, могут, как способствовать переносу вещества в жидкую фазу капсулы (особенно на начальном этапе), так и концентрировать до определённых пределов его в плёнке.

При рассмотрении нерастворимого ПАВ-ПЭ комплекса как адсорбента нужно учитывать десорбцию вещества из фазы плёнки в раствор, а при наличии распределения вещества между хитозаном и плёнкой – возможность десорбции вещества в целом [9].

Микрокапсулы, полученные непосредственно в ходе сорбционной очистки, подверга-

ются воздействиям, которые можно охарактеризовать их продолжительностью. Так, с одной стороны, на микрокапсулы влияют факторы, действие которых наблюдается на протяжении всего процесса сорбции и времени их существования. С другой стороны, степень влияния некоторых факторов на микрокапсулы напрямую зависит от времени пребывания в растворе.

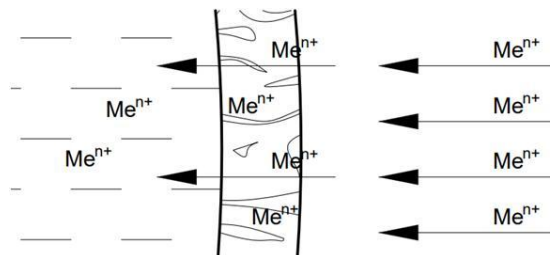


Рис. 6 Схема поглощение ионов металла микрокапсулой с учётом поглощения в плёночной фазе

К первой категории относится скорость падения каплей хитозана в органическую, а затем и в водную фазу. Увеличение скорости падения приводит к вытягиванию капли, и, впоследствии, капсулы. Для уменьшения влияния скорости падения капли, перед попаданием в исследуемый раствор, проходят через слой менее плотного гептана, сопротивление которого достаточно для почти полного возвращения сферической формы капли. Тем не менее, немного растянутые капли образуют немного растянутые капсулы, более склонные к слиянию. То есть, в растворе микрокапсулы имеют форму эллипсоида со следами «хвоста» капли [6].

В случае добавления к раствору с ограниченным количеством ПАВ и бесконечным размером реакционной ёмкости, эмульгированных капель хитозана, последние, капсулируясь, переходят в толщу раствора под действием силы тяжести. Глобулы разделены друг от друга толщиной растворителя и их поверхности могут полностью контактировать с ним (в случае отсутствия дефектов оболочки). Способность к поглощению достигает максимума.

Добавление по каплям хитозана в раствор, ограниченный некоторыми размерами с достаточно большой концентрацией ПАВ, приводит сначала к образованию отдельных капсул, которые затем под действием адгезионных сил начинают сливаться друг с другом. В данном случае сила тяжести, оказывая растягивающее действие на новосформированные глобулы, образует центры повышенного поверхностного натяжения.

Энергетически выгодным преобразованием в такой ситуации и будет являться процесс слияния.

Агрегированный комплекс будет обладать уменьшенными сорбционными способностями по сравнению с индивидуальными глобулами, как вследствие меньшей удельной поверхности сорбента, так и из-за наличия градиента «свободных» звеньев хитозана внутри капсулы – поступление сорбируемого вещества в толщу фазы хитозана или «свободного» звена к её границе осложнено диффузионными процессами [10 – 13].

Выводы

1. Разработана технология получения сорбента на основе хитозана и додецилсульфата натрия.
2. На образование полиэлектролитного комплекса влияет скорость добавления хитозана и время пребывания комплексов в растворе.
3. Разработанный сорбент на основе хитозана и додецилсульфата натрия рекомендуется применять для очистки сточных вод от ионов свинца.

Список литературы

1. Тимохина М.А. Будущее химической промышленности – на перекрестке инноваций/М.А. Тимохина // Вестник науки и образования. - 2023. - №10-2(141). - С.5-7.
2. Воронин А.В. сравнительный элементный анализ при экспертных исследованиях некоторых объектов / А.В. Воронин // Медицинский вестник Башкортостана. – 2018. – Т13, № 6(78). – С. 37-41.
3. Хитозан: Коллективная монография. – Москва: Центр «Биоинженерия» РАН, 2013. – 596 с.
4. Буткевич Т.В. Сорбция тяжелых металлов хитозан-глюкановым комплексом из *Aspergillus niger* / Т.В. Буткевич, Н.В. Сушинская, В.П. Курченко // Молекулярно-генетические и биотехнологические основы получения и применения синтетических и природных биологически активных веществ (Нарочанские чтения - 11): материалы Международной научно-практической конференции (20–23 сентября 2017 г.) / БГУ, СКФУ, САФУ; составители: В.П. Курченко, А.Д. Лодыгин. – Минск – Ставрополь: Белорусский государственный университет, Северо-Кавказский федеральный университет, 2017. – С. 17-22.
5. Вихорева Г.А. Комплексообразование в системе додецилсульфат натрия-хитозан / Г.А. Вихорева [и др.] // Высокомолекулярные соединения. –

1997. – Серия А, Т.39, №39. – С. 947-952.
6. Ринодо М. ПАВ-полиэлектролитные комплексы на основе производных хитина / М. Ринодо, Н.Р. Кильдеева, В.Г. Бабак // Российский химический журнал. – 2008. - Т.52, № 1. - С.84-91.
7. Пышкина О.А. Полиэлектролиты: методическое пособие / О.А. Пышкина, О.А. Новоскольцева, А.А. Ярославов. – М. – 2022. – 97 с.
8. Ткаченко Э. В. Изучение сорбционной способности комплекса хитозан- додецилсульфат натрия на примере сорбции ионов свинца / Э. В. Ткаченко, С. В. Русяев // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 268-275.
9. Мелихов И.В. Механизм сорбции и прогнозирование поведения сорбентов в физико-химических системах / И.В. Мелихов, Д.Г. Бердоноснова, Г.И. Сигейкин. – М.: Успехи химии. – 2002. – № 71(2). – С. 159-179;
10. Велиган Е.Р. Изучение агрегативной устойчивости дисперсных магнийсиликатных систем / Е.Р.Велиган, Т.А.Бобова, Е.А.Смирнова // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 4. – С. 130-131.
11. Аманбаев Т.Р. Влияние осаждения и коагуляции частиц на параметры текущих в трубе наноаэрозолей / Т.Р. Аманбаев. – Шымкент: Журнал технической физики, 2021. – Т. 91, № 3 – С. 395-401.
12. Крылов А. Б. Поверхностное натяжение и связанные с ним явления: учеб-метод. пособие / А. Б. Крылов. – Минск: БГМУ, 2008. – 32 с.
13. Славинская Г.В. Выявление механизма сорбции никеля анионитами в разной ионной форме / Г.В. Славинская, О.В. Куренкова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т.10, № 5. – С.695-704.

References

1. Timokhina M.A. The future of the chemical industry – at the crossroads of innovations/M.A.Timokhina// Bulletin of Science and Education. - 2023. - №10-2(141). - Pp.5-7.
2. Voronin A.V. comparative elemental analysis in expert studies of some objects / A.V. Voronin // Medical Bulletin of Bashkortostan. - 2018. – T13, No. 6(78). – pp. 37-41.
3. Chitosan: A collective monograph. Moscow: Bioengineering Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. 596 p
4. Butkevich T.V. Sorption of heavy metals by chitosan–glucan complex from *Aspergillus niger* / T.V. Butkevich, N.V. Sushinskaya, V.P.Kurchenko // Molecular genetic and biotechnological foundations for the production and application of synthetic and natural biologically active substances (Naroch readings - 11): materials of the International Scientific and Practical Conference (September 20-23, 2017) / BSU, NCFU, SAFU; compiled by V.P. Kurchenko,

- A.D. Lodygin. – Minsk – Stavropol: Belarusian State University, North Caucasus Federal University, 2017. – pp. 17-22.
5. Vikhoreva G.A. Complex formation in the sodium dodecyl sulfate-chitosan system / G.A. Vikhoreva [et al.] // High-molecular compounds. – 1997. – Series A, Vol. 39, No.39. – pp. 947-952.
 6. Rinodo M. Surfactant-polyelectrolyte complexes based on chitin derivatives / M. Rinodo, N.R. Kildeeva, V.G. Babak // Russian Chemical Journal. – 2008. – Vol.52, No. 1.- pp.84-91.
 7. Pyshkina O.A. Polyelectrolytes: a methodological guide / O.A. Pyshkina, O.A. Novoskoltseva, A.A. Yaroslavov. – M. – 2022. – 97 p.
 8. Tkachenko E. V. Studying the sorption capacity of the chitosan-dodecyl sulfate complex on-triya on the example of sorption of lead ions / E. V. Tkachenko, S. V. Rusyaev // Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. - 2023. – Vol. 9, No. 2. – pp. 268-275.
 9. Melikhov I.V. Sorption mechanism and prediction of sorbent behavior in physico-chemical systems / I.V. Melikhov, D.G. Berdonosova, G.I. Sigeikin. – M.: Successes of chemistry. – 2002. – No. 71(2). – pp. 159-179;
 10. Veligan E.R. The study of the aggregative stability of dispersed magnesium silicate systems / E.R.Veligan, T.A.Bobova, E.A.Smirnova // From the universities. Chemistry and Chemical Technology. - 2007. – Vol. 50, No. 4. – pp. 130-131.
 11. Amanbayev T.R. The effect of precipitation and coagulation of particles on the parameters of aerosols flowing in the pipe / T.R. Amanbayev. Shymkent: Journal of Technical Physics, 2021. – vol. 91, No. 3 – pp. 395-401.
 12. Krylov A. B. Surface tension and related phenomena: textbook method. the manual / A. B. Krylov. – Minsk: BSMU, 2008. – 32 p.
 13. Slavinskaya G.V. Identification of the mechanism of nickel sorption by anionites in different ionic forms / G.V. Slavinskaya, O.V. Kurenkova // Sorption and chromatographic processes. – 2010. – vol.10, No. 5. – pp. 695-704.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск № 1, 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 20.03.2025 Заказ 7/25. Дата выхода в свет: Тираж 30 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 16,74.

Севастополь, 2025