

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК

Сборник научных трудов

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2026

УДК 62

Редакционная коллегия:

И. С. Александров (отв. редактор, директор ИМТЭС ФГБОУ ВО «КГТУ»),
Е. С. Землякова (отв. секретарь, зам. директора ИМТЭС ФГБОУ ВО «КГТУ»)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теории механизмов
и машин и деталей машин ИМТЭС
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
С. В. Федоров
доктор технических наук, профессор НОЦ СМИТ ИМТЭС
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
Н. Л. Великанов

Актуальные вопросы инженерных наук: сборник научных трудов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2026. – 105 с.
ISBN 978-5-94826-865-1

В сборнике представлены результаты исследований преподавателей, сотрудников и магистрантов университетов по различным направлениям инженерной отрасли за последние годы.

В сборник входят статьи с теоретическими и экспериментальными решениями широкого спектра задач, связанных с инженерно-техническими проблемами электроэнергетики, строительства, судостроения и др.

Сборник научных статей предназначен для научных сотрудников, инженеров, преподавателей высших и средних специальных учебных заведений, аспирантов и студентов, связанных с широким кругом инженерных задач.

Рис. 43, табл. 13, список лит. – 86 наименований

УДК 62

ISBN 978-5-94826-865-1

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2026 г.
© Коллектив авторов, 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
М. Д. Глазунов, М. В. Китаев Обобщение информации о методах борьбы с биообрастанием и коррозией судов.....	5
М. Д. Глазунов, М. В. Китаев Обобщение информации о процессах биообрастания и коррозии судов.....	16
Н. И. Шевченко, А. Г. Филонов Теоретическое исследование эффективности сепаратора насыщенного пара для производственных и отопительных котельных	27
И. Р. Ризванов, М. А. Пейсахович Обнаружение утечек и несанкционированных врезок в гидравлической системе НПС-линейная часть магистрального нефтепровода.....	39
В. М. Нилова, А. С. Макаров, Д. Е. Петрушин Разработка мероприятий по снятию ограничений на выдачу мощности каскада Выгских ГЭС.....	46
Д. А. Евдокимов Оценка перспектив использования гидропотенциала реки Гурьевка для электроснабжения учебно-опытного хозяйства ФГБОУ ВО "КГТУ".....	55
А. Д. Боева, П. Р. Гришин Эффективность внедрения BIM-технологий в судостроение на примере рабочей конструкторской документации.....	66
А. Аккаш, М. С. Харитонов Сравнительный анализ алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности в фотоэлектрических системах при частичном затемнении.....	75
О. О. Варзанова, А. С. Лаврова, И. В. Кажевникова Использование композитных материалов для усиления металлических балок...87	
А. А. Шилова, В. Р. Синюкова, А. С. Лаврова Верификация конечно-элементных моделей пластин постоянной жесткости при оценке их напряженно-деформированного состояния	95

ВВЕДЕНИЕ

Инженерное дело является основой развития промышленного комплекса любой страны. Расширение технических возможностей и наращивание мощностей промышленного производства связано с проведением научных исследований в области технических наук. Результаты современных исследований, находят свое применение во многих отраслях экономики, особенно в промышленности, энергетическом комплексе, судостроении и строительстве.

В сборнике представлены результаты исследований преподавателей и магистрантов университетов по различным направлениям инженерной отрасли за последние годы.

Исследованы актуальные вопросы электро- и теплоэнергетики, строительства, судостроения.

УДК 62-761

ГРНТИ 81.33

ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О МЕТОДАХ БОРЬБЫ С БИООБРАСТАНИЕМ И КОРРОЗИЕЙ СУДОВ

М. Д. Глазунов, М. В. Китаев

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Россия;
glazunov.md@dvfu.ru

*биообрастание, коррозия, защитные покрытия, катодная защита, механическая очистка,
комплексный подход*

Биообрастание и коррозия корпуса судна существенно влияют на эффективность работы морского транспорта, приводят к увеличению сопротивления движению судов, повышению расхода топлива и выбросов в атмосферу, снижению скорости и маневренности, а также к ускоренному износу конструкционных материалов, что приводит к значительному увеличению эксплуатационных расходов, объемов и времени ремонтных работ. В условиях конкуренции и ужесточения экологических требований поиск эффективных, долговечных и экологически безопасных методов защиты корпусов судов становится особенно актуальным. Данная работа обобщает существующие методы борьбы с биообрастанием и коррозией, оценивая их эффективность, области применения, преимущества и недостатки.

Методы борьбы с биообрастанием и коррозией судна:

- 1) Механическая очистка

Механическая очистка – простой и экологичный метод борьбы с биообрастанием. Она заключается в удалении организмов с корпуса с помощью скребков, щеток, гидродинамических пушек, водолазов или роботов. Периодичность очистки определяют, как компромисс между ее стоимостью и потерями от обрастания [1].

Однако исследования показывают, что в теплый сезон очищенный корпус полностью обрастает за две недели. Метод эффективен лишь зимой, когда биоактивность низкая. Для долгосрочной защиты механическую очистку необходимо сочетать с противообрастающими покрытиями и более частым обслуживанием в периоды активности организмов [2]. На рисунке 1 показан процесс загрязнения металла после обработки вышеописанным способом.



Рисунок 1 – Демонстрация метода на опытовых пластинах: 2 – пластина, извлеченная из воды (3 мес. в воде); 5 – механическая обработка пластины (1 мес. в воде); 8 – механическая обработка пластины (3 мес. в воде) [2]

2) Лазерная очистка корпуса судна

Лазерная очистка корпуса предполагает использование излучения заданной мощности, которое удаляет обрастателей, не повреждая защитное покрытие. По эффективности метод аналогичен механической очистке – обрастание возобновляется, требуя повторных процедур. Ключевое преимущество – гибкость: обработку можно проводить в порту или на рейде без вывода судна из эксплуатации [2]. Наибольшая экономическая отдача достигается при профилактической очистке до начала интенсивного обрастания. Во время разгрузки к борту подходят катера, спускающие два-семь автономных роботов. Аппараты автоматически

очищают корпус, параллельно фиксируя повреждения (вмятины, трещины, коррозию, отслоение краски) [2].

Основные проблемы внедрения: необходимость полной роботизации, сложность управления системой, высокая стоимость оборудования и нехватка квалифицированных операторов [2].

На рисунке 2 показан процесс загрязнения металла после обработки вышеописанным способом.

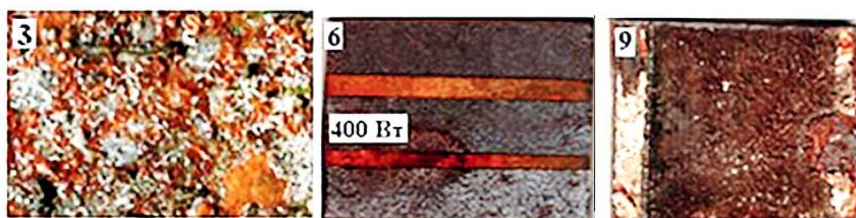


Рисунок 2 – Демонстрация результатов испытаний:

3 – пластина, извлеченная из воды (3 мес. в воде); 6 – механическая обработка пластины (1 мес. в воде); 9 – механическая обработка пластины (3 мес. в воде) [2]

3) Противообрастающие/противокоррозионные покрытия

Окраска судов – наиболее простой и надежный способ защиты от коррозии и обрастания. Однако успех зависит от комплекса факторов: конструкции судна, условий его эксплуатации, строгого соблюдения технологии окрасочных работ и выбора оптимальной схемы покрытия [3].

В связи с ростом морских перевозок и расширением районов плавания (включая северные широты) возрастают требования к лакокрасочным материалам. Необходимы новые технологические решения, обеспечивающие увеличенный срок службы и специальные защитные свойства для разных условий эксплуатации [3].

Наилучшие результаты показали следующие варианты покрытий:

Многослойные эпоксидные системы: наилучшая адгезия к металлу достигается при нанесении двух или трех слоев специализированных эпоксидных составов. Такие системы образуют прочное и долговечное покрытие.

Компоненты противообрастающих покрытий и красок, эффективных в борьбе с коррозией и биообрастанием представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Компоненты противообрастающих покрытий и красок

Назначение	Ключевые химические компоненты	Механизм действия	Эффективность и примечания
Борьба с биообрастанием	Оксид/закись меди (Cu_2O)	Постепенное выщелачивание из покрытия, создает токсичный слой, отпугивающий и уничтожающий личинки организмов	Основной и наиболее распространенный биоцид. Эффективность сохраняется при постоянном выделении
	Органические биоциды-гербициды	Дополняют действие меди, расширяя спектр воздействия на различные виды обрастателей	Используются в комбинации с медью для усиления защиты
	Самополирующиеся полимеры	Контролируемая эрозия поверхности покрытия под действием воды, обеспечивает постоянное обновление и выделение биоцидов, а также поддержание гладкой поверхности	Снижает сопротивление трению, экономит до 10–12 % топлива. Срок службы до 5 лет
Защита от коррозии	Цинк (Zn)	Катодная защита: цинк, как более активный металл, жертвенно разрушается, защищая стальной корпус	Используется в грунтовках (например, Penguard Express ZP)
	Стекланные/алюминиевые чешуйки	Барьерная защита: создают длинный и извилистый путь для агрессивных агентов (воды, кислорода), физически	Придают покрытию высокую износостойкость. Используются в эпоксидных мастиках (например,

Назначение	Ключевые химические компоненты	Механизм действия	Эффективность и примечания
		блокируя их доступ к металлу	Jotamastic 87 Aluminium)
	Эпоксидные и полиуретановые смолы	Образуют прочный, непроницаемый защитный слой, устойчивый к воде, механическим impactам и УФ-излучению (полиуретаны)	Основа долговечных систем покрытий. Эпоксидные смолы часто используются в грунтах, полиуретановые – в финишных слоях (например, Hardtop HB)

Рассмотрим более подробно самые распространенные составы.

Комбинированный состав «грунт + эмаль»: высокую эффективность демонстрируют схемы, где на сталь сначала наносится изолирующая грунтовка, а затем несколько слоев химически стойкой и противообрастающей эмали (рисунок 3). Именно такие комбинации обеспечивают наилучшую защиту от обрастания [4].



а)



б)

Рисунок 3 – Демонстрация результатов испытаний комбинированного состава: а – механическое повреждение покрытия, видимой адгезии не наблюдается (20 ч в воде); б – покрытие, погруженное в воду с водорослями (70 дней в воде) [4]

Традиционные составы (с двухслойным покрытием сурика железного):
Удовлетворительные результаты против коррозии показали покрытия на основе железного сурика, нанесенные в два слоя (см. рисунок 4) [4].



а)



б)

Рисунок 4 – Демонстрация результатов испытаний традиционного состава:
а – механическое повреждение покрытия, видимой адгезии не наблюдается (20 ч в воде); б – покрытие, погруженное в воду с водорослями (70 дней в воде) [4]

Универсальные составы «3 в 1»: покрытия, позиционируемые как «три в одном» (грунт, преобразователь ржавчины и эмаль), показали неудовлетворительную адгезию и, как следствие, низкую противокоррозионную эффективность. Их применение рекомендуется ограничить надводной частью корпуса, где требования к защите ниже (рисунок 5) [4].



а)



б)

Рисунок 5 – Демонстрация результатов испытаний (универсальный состав):
а – механическое повреждение покрытия, видимой адгезии не наблюдается (20 ч в воде); б – покрытие, погруженное в воду с водорослями (70 дней в воде) [4]

4) Электрохимическая (катодная) защита

Катодная защита превращает стальной корпус судна в катод, используя электрохимический процесс: в электролите более активный металл (анод) жертвует собой, защищая менее активный (катод).

Самый простой способ – протекторная защита (рисунок 6). На корпус крепят аноды из цинка или алюминия. В морской воде возникает гальваническая пара: протектор (анод) растворяется, подавая ток на сталь и подавляя ее коррозию. Пока анод разрушается, корпус защищен.

Преимущества метода: простота, автономность, не требует внешнего питания, дешев в эксплуатации.

Недостатки: аноды имеют ограниченный срок службы и требуют замены, их мощности может не хватать для крупных судов, а эффективность зависит от равномерного распределения по корпусу и качества электрического контакта.

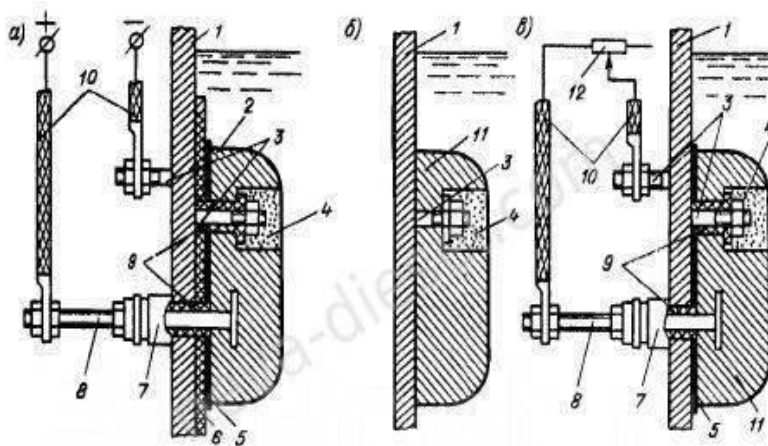


Рисунок 6 – Электрическая защита от коррозии: а – катодная; б – протекторная с короткозамкнутым протектором; в – протекторная с регулируемым сопротивлением; 1 – наружная обшивка; 2 – анод; 3 – приварные шпильки; 4 – герметик; 5 – резиновая прокладка; 6 – стеклопластиковый экран; 7 – сальник; 8 – контактная шпилька; 9 – изоляционные втулки; 10 – кабель; 11 – протектор; 12 – переменный резистор [5]

2. Защита наложенным током (ICCP – *Impressed Current Cathodic Protection*)

Более сложная и мощная система защиты – катодная защита с внешним током (рисунок 7). Внешний источник (выпрямитель) принудительно создает на корпусе отрицательный потенциал, делая его катодом. Ток подается на инертные аноды (из платинированного титана или оксидов металлов), которые практически не разрушаются, и через забортную воду поступает на корпус. Датчики потенциала в реальном времени измеряют уровень защиты и автоматически регулируют силу тока, подстраиваясь под скорость судна, соленость и температуру воды.

Преимущества: система обладает высокой мощностью и подходит для самых крупных судов, аноды служат долго, автоматика исключает недозащиту и перезащиту.

Недостатки: дороговизна оборудования и монтажа, зависимость от электропитания, необходимость регулярного техобслуживания.

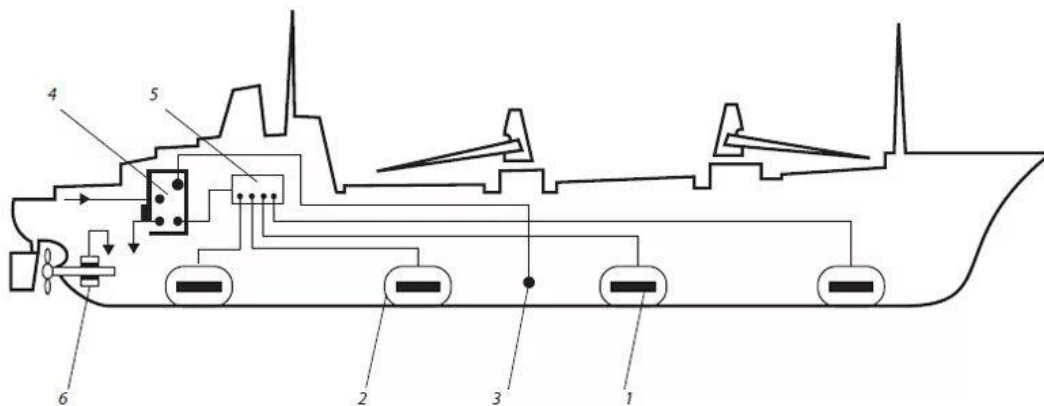


Рисунок 7 – Схема системы катодной защиты наложенным током подводной части корпуса судна: 1 – аноды; 2 – околоанодные экраны; 3 – электрод сравнения; 4 – источник питания; 5 – распределительный щит; 6 – контактно-щелочное устройство [6]

Ниже приведена сравнительная таблица 2 для двух методов защиты от коррозии.

Таблица 2 – Сравнительная таблица: Протекторная защита и ИССР

Критерий	Протекторная защита	Защита наложенным током (ИССР)
Принцип действия	Гальваническая пара: жертвенный анод	Внешний источник тока
Аноды	Цинк, алюминий, магний (расходуемые)	Платинированный титан, ММО (инертные)
Мощность/Масштаб	Небольшие и средние суда	Крупные суда, танкеры, авианосцы
Регулировка	Нет (фиксированная защита)	Да, автоматическая по потенциалу
Срок службы	Ограничен (пока не растворится анод)	Долгий (основные компоненты не расходуются)
Эксплуатация	Простая, автономная	Сложная, требует питания и обслуживания
Стоимость	Низкая (капитальные и эксплуатационные)	Высокая (капитальные и эксплуатационные)

Анализ методов защиты судов показал, что ни один из них не является универсальным. Эффективность каждого подхода зависит от условий эксплуатации, сезонности и экономических факторов.

Механические методы (очистка, лазер) дают временный эффект и требуют частого повторения.

Защитные покрытия (особенно многослойные с биоцидами) эффективны и долговечны, но требуют строгого соблюдения технологии нанесения.

Электрохимическая защита (протекторы или ИССР) надёжно предотвращает коррозию, причем выбор системы определяется размером судна и бюджетом.

Таким образом, для долговременной и экономичной защиты необходим комплексный подход, сочетающий стойкие покрытия, периодическую очистку и электрохимическую защиту. Это позволит снизить расходы, повысить экобезопасность и продлить срок службы судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пакулова, Э. П. Проблема биообрастания на судах и методы борьбы / Э. П. Пакулова // НАУКА и ИННОВАЦИИ в XXI ВЕКЕ: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 апреля 2022 г. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2022. – С. 44–46.

2. Перспективы и технико-экономические аспекты разработки новых методов контроля биообрастания на морском транспорте / Ю. Н. Кульчин, А. Ю. Звягинцев, Е. П. Субботин [и др.] // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2015. – № 6(184). – С. 96–102.

3. Искра, Е. В. Технология окрашивания судов / Е. В. Искра, А. М. Луговский. – Ленинград: Судостроение, 1988. – 176 с.

4. Лебедев, О. Ю. Способы защиты корпуса судна от коррозии и биообрастаний / О. Ю. Лебедев, М. Г. Мензилова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2021. – № 2. – С. 12–18.

5. Судовые протекторы [Электронный ресурс]. – URL: https://neva-diesel.com/cinkovye_protectory

6. Катодная защита наложенным током [Электронный ресурс]. – URL: <http://metalpaint.ru/stati-i-novosti/stati/87-katodnaya-zashita-nalozhennym-tokom>

GENERALIZATION OF INFORMATION ON METHODS OF COMBATING BIOFOULING AND CORROSION OF SHIPS

M. D. Glazunov, M. V. Kitaev

The article is devoted to the problem of biofouling and corrosion of marine vessels, which reduce operational efficiency and accelerate structural wear. The purpose of the work is a comparative analysis of protection methods. Mechanical and laser cleaning, protective coatings and electrochemical protection (tread and ICCP) are considered. Based on the literature data [1-4], the advantages and limitations of each approach have been identified: mechanical methods are short-term and seasonal, laser cleaning is effective but expensive, coatings provide long-term protection, electrochemical protection is reliable, but depends on operating conditions. The necessity of an integrated approach to increase the efficiency and service life of ships is substantiated.

Статья посвящена проблеме биообрастания и коррозии морских судов, снижающих эксплуатационную эффективность и ускоряющих износ конструкций. Цель работы – сравнительный анализ методов защиты. Рассмотрены механическая и лазерная очистка, защитные покрытия и электрохимическая защита (протекторная и ICCP). На основе литературных данных [1–4] выявлены преимущества и ограничения каждого подхода: механические методы краткосрочны и сезонны, лазерная очистка эффективна, но дорога, покрытия обеспечивают долговременную защиту, электрохимическая защита надежна, но зависит от условий эксплуатации. Обоснована необходимость комплексного подхода для повышения экономичности и срока службы судов.

УДК 62-761

ГРНТИ 81.33

ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЦЕССАХ БИООБРАСТАНИЯ И КОРРОЗИИ СУДОВ

М. Д. Глазунов, М. В. Китаев

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Россия;
glazunov.md@dvfu.ru

*биообрастание, коррозия, морские суда, биопленка, электрохимическая коррозия, факторы
обрастания, зона ватерлинии, комплексная защита*

Актуальность темы исследования обусловлена снижением функциональной эффективности судов отечественного флота ввиду совместного действия коррозии и биообрастания. Эти взаимосвязанные процессы носят глобальный характер и затрагивают ключевые отрасли: судоходство, энергетику, нефтегазовый комплекс и гидротехническое строительство. Коррозия и биообрастание не только сокращают ресурс конструкций, но и действуют синергетически. Биопленки и макрообрастатели создают условия для ускоренного локального разрушения металлов (питтинги, щелевая коррозия). Это приводит к росту эксплуатационных расходов, повышению аварийных рисков и значительным энергопотерям, например, из-за увеличения гидродинамического сопротивления. Таким образом, борьба с этими процессами остается критически важной задачей для материаловедения и инженерной практики.

Понятие биообрастания судна

Морское обрастание – это скопление организмов на подводных поверхностях, создающее шероховатость. Это увеличивает сопротивление движению судна, что ведет к росту расхода топлива и выбросов парниковых газов. Даже первичная биопленка значительно повышает сопротивление [1].

Обрастание тесно связано с коррозией: разрушение защитного покрытия (из-за механических нагрузок, особенно в районе носовой оконечности и кормы, а также гальванического воздействия винта) создает условия для интенсивного роста обрастателей. Скорость коррозии может достигать 5 мм/год.

В тропиках и теплое время года в других регионах обрастатели (животные и водоросли) активно заселяют подводную часть корпуса, рули, насадки и обтекатели. Это не только снижает скорость, но и дополнительно разрушает защитное покрытие [2] (рисунок 1).



Рисунок 1 – Процесс распространения организмов, колонизирующих на корпусе судна [6]

Биопленки обеспечивают подходящий, но не обязательный субстрат для прикрепления или роста микроорганизмов и поселения вторичных организмов биообрастания, которые, как правило, являются наиболее доминирующими и часто встречающимися организмами биообрастания на корпусах судов.

Понятие коррозии судна

Коррозия представляет собой одну из наиболее серьезных проблем для судов. В литературе недостаточно подробно освещены методы борьбы с этим явлением на водном транспорте. Чтобы эффективно противостоять коррозии, необходимо понимать механизм ее возникновения. Под коррозией понимается разрушение металла вследствие химического и электрохимического воздействия. Хотя одной из причин коррозии является взаимодействие металла с газами, в условиях морской среды основной причиной выступает контакт металла с электролитом [3].

Главным фактором морской коррозии является электрохимический процесс, протекающий по принципу работы гальванического элемента. Также значительное влияние оказывает биологический фактор, связанный с обрастанием подводной части судна морскими организмами, что ускоряет разрушение конструкций.

Наиболее интенсивное разрушение металла в морской воде наблюдается вдоль ватерлинии. Для этой зоны характерны циклы смачивания и высыхания, что приводит к смыванию защитной пленки и обогащению поверхности кислородом. Хотя на больших глубинах содержание кислорода снижается, суда преимущественно эксплуатируются в верхних, богатых кислородом слоях воды. Дополнительными факторами являются резкие перепады температур, однако ключевым остается постоянное воздействие электролита – морской воды.

Влажный воздух представляет для металлов не меньшую опасность, чем прямой контакт с водой. В морских условиях эта проблема усугубляется, так как воздух насыщен солевыми частицами, образующими слой толщиной 5–7 м. Оседая на поверхностях судна, соль поглощает влагу из воздуха, формируя концентрированный солевой раствор.

Морская вода, обладая низким электрическим сопротивлением, является хорошим электролитом. При контакте двух разнородных металлов в такой среде возникает гальванический элемент. Коррозии в морской условиях подвержены корпус и днище судна, а также другие металлические конструкции, постоянно контактирующие с водой.

К основным особенностям морской коррозии относятся:

- высокая агрессивность среды;
- значительное влияние контактной (гальванической) коррозии;
- наличие механических факторов;
- биологическое обрастание.

Таким образом, в морских условиях преобладает электрохимическая коррозия, где морская вода служит электролитом, а стальной корпус – электродом. Например, при контакте стали с медью или ее сплавами, сталь становится анодом и разрушается. Этот процесс и называется электрохимической коррозией.

Для защиты от коррозии в морской среде применяются различные методы: легирование, электрохимическая защита и нанесение защитных покрытий. Выбор метода зависит от условий эксплуатации судна. Однако наиболее эффективным решением на сегодняшний день считается использование титана для изготовления корпуса [4]. На рисунке 2 представлены виды коррозии листа металла.

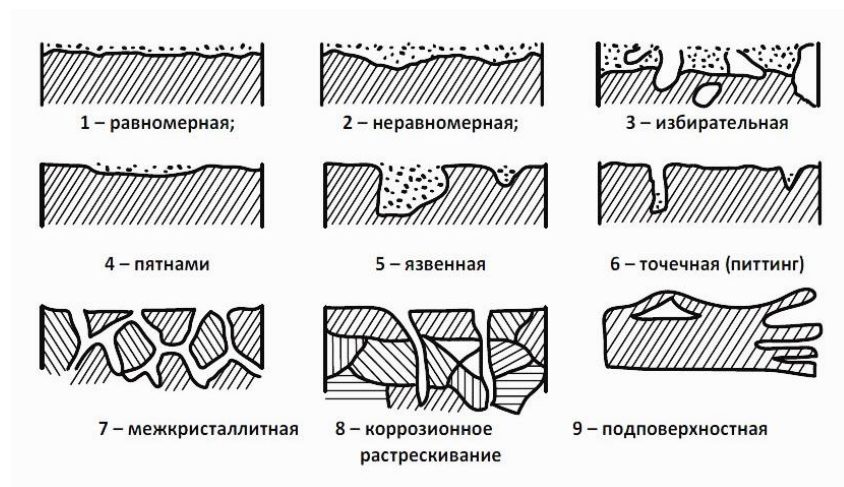


Рисунок 2 – Виды коррозии листа металла [11]

Факторы, влияющие на биологическое обрастание

На судах, когда противообрастающие системы отсутствуют, они старые, изношенные, чрезмерно пересушенные или иным образом поврежденные, последовательность обрастания в большинстве портовых и прибрежных вод обычно соответствует временной схеме, описанной ниже:

- первичный – слой слизи с серыми и зелеными оттенками, которые меняются в зависимости от содержания диатомовых водорослей и освещенности; паутинные трубки амфипод (в зависимости от сезона и уровня движения воды);

- вторичный – нитевидные зеленые водоросли, которые могут развиваться в бородачки у ватерлинии или транца, обеспечивая укрытие амфиподам и другой цепляющейся биоте;

- третичный – инкрустирующие мшанки; трубчатые черви, ракушки, дерновые красные водоросли, гидроиды, прямостоячие мшанки и эктокарпоидные бурые водоросли; мидии, устрицы, инкрустирующие губки, морские анемоны и морские брызги; и более крупные подвижные формы, включая блуждающих полихет, крабов, моллюсков, голожаберных моллюсков, криноидей и территориальных рыб [5].

Описанные выше стадии приведены на рисунке 3.

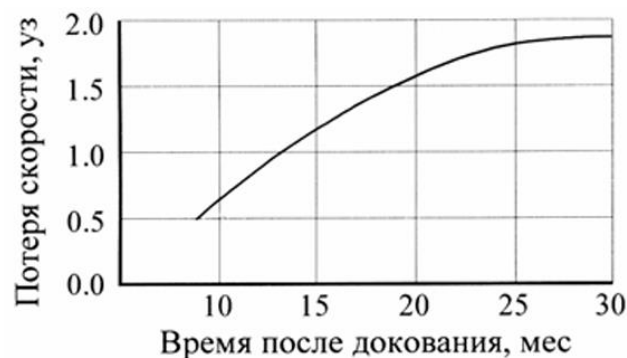


Рисунок 3 – Потеря скорости судов вследствие обрастания корпуса (Юнитер и др., 1977) [6]

Обрастание корпусов судов морскими организмами приводит к потере скорости, увеличению расхода топлива и в значительной степени определяет междудюковый период судов. На рисунке 3 приведены данные о потере скорости сухогрузных судов, эксплуатирующихся в основном в районах с тропическим и субтропическим климатом. Отрицательно влияют на скорость продолжительные стоянки судов в портах с тропическим климатом. График на рисунке 3 показывает, что основная потеря скорости происходит в первые 15 месяцев эксплуатации. Однако можно предполагать, что при применении стойких необрастающих красок интенсивное обрастание начинается спустя 9–12 месяцев, т. е. после частичного разрушения необрастающей краски или после потери ее токсичности [6]. На рисунке 4 схематично показаны стадии обрастания.



Рисунок 4 – Стадии биообрастания [5]

Прикрепление спор водорослей и личинок к корпусу судна отличается высокой прочностью: даже волны не способны их сорвать. Например, ракушки выделяют особый «клей» (секрет парных желез), который затвердевает в воде за 10–15 мин [4].

Обрастанию подвержены все подповерхностные элементы: гребные винты, рули, отверстия, обтекатели гидролокаторов и защитные решетки (рисунок 5). Оценить состояние подводной части можно либо в доке, либо с привлечением водолаза [7]. Основной процесс обрастания запускается во время стоянки в порту, когда микроорганизмы заносятся течением; на ходу судна это явление наблюдается реже [8].

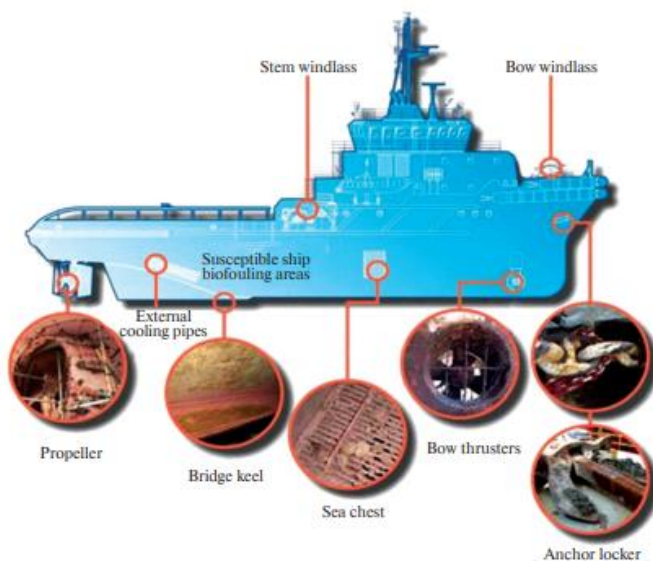


Рисунок 5 – Схема прикрепления морских обрастающих организмов к подповерхностным структурам судна [7]

Факторы, влияющие на коррозию судна

Коррозия корпуса судна вызывается комплексом факторов. Наиболее уязвима зона ватерлинии из-за циклического смачивания, высыхания и насыщения кислородом. Биологическое обрастание не только разрушает покрытие механически, но и создает под собой бескислородные зоны, инициируя биокоррозию.

Надводные части подвержены воздействию соленого воздуха: соль оседает на металле, притягивает влагу и формирует электролит. Также коррозию запускают механические повреждения покрытия (от трения, льда, ударов).

Отдельную группу составляют факторы, связанные с системами защиты. Долговечность лакокрасочных покрытий напрямую зависит от технологии их нанесения и ремонта. Некорректная работа катодной защиты опасна в двух случаях: при недозащите корпус ржавеет, а при перезащите отслаивается краска и развивается щелочная коррозия.

Анализ процессов биообрастания и коррозии судов показывает их тесную взаимосвязь и синергетическое воздействие, что приводит к значительному снижению эксплуатационной эффективности, росту расходов и рисков.

Биообрастание – это многостадийный процесс колонизации поверхности микро- и макроорганизмами, резко увеличивающий шероховатость корпуса, гидродинамическое сопротивление и расход топлива.

Коррозия в морской среде носит преимущественно электрохимический характер и резко интенсифицируется под влиянием биопленок и обрастателей, которые создают условия для локальных разрушений.

Основными факторами, определяющими скорость и интенсивность этих процессов, являются:

- внешняя среда: солёность, температура, содержание кислорода и загрязнения в воде;
- конструкционные особенности: контакт разнородных металлов (гальванические пары), наличие щелей и концентраторов напряжений;
- эксплуатационные условия: циклическое воздействие в зоне ватерлинии, механические повреждения, продолжительные стоянки в портах.

Таким образом, для обеспечения надёжности и экономической эффективности судов требуется комплексная стратегия защиты, учитывающая все стадии биообрастания, механизмы коррозии и совокупность воздействующих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костылев, И. И. Разработка и использования модуля загрязнения корпуса судна для прогнозирования биообрастания / И. И. Костылев, И. В. Стонт // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 149–151.
2. Пакулова, Э. П. Проблема биообрастания на судах и методы борьбы / Э. П. Пакулова // НАУКА и ИННОВАЦИИ в XXI ВЕКЕ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ОТКРЫТИЯ и ДОСТИЖЕНИЯ: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 апреля 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2022. – С. 44–46.
3. Титан коррозионная стойкость в морской воде [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chem21.info/info/392014/> (дата обращения: 15.01.2020).
4. Ворончихин, И. В. Борьба с коррозией на водном транспорте / И. В. Ворончихин, Д. А. Иордакий, Е. А. Чабанов // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Транспорт: проблемы, цели, перспективы» (TRANSPORT 2020), Пермский филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», Россия, ФГБОУ ВО «ПНИПУ», Россия. – Москва, 2020. – Т. 9, № 5. – С. 151–154.
5. Edith Arndt, Andrew Robinson, Susie Hester – Factors that influence vessel biofouling and its prevention and management – CEBRA, The University of Melbourne 2UNE Business School, University of New England Department of Agriculture, Water and the Environment, 2021. – Pp. 9–98.

6. Петрова, Н. Е. Биокоррозия корпусов судов / Н. Е. Петрова, Л. С. Баева // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. – 2006. – Т. 9, № 5. – С. 890–892.

7. Особенности исследования биообрастаний на корпусах судов с использованием современных возможностей искусственного интеллекта / М. В. Дюльдин, В. В. Киргизов, Н. В. Крупенина [и др.] // Предмагистерская подготовка иностранных граждан: сборник статей VI межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–22 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2024. – С. 142–149. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-431.

8. Биообрастание электродов сравнения протекторной защиты при длительном стояночном режиме судна: химический анализ и влияние на эксплуатацию / Д. П. Ястребов, Л. А. Позолотина, А. В. Климова, О. А. Белов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы Третьей международной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 26 ноября 2020 года / Отв. за выпуск О. А. Белов. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2021. – С. 31–35.

9. Almeida, E. Diamantino, Teresa C. & De Sousa. «Marine paints: The particular case of antifouling paints», Progress in Organic Coatings. – 2007. – V. 59(1). – Pp. 2–20.

10. Diego, M. Y., Kim Dam-Johansen. Antifouling technology-past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. Progress in Organic Coatings. – 2004. – V. 50(2). – Pp. 75–104.

11. Виды коррозии металла [Электронный ресурс]. – URL: <http://metalpaint.ru/stati-i-novosti/stati/79-vidy-korrozii-metalla>

GENERALIZATION OF INFORMATION ON BIOFOULING AND CORROSION PROCESSES OF SHIPS

M. D. Glazunov, M. V. Kitaev

The article is devoted to the analysis of interrelated processes of biofouling and corrosion of marine vessels, which reduce operational efficiency and accelerate structural wear. The concepts of biofouling (multi-stage colonization by micro- and macroorganisms) and marine corrosion (an electrochemical process in an electrolyte environment), as well as factors affecting their intensity, such as the external environment, ship design and operating mode, are disclosed. Based on the analysis of literature sources [1–10], it is shown that biofilms create conditions for local metal destruction, and the waterline zone is the most vulnerable. The necessity of a comprehensive protection strategy is substantiated.

Статья посвящена анализу взаимосвязанных процессов биообрастания и коррозии морских судов, снижающих эксплуатационную эффективность и ускоряющих износ конструкций. Раскрыты понятия биообрастания (многостадийная колонизация микро- и макроорганизмами) и морской коррозии (электрохимический процесс в среде электролита), а также факторы, влияющие на их интенсивность: внешняя среда, конструкция судна и режим эксплуатации. На основе анализа литературных источников [1–10] показано, что биопленки создают условия для локального разрушения металла, а зона ватерлинии наиболее уязвима. Обоснована необходимость комплексной стратегии защиты.

УДК 621.311.22

ГРНТИ 44.33.29

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАТОРА НАСЫЩЕННОГО ПАРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Н. И. Шевченко, А. Г. Филонов

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, Россия; sudfac@yandex.ru

производственная котельная, насыщенный пар, районная тепловая станция, влажность пара, эрозионный износ паропровода, выносной сепаратор пара, гидравлическое сопротивление, расчет на прочность, коэффициент очистки пара

Технологические потребители тепловой энергии промышленных предприятий Калининградской области: сушильные установки, банкомоечные машины, бланширователи, аппараты для наполнения и закатки банок, автоклавы – потребляют обычно насыщенный пар с давлением $P = (0,1 \div 0,7)$ МПа в количестве $(80 \div 3000)$ кг/ч. При значительной длине теплотрассы $(100 \div 500)$ м транспортировка насыщенного пара к теплопотребляющему оборудованию сопровождается его конденсацией и дальнейшим увеличением влажности, которая перед технологическими потребителями может повышаться до значений $\omega_1 = (10 \div 25) \%$ [1].

Образовавшийся конденсат и попавшая в паропровод котловая вода увлекаются движущимся паром и при скорости в паропроводе около $(10 \div 30)$ м/с вызывают гидравлические удары, эрозионно-коррозионное разрушение металла в наиболее уязвимых участках теплотрассы (отводы, тройники, повороты, путевые соединения).

Попадая в запорную арматуру, соли, содержащиеся в котловой воде, образуют отложения на уплотняющей поверхности.

Высокая влажность насыщенного пара вносит значительные погрешности при измерении расхода теплоносителя на потребитель стандартной диафрагмой в комплекте с дифманометром-расходомером во время проведения теплотехнических испытаний технологических аппаратов. Применяемые способы измерения расхода насыщенного пара рассчитаны для однофазной среды с постоянными параметрами. Причиной этого является то, что вследствие разницы плотностей жидкой фазы ρ' и паровой фазы ρ'' в месте сужения диафрагмы, где происходит ускорение потока, тяжелая жидкая фаза отстает от легкой паровой и проходит через отверстие сужающего устройства со значительно меньшими скоростями. С помощью стандартных диафрагм возможно проводить измерения только сухой части влажного пара [2].

Анализ литературных источников показывает, что среди основных типов сепарирующих устройств паровых котлов среднего давления (центробежные, вихревые, жалюзийные) для задач тонкой очистки насыщенного пара наилучшим сочетанием эксплуатационных характеристик обладают вертикальные жалюзийные (пластинчатые) сепараторы [2–4]. Их преимущество определяется:

- высокой эффективностью удаления капельной влаги;
- низким гидравлическим сопротивлением;
- стабильностью работы в широком диапазоне нагрузок.

Внутрикотловая сепарация современного барабанного котла является многоступенчатой. При этом установка дополнительной вертикальной жалюзийной ступени непосредственно в барабане существующих котлов низкого и среднего давления часто невозможна из-за ограничений по габаритам и необходимости сложной схемы дренажа уловленной влаги.

Оптимальным решением для модернизации тепловой схемы РТС, производственной и отопительной котельной с паровыми котлами низкого и среднего давления с целью повышения качества пара является установка выносного (попутного) вертикального жалюзийного сепаратора на паропроводе. Данный подход позволяет использовать достоинства жалюзийного сепаратора без реконструкции парового котла.

Техническая реализуемость такого решения подтверждена наличием апробированной конструкции выносных (попутных) жалюзийных сепараторов для паропроводов диаметром Ду 32-Ду 200, разработанных в Калининградском государственном техническом университете (КГТУ), и положительным опытом их испытаний и внедрений на промышленных предприятиях Калининградского региона и России [1, 2].

Однако при разработке сепараторов КГТУ на начальном этапе не учитывалось влияние режимных параметров работы сепаратора на его эффективность. В этой связи в цели настоящего теоретического исследования входило:

- определение зависимости критической скорости пара в сепараторе от начальной влажности пара в паропроводе $\omega_1 = (1-25) \%$ при давлениях пара (0,4–1,4) МПа;
- определение предельной пропускной способности сепаратора и минимальной влажности пара после сепаратора при этих режимных условиях.

Принципиальная схема путевого вертикального жалюзийного сепаратора представлена на рисунке 1. Сепаратор устанавливался на горизонтальном участке паропровода. Предварительная, грубая сепарация крупных капель из ядра потока влажного пара происходила во время снижения скорости пара W_c'' и уменьшения его транспортирующей способности в диффузоре 1, который одновременно предотвращал «захлебывание» вертикального жалюзийного сепаратора 2, установленного в корпусе 3 после диффузора.

Выпадение крупных капель из потока на стенки диффузора, работающего по принципу линейного сепаратора, происходит в результате турбулентного массообмена. Осаждаясь в диффузоре, капли воды образуют пленку, которая облегчает условия дальнейшего отделения крупных капель. Влага, транспортируемая паром по стенкам паропровода, поступая в диффузор из теплотрассы, также способствует процессу предварительной сепарации капель.

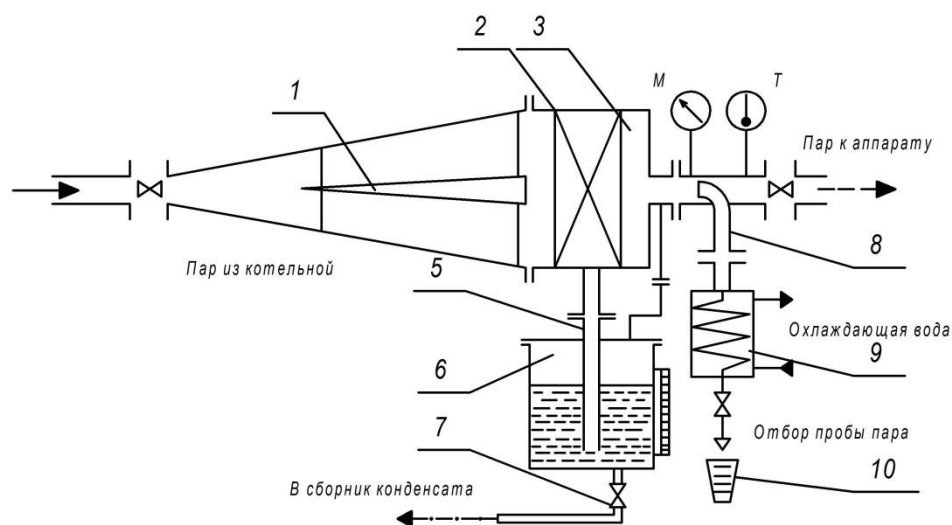


Рисунок 1 – Схема путевого вертикального жалюзийного сепаратора
 1 – диффузор; 2 – жалюзийный сепаратор; 3 – корпус; 4 – стабилизатор; 5 – сливная труба; 6 – сборник сепарата; 7 – дренажный клапан; 8 – пробоотборник;
 9 – охладитель пробы; 10 – мерная пробоотборная емкость

Общий вид выносного вертикального жалюзийного сепаратора показан на рисунке 2.

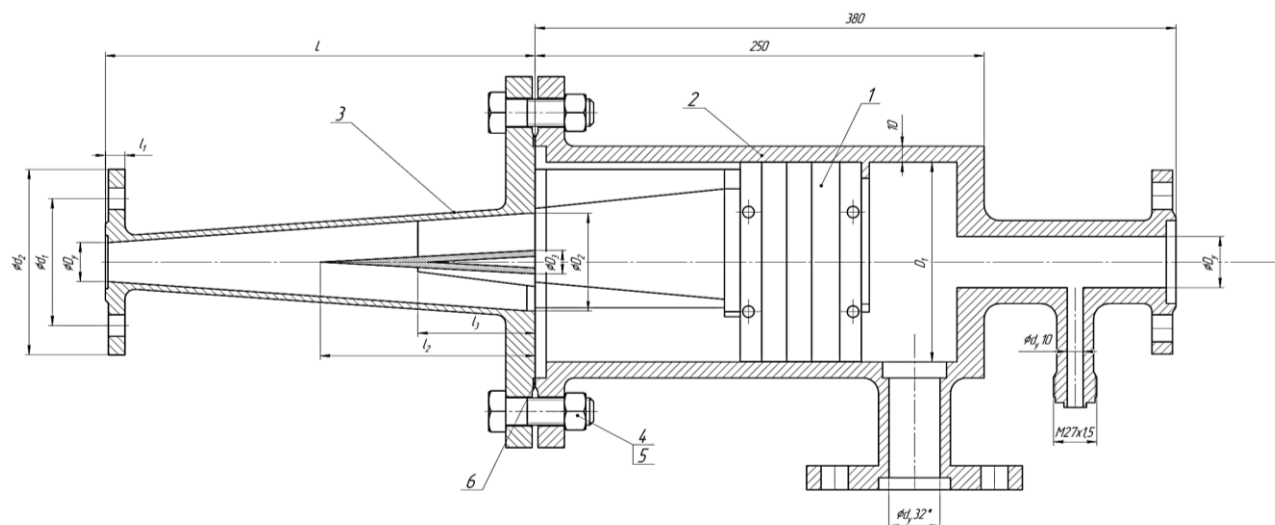


Рисунок 2 – Общий вид вертикального жалюзийного сепаратора:
1 – пакет вертикальных жалюзи; 2 – корпус; 3 – входной диффузор

Общий вид вертикального пакета жалюзи показан на рисунке 3. Материал пластин жалюзи – нержавеющая сталь.

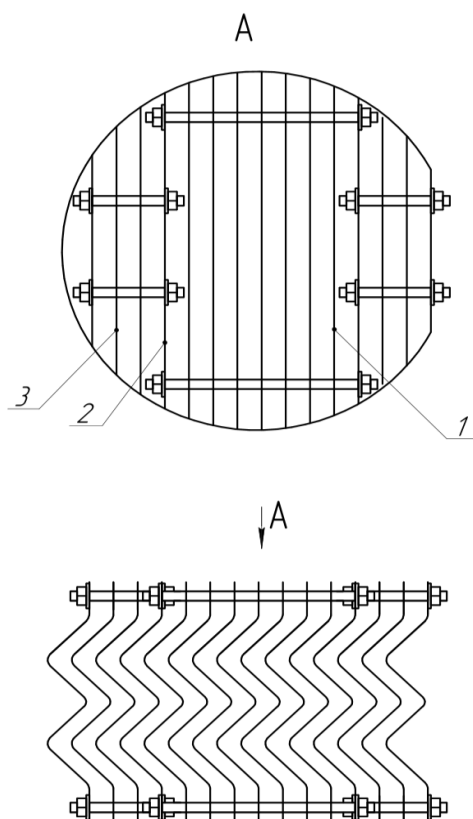


Рисунок 3 – Общий вид и компоновка пакета жалюзи:
1 – большая пластина; 2 – соединительная пластина; 3 – малая пластина

На начальной стадии проектирования сепаратора расчет критической скорости пара в сепараторе производился по формуле И. Черника для внутрибарабанных вертикальных жалюзийных сепараторов паровых котлов среднего давления без учета влажности пара перед сепаратором ω_1 [2]:

$$W''_{кр} = 5,8 \cdot \left[\frac{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'') \cdot \eta''}{(\rho'')^2 \cdot \eta'} \right]^{0,25}, \text{ м/с.} \quad (1)$$

На рисунке 4 представлены результаты этих расчетов. Как видно из рисунка, с увеличением давления пара значения $W''_{кр}$ снижаются. Однако значения $W''_{кр}$, полученные по формуле (1), являются завышенными, так как не учитывают влажность на входе в сепаратор ω_1 , которая в паропроводе может достигать гораздо более высоких значений, чем в барабане котла и требуют обязательного уточнения.

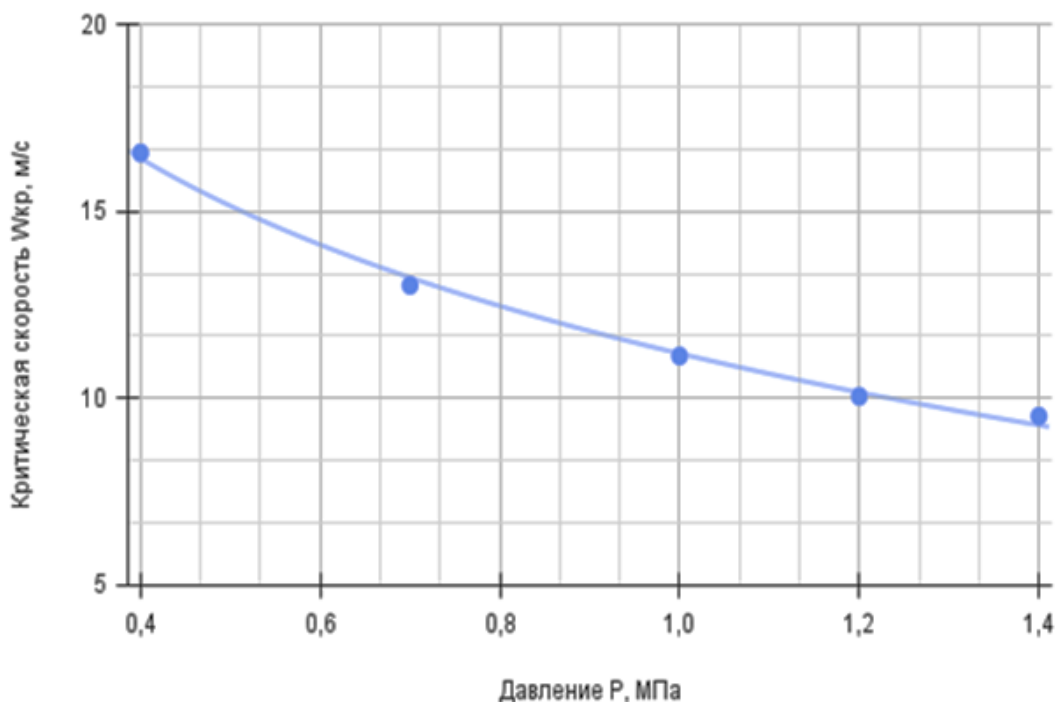


Рисунок 4 – Зависимость критической скорости пара в вертикальном жалюзийном сепараторе от давления пара в сепараторе

Данный пересчёт с учетом ω_1 позволяет определить безопасный верхний предел скорости пара для заданных режимных условий, исключая явление вторичного уноса и обеспечивающий стабильную эффективность сепарации. Для уточняющего расчета была использована зависимость Ю. В. Козлова (ВТИ) [2]:

$$W''_{np} = K_p \cdot \left[\frac{\sigma \cdot (\rho' - \rho'')}{(\rho'')^2} \right]^{0,27} \cdot \left[\frac{x'}{(1-x')} \right]^{0,1} \cdot \left[6,9 + 3,3 \cdot \lg \frac{\beta}{360 - \beta} \right], \text{ м/с}, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент неравномерности скорости на входе в жалюзи; $6,9 + 3,3 \cdot \lg \frac{\beta}{360 - \beta}$ – параметр, учитывающий угол наклона пакета жалюзи к горизонтали; $\frac{x'}{1-x'}$ – параметр, учитывающий значения начальной влажности при её значении до 30 %.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов значений $W''_{кр}$ в зависимости от влажности пара перед сепаратором ω_1 . Из рисунка видно, что начальная влажность в значительной мере влияет на критическую скорость, особенно в области низких значений ω_1 , и чем она больше, тем меньше $W''_{кр}$.

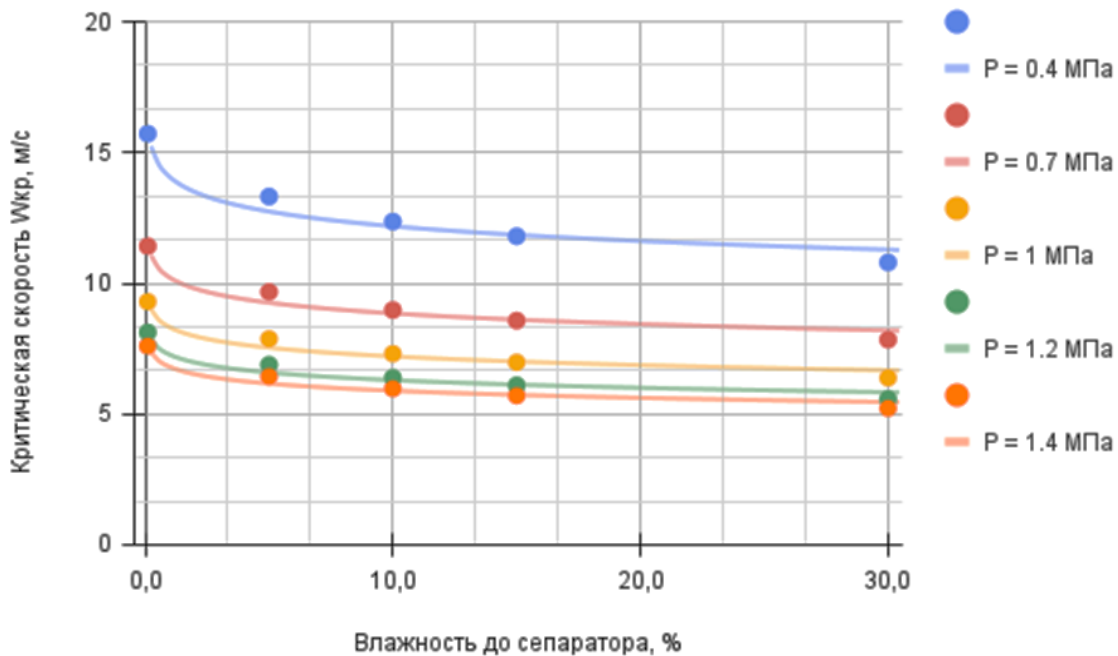


Рисунок 5 – Зависимость критической скорости сепаратора от начальной влажности насыщенного пара при разных давлениях

Уточнённый расчет значений $W''_{кр}$ в зависимости от ω_1 позволил определить предельную пропускную способность сепараторов, устанавливаемых на паропроводы диаметром Ду 32 – Ду 200 для разных давлений пара с учетом, что предельная максимальная скорость в сепараторах будет не выше $0,8 \cdot W''_{кр}$. На рисунках 6–7 представлены результаты расчета пропускной способности сепараторов для паропроводов диаметром Ду 50 и Ду 80. Аналогичные расчеты пропускной способности сепараторов были выполнены для всех остальных паропроводов.

Основным показателем эффективности очистки пара в любом паросепарационном устройстве является влажность пара после сепаратора ω_2 . Для её расчета была использована зависимость для вертикального жалюзийного сепаратора, с нашим профилем пластин жалюзи, полученная на экспериментальном стенде КГТУ и проверенная в ходе производственных испытаний на избыточных давлениях для сепаратора Ду 50 [2, 5]:

$$\omega_2 = 0,445 \cdot (W_o'')^{-0,34} \cdot (W_c'')^{-0,5} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,22}, \% \quad (3)$$

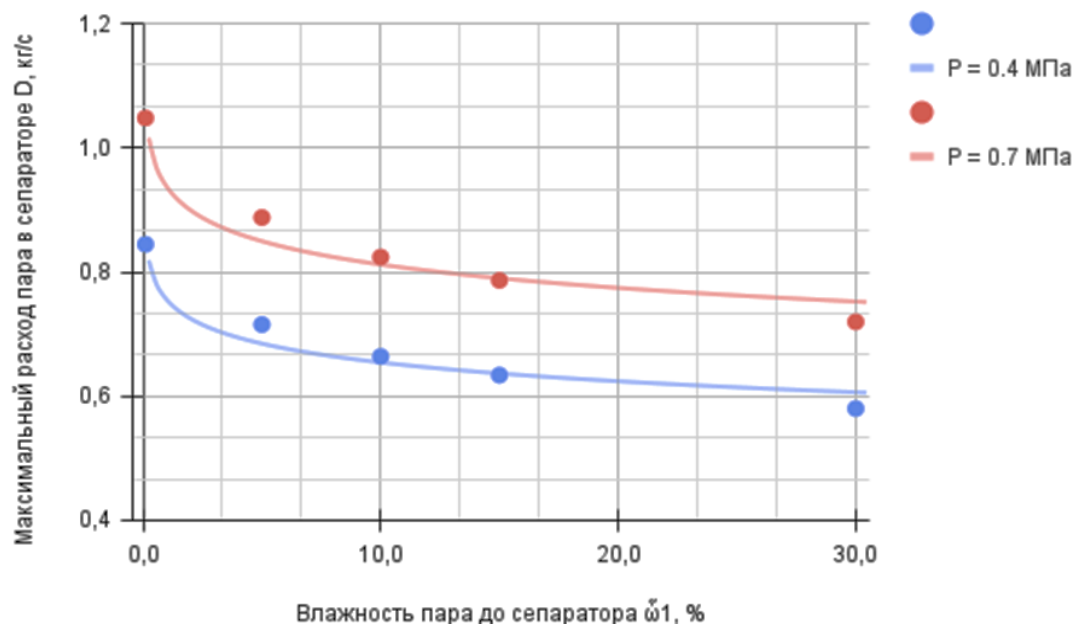


Рисунок 6 – Зависимость максимального расхода пара через сепаратор от начальной влажности пара перед сепаратором Ду 50

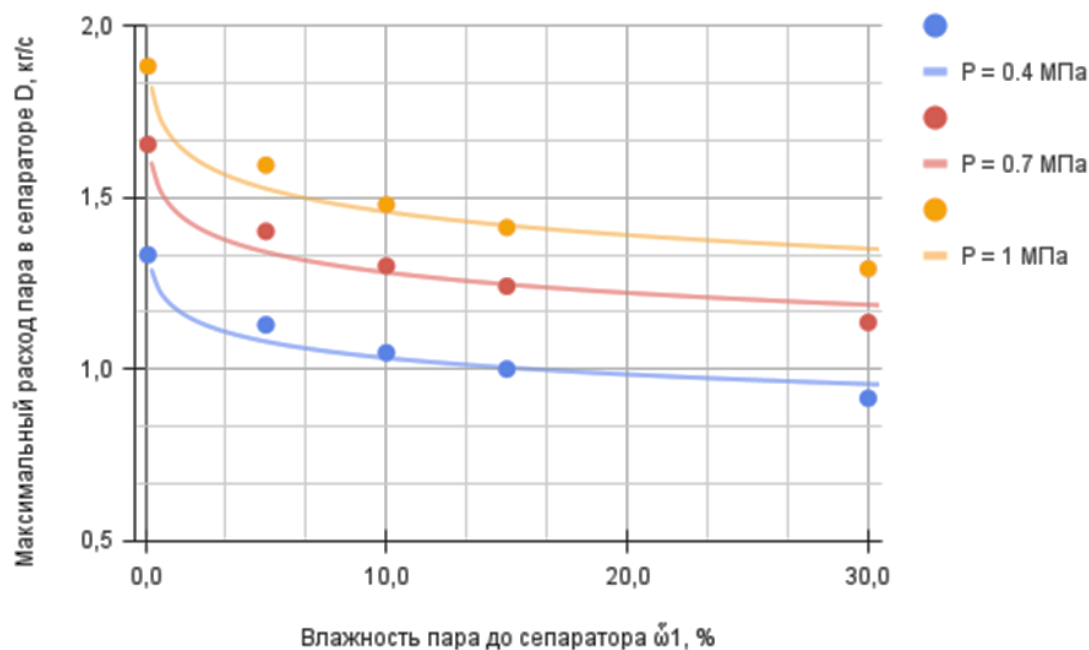


Рисунок 7 – Зависимость максимального расхода пара через сепаратор от начальной влажности пара перед сепаратором Ду 80

Расчет значений ω_2 производился для паровых котлов среднего давления типа ДКВР, ДЕ и Е, наиболее часто устанавливаемых в производственных котельных и на РТС

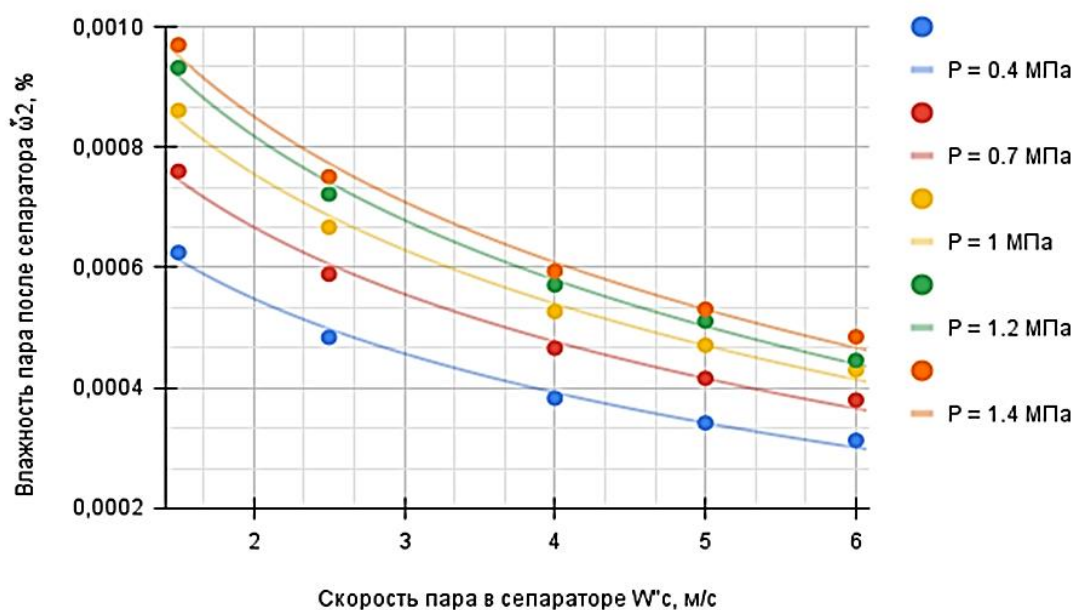


Рисунок 8 – Зависимость влажности пара после сепаратора от скорости пара в сепараторе для котлов типа ДКВР 20/13 при $W_o = 0,35$ м/с

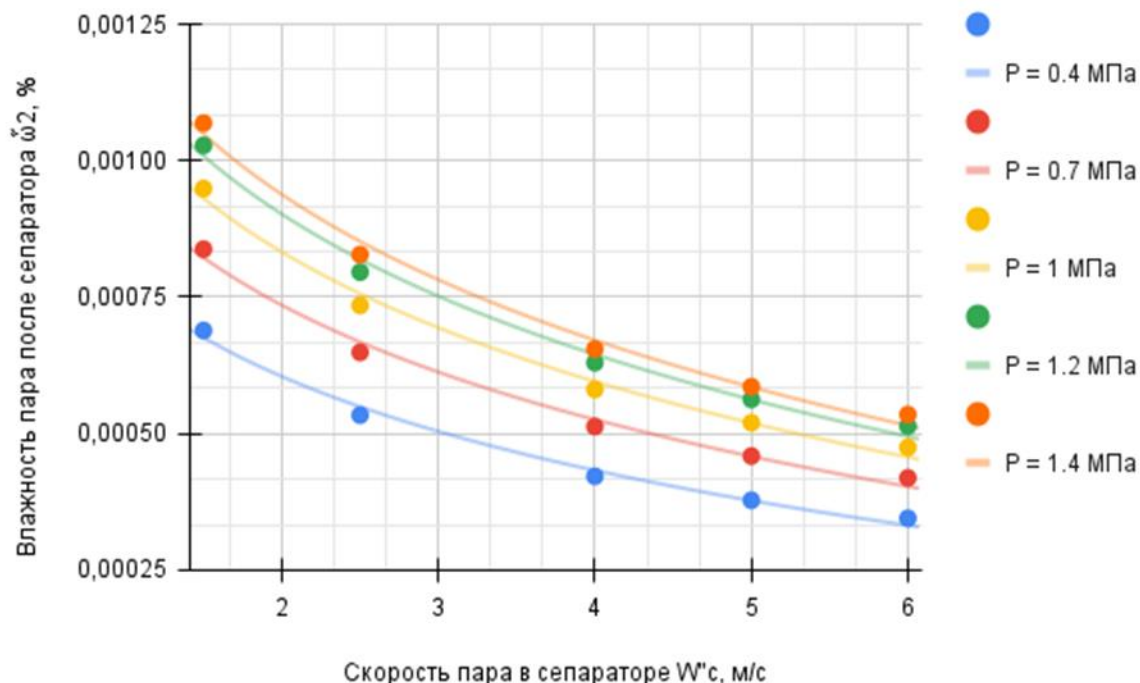


Рисунок 9 – Зависимость влажности пара после сепаратора от скорости пара в сепараторе для котлов типа ДЕ 25/14 при $Wo = 0,26$ м/с

На рисунках 8–9 показаны примеры результатов расчетов значений ω_2 , выполненные для паровых котлов типа ДКВр 20/13 и ДЕ-25-14, работающих на номинальных нагрузках. Из рисунков видно, что значения ω_2 после рассматриваемого жалюзийного сепаратора оказываются значительно ниже, чем для предлагаемых фирмами серийного, циклонного сепаратора модели DC7 [6].

Выводы

1. Произведён конструктивный расчет выносного жалюзийного сепаратора насыщенного пара для производственных и отопительных котельных при давлениях пара в паропроводе 0,4–1,4 МПа, для расходов пара 0,5–25 т/ч.
2. Определены максимально допустимые расходы пара через сепаратор при разной влажности пара в паропроводе.
3. Рассчитана влажность пара после сепаратора, позволяющая определить концентрацию вредных примесей в паре после сепаратора.

4. Результаты исследования могут быть использованы в производственных и отопительных котельных при необходимости установки выносного сепаратора насыщенного пара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селин, В. В. Теплотехника: учебник для ВУЗов / В. В. Селин. – Калининград, 2001. – 383 с.

2. Филонов, А. Г. Влияние режимных и конструктивных параметров сепараторов судовых опреснителей на эффективность процессов тонкой очистки пара: автореф. дисс... канд. техн. наук / Филонов А.Г. – Калининград, 2000. – 22 с.

3. Łukasz Makowski, Jakub Łaskowski, Mariusz Tyranski Influence of Modification of the Geometry of the Wave-Plate Mist Eliminators on the Droplet Removal Efficiency – CFD Modelling // Processes. – 2021. – V. 1499. – № 9. – 30 p. [Электрон. дан.]. – URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091499>. (Дата обращения: 14.12.2025).

4. Голубева, С. И. Факторы, определяющие условия реализации сепарационного процесса в инерционных жалюзийных сепараторах / С. И. Голубева, О. С Власова, Л. И. Хорзова // Инженерный вестник Дона: Электронный научный журнал. – 2021. – № 5 [Электрон. дан.] – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6990> (Дата обращения: 14.12.2025).

5. Архипов, М. И. Исследование эффективности вертикальных сепараторов пара судовых дистилляционных опреснителей / М. И Архипов, А. Г. Филонов // Морские интеллектуальные технологии. – Калининград, 2017. – Т.1. – № 3(37). – С. 74–79.

6. Циклонный сепаратор модели DC7 TLV из нержавеющей стали [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.steamsys.ru/upload/iblock/925/925111e4b08881d47a5938006a950457.pdf> (дата обращения: 26.01.2026).

A THEORETICAL STUDY OF SATURATED STEAM SEPARATOR EFFICIENCY FOR INDUSTRIAL AND HEATING BOILER ROOMS

N. I. Shevchenko, A. G. Filonov

The article presents results of theoretical study on louvered separator efficiency for wet saturated steam for industrial and heating boilers. The separator is installed on a horizontal section of steam pipelines with diameters of DN32–DN200. The following parameters were calculated for different separator operating modes: throughput, steam moisture content after separator, separator efficiency, and hydraulic resistance. The efficiency of vertical louvered separator is compared with standard cyclone separator.

В статье приводятся результаты теоретического исследования эффективности жалюзийного сепаратора влажного насыщенного пара для производственных и отопительных котельных. Сепаратор устанавливается на горизонтальном участке паропроводов диаметром Ду32–Ду200. Для разных режимов работы сепараторов рассчитаны: пропускная способность, влажность пара после сепаратора, КПД сепаратора, его гидравлическое сопротивление. Проведено сравнение эффективности вертикального жалюзийного сепаратора с серийным циклонным сепаратором.

УДК 621.644.8

ГРНТИ 73.39.31

ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧЕК И НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ ВРЕЗОК В ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ НПС-ЛИНЕЙНАЯ ЧАСТЬ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

И. Р. Ризванов¹, М. А. Пейсахович²

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, Россия;
ilnaz.rizvanov@klgtu.ru

²ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина», 119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, Россия; maks260803@gmail.com

*магистральный нефтепровод, НПС, гидравлическая система, утечка, несанкционированная
врезка*

Магистральный нефтепровод является стратегически важным элементом нефтяной отрасли, обеспечивающий надежную и бесперебойную доставку углеводородного сырья [1, 2]. Ключевым элементом магистрального нефтепровода является нефтеперекачивающая станция (НПС), которая выполняет функцию по созданию напора в начале участка магистрального нефтепровода. Конструктивно НПС представляет собой сложный технологический комплекс, включающий насосное оборудование, узел фильтров, технологические трубопроводы, системы управления и автоматики [3].

Сложность гидравлических процессов и высокая интенсивность эксплуатации обуславливают уязвимость таких объектов перед возникновением утечек и

несанкционированных врезок (УНВ). Последствия аварийных ситуаций могут носить катастрофический характер: значительные потери нефти, загрязнение почвы и водных ресурсов, репутационные и финансовые риски для нефтетранспортных компаний [4, 5].

Целью данной работы является анализ существующих методов обнаружения утечек и несанкционированных врезок и определение ими областей эксплуатации магистрального нефтепровода. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: рассмотреть классификацию методов диагностики, оценить их эффективность для линейной части и гидравлической системы НПС-ЛЧ, а также выявить перспективные направления развития систем мониторинга.

Современные методы обнаружения утечек и несанкционированных врезок можно разделить на две основные группы: параметрические и волновые [6, 7].

Параметрические методы составляют основу большинства современных систем обнаружения утечек (СОУ), поскольку они используют уже существующее контрольно-измерительное оборудование без необходимости установки дополнительных датчиков. Эти методы основаны на анализе изменений технологических параметров трубопровода – давления, расхода, температуры и плотности транспортируемого продукта.

Метод линейного баланса основан на постоянстве мгновенного и интегрального значений объемов перекачиваемой жидкости в начале и конце участка трубопровода при отсутствии утечек и установившемся режиме перекачки.

В начале каждого участка нефтепровода устанавливаются датчики измерения количества перекачиваемого продукта. Информация от датчиков непрерывно поступает на компьютер центрального диспетчерского пункта, где через определенный интервалы времени (15–30 с) проводится сравнение объемов нефти на концах участка нефтепровода, что позволяет сделать вывод о его герметичности. Если

разница объемов в начальном и конечном сечении участка трубопровода превысит установленное программой значения, то следует вывод о появлении утечек.

Метод гидравлической локации базируется на анализе гидравлических характеристик участка нефтепровода и основан на измерении гидравлических уклонов в конечных сечениях участка магистрального нефтепровода, находящихся вблизи нефтеперекачивающих станций. По изменению гидравлических уклонов на этих сегментах определяется место и интенсивность утечек [8].

Волновые методы обнаружения основаны на анализе распространения волн давления в трубопроводе при возникновении утечек. Эти методы обеспечивают высокую оперативность обнаружения и точность локализации, что делает их особенно эффективным для обнаружения несанкционированных врезок [7, 9].

Метод отрицательных ударных волн является одним из наиболее оперативных методов обнаружения утечек. При возникновении утечки в трубопроводе образуется волна разрежения (падения давления), которая распространяется со скоростью звука в данной среде в направлении концов участка [10].

В соответствии с [11, 12] для создания СОУ необходимо использовать два и более методов обнаружения утечек, одним из которых должен быть параметрический метод, обеспечивающий непрерывный контроль технологических параметров. Для реализации комбинированного подхода, в частности, метода гидравлической локации и волновых методов, необходим корректный ввод исходных данных, описывающий текущее состояние трубопровода. С этой целью на начальном этапе разработки программного комплекса был создан модуль ввода данных, интерфейс которого представлен на рисунке 1.

Следующим этапом разработки станет интеграция модуля ввода данных с расчетным ядром, где на базе метода гидравлической локации будет реализован комбинированный алгоритм, обеспечивающий комплексный контроль гидравлической системы НПС-ЛЧ.

Ввод параметров системы

Ввод параметров | Просмотр данных

Физические параметры

p:

v1:

v2:

T1:

Tк:

К упр:

Технологические параметры

Q:

Tн:

a:

b:

Последовательность насосов

Введите последовательность насосов через запятую или каждый с новой строки

Постоянные параметры

D:

λ (лямбда):

δ (дельта):

Сохранить | Очистить

Рисунок 1 – Форма ввода параметров системы

Проведенное исследование продемонстрировало перспективность применения комбинированного подхода к решению проблемы обнаружения утечек и несанкционированных врезок в гидравлической системе НПС и линейной части магистральных нефтепроводов. Рассмотрены параметрические и волновые методы, выявлены их достоинства и недостатки применительно к различным условиям эксплуатации.

Дальнейшее развитие системы предполагает создание комбинированного алгоритма на основе метода гидравлической локации и волновых методов, что позволит обеспечить комплексный контроль и повысить надежность диагностики как линейной части, так и в целом гидравлической системы НПС-ЛЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бедоева, С. В. Снижение потерь нефтепродуктов при транспортировании, хранении и использовании / С. В. Бедоева, Ш. М. Минатуллаев, А. М. Джанаев // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XVI международной научно-практической конференции, Оренбург, 11–13 ноября 2021 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Оренбургский государственный университет, Международная ассоциация автомобильного и дорожного образования, Уральское межрегиональное отделение Российской академии транспорта. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 86–94.
2. Shestakov, R. A. Research of distribution of oil flow in the pipeline with looping / R. A. Shestakov // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 25 сентября – 04 2020 года. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52035. – DOI 10.1088/1742-6596/1679/5/052035.
3. Эксплуатация объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: в 2 т. / Ю. Д. Земенков, Р. Р. Исламов, Я. М. Курбанов [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – 313 с.
4. Матвеева, Ю. С. Утечки нефти при трубопроводном транспорте как экологическая проблема глобального масштаба / Ю. С. Матвеева, Д. Н. Комаров, Р. А. Шестаков // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29, № 11. – С. 65–71. – DOI 10.18412/1816-0395-2025-11-65-71.
5. Фетисов, В. Г. Прогнозирование потерь нефти вследствие аварии в разветвленных нефтепроводах / В. Г. Фетисов, А. К. Николаев, Ю. В. Лыков // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2016. – № 11–12(59–60). – С. 33–40.

6. Матвеева, Ю. С. К вопросу о параметрических методах контроля герметичности магистральных нефтепроводов / Ю. С. Матвеева, С. В. Дейнеко // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию В.Л. Березина, Москва, 19–20 октября 2023 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2023. – С. 394.

7. Barakov, V. V. Investigation of non-stationary processes in an oil pipeline in the event of a leak or criminal tie-in / V. V. Barakov, R. A. Shestakov, I. M. Vanchugov // AIP Conference Proceedings : 2, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 040002. – DOI 10.1063/5.0092581.

8. Дульченко, А. А. Методика определения местоположения утечек и не-санкционированных врезок на нефтепроводах / А. А. Дульченко, Р. А. Шестаков, Ю. С. Матвеева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 6. – С. 26-36. – DOI 10.18799/24131830/2024/6/4325.

9. Желтов, И. С. Методы определения утечек на нефтепродуктопроводах / И. С. Желтов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам десятой международной научной конференции, Казань, 30 ноября 2019 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2019. – Ч. 1. – С. 225–227.

10. Шубочкин, Т. Е. Умные технологии НК. Единство теории и практики: сборник трудов XXIII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 23–25 октября 2023 года. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2023. – С. 43–46.

11. Алмакаев, И. А. Определение предпочтительного метода обнаружения утечек методом анализа иерархий / И. А. Алмакаев // Молодежный вестник УГАТУ. – 2020. – № 1(22). – С. 6–9.

12. ОТТ-13.320.00-КТН-288-19. Магистральные трубопроводы. Системы обнаружения утечек. Общие технические требования. – 2019. – Москва: ПАО «Транснефть», 2019. – 85 с.

13. РД-13.320.00-КТН-223-09. Системы обнаружения утечек комбинированного типа на магистральных нефтепроводах. Общее техническое задание на проектирование, изготовление и ввод в эксплуатацию / ОАО «АК «Транснефть». – Москва: ОАО «АК «Транснефть», 2009. – 98 с.

DETECTION OF LEAKS AND UNAUTHORIZED TAPPING IN THE HYDRAULIC SYSTEM OF THE OPS OF THE LINEAR PART OF THE TRUNK OIL PIPELINE

I. R. Rizvanov, M. A. Peisakhovich

Detection of leaks and unauthorized tie-ins is one of the key problems that arise during the operation of main oil pipelines. The consequences of emergency situations can be catastrophic: significant losses of oil, contamination of soil and water resources, reputational and financial risks for oil transportation companies. This paper analyzes modern methods for detecting leaks in the pipeline, which will identify advantages, disadvantages and identify areas for improvement. The comprehensive application of modern leak detection methods, in particular, the development of a combined algorithm, not only increases reliability, but also contributes to improving the reliability and safety of pipeline systems. This approach is especially important in the context of the growing requirements for uninterrupted transportation of hydrocarbons.

Обнаружение утечек и несанкционированных врезок является одной из ключевой проблемой, возникающих в процессе эксплуатации магистральных нефтепроводов. Последствия аварийных ситуаций могут носить катастрофический характер: значительные потери нефти, загрязнения почвы и водных ресурсов, репутационные и финансовые риски для нефтетранспортных компаний.

В данной работе анализируются современные методы обнаружения утечек в трубопроводе. Данный анализ позволит выявить преимущества, недостатки и определить направления для совершенствования.

Комплексное применение современных методов обнаружения утечек, в частности разработка комбинированного алгоритма, не только повышает достоверность, но и способствует повышению надежности и безопасности трубопроводных систем. Такой подход особенно важен в условиях растущих требований к бесперебойности транспортировки углеводородов.

УДК 621.311

ГРНТИ 44.29.33

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНЯТИЮ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ВЫДАЧУ МОЩНОСТИ КАСКАДА ВЫГСКИХ ГЭС

В. М. Нилова, А. С. Макаров, Д. Е. Петрушин

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»,
185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Россия
e-mail: rectorat@petrsu.ru.

пропускная способность, автоматика ограничения перегрузки оборудования, экономический эффект, потери энергии, затраты, сроки окупаемости

Каскад Выгских ГЭС (КВГЭС), образованный в 1956 году, является одним из ключевых элементов энергосистемы Республики Карелия. Он объединяет пять гидроэлектростанций: Ондскую (80 МВт), Палакоргскую (30 МВт), Маткожненскую (63 МВт), Выгостровскую (40 МВт) и Беломорскую (24,6 МВт), суммарной установленной мощностью около 240 МВт [1]. Гидроэлектростанции каскада играют важнейшую роль в покрытии переменной части графика электрических нагрузок, обеспечении системной надежности и регулировании частоты в энергосистеме.

В настоящее время эффективность использования генерирующего потенциала КВГЭС существенно снижена из-за наличия системных ограничений на выдачу мощности. Данные ограничения обусловлены комплексом режимных и

технических факторов, связанных с пропускной способностью элементов электрической сети, параметрами коммутационного оборудования и отсутствием современных средств противоаварийной автоматики [2].

Основным элементом, ограничивающим выдачу мощности, является ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115), входящая в состав контролируемого сечения. Анализ существующего положения показывает, что токовая нагрузка данной линии в послеаварийных режимах может превышать аварийнодопустимые значения, что требует введения ограничений на генерацию электростанций каскада.

Согласно выполненным расчетам, за период с 2020 по 2024 год суммарные потери электроэнергии, обусловленные вынужденными холостыми сбросами воды из-за указанных ограничений, достигли 153,251 млн кВт·ч. В денежном выражении упущенная выгода превысила 218 млн руб. (таблица 1). Наибольшие потери зафиксированы в 2020 и 2024 годах, что связано с повышенной водностью и, соответственно, ростом неиспользуемого гидропотенциала.

Таблица 1 – Потери электроэнергии при холостом водосбросе за 2020–2024 годы, млн кВтч

Год	Беломорская ГЭС (ГЭС-6)	Выгостровская ГЭС (ГЭС-5)	Маткожненская ГЭС (ГЭС-3)	Палакоргская ГЭС (ГЭС-7)	КВГЭС	Упущен- ная вы- года (млн руб.)
2020	0,132	21,156	18,237	20,197	59,722	76,140
2021	1,281	3,343	0,000	2,172	6,795	8,860
2022	0,764	0,007	1,292	1,129	3,192	4,556
2023	0,663	0,000	0,000	0,016	0,679	1,081
2024	10,642	18,873	40,394	12,954	82,863	128,039
Итого	13,481	43,379	59,923	36,468	153,251	218,677

Технический анализ существующего оборудования ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115) выявил следующие проблемные элементы:

- выключатели типа МКП-110Б-1000/630 и МКП-110М-1000/630-20 с номинальным током 630 А;
- трансформаторы тока ТВ-110/20 с номинальным током 600 А;
- провод марки АС-150/24 с длительно допустимым током 498 А при температуре 25 °С;
- высокочастотные заградители ВЗ-600-0,25 с номинальным током 600 А.

Кроме того, отсутствие каналов связи для передачи команд противоаварийной автоматики между ПС 110 кВ Беломорск и гидроэлектростанциями каскада делает невозможным автоматическое отключение генераторов при возникновении аварийных перегрузок [3].

Для решения проблемы снятия ограничений на выдачу мощности КВГЭС были разработаны и исследованы три принципиально различных варианта технических решений.

Вариант 1. Полная реконструкция ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115)

Данный вариант предусматривает комплексную замену основного оборудования линии:

- установка элегазовых выключателей ВГТ-110 с номинальным током 2000 А;
- замена трансформаторов тока на ТОГФ-110 (УХЛ1) с номинальным первичным током 1000 А;
- замена провода с АС-150/24 на АС-240/32, имеющий большее сечение и меньшие потери;
- установка высокочастотных заградителей ВЗ-1250-0,25.

Расчеты, выполненные в программно-вычислительном комплексе RastrWin3, показывают, что реализация данного варианта обеспечивает полное снятие ограничений на выдачу мощности для всех рассматриваемых режимных

условий. Максимально допустимый переток в контролируемом сечении увеличивается до 155 МВт, что превышает избыточную мощность энергорайона во всех характерных режимах. Капитальные затраты на реализацию варианта составляют 240,2 млн руб.

Вариант 2. Частичная реконструкция с заменой выключателей и трансформаторов тока

Данный вариант ограничивается заменой только выключателей и трансформаторов тока на указанные выше типы без изменения провода и высокочастотных заградителей. Такой подход требует меньших капитальных вложений (29,4 млн руб.) и может быть реализован в более короткие сроки.

Однако расчеты показывают, что частичная реконструкция не позволяет полностью устранить существующие ограничения. Для нормальной схемы сети в пяти из девяти рассчитанных режимных условий значение максимально допустимого перетока остается ниже уровня избыточной мощности на величину до 28 МВт. Таким образом, балансы мощности продолжают складываться с избытком, и проблема недоиспользования генерирующего потенциала сохраняется.

Вариант 3. Модернизация автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО)

Третий вариант представляет собой принципиально иной подход, не связанный с изменением физических параметров линии. Он предполагает организацию управляющих воздействий от существующего устройства АОПО ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115) на отключение генераторов Выгостровской и Маткожненской ГЭС [4].

Для реализации данного решения требуется:

- установка на ПС 110 кВ Беломорск шкафа с двумя передатчиками УПАСК типа ШЭ-200-АКА ТхТх-16 ВОЛС;
- установка на Выгостровской и Маткожненской ГЭС шкафов с приемниками ШЭ-200-АКА Rx-16 ВОЛС;
- прокладка волоконно-оптических линий связи для обеспечения надежной передачи команд.

Преимуществами волоконно-оптических линий связи являются высокая скорость передачи данных, невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокий уровень безопасности и низкие эксплуатационные расходы [5].

Расчеты показывают, что модернизация АОПО с объемом управляющих воздействий на отключение генераторов 62 МВт обеспечивает полное снятие ограничений для нормальной схемы сети и для большинства ремонтных схем. Максимально допустимый переток увеличивается до 171 МВт, что значительно превышает избыточную мощность энергорайона во всех рассмотренных режимах.

Технико-экономическое сравнение разработанных вариантов выполнено по методике приведенных затрат с использованием укрупненных нормативов цен, утвержденных Минэнерго России [6]. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технико-экономические показатели вариантов реализации проекта

Вариант	Капитальные затраты (млн руб.)	Годовые эксплуатационные затраты (млн руб.)	Экономический эффект (млн руб./год)	Срок окупаемости (месяц)
Полная реконструкция ВЛ 110 кВ	240,2	17,1	56,8	51
Частичная реконструкция (замена В и ТТ)	29,4	14,4	30,4	12
Модернизация АОПО	24	15,6	56,8	5

Анализ приведенных данных показывает, что варианты 1 и 3 обеспечивают сопоставимый экономический эффект – увеличение годовой выручки от реализации электроэнергии на 56,8 млн руб. Однако капитальные затраты по варианту модернизации АОПО почти в 10 раз ниже, чем по варианту полной реконструкции, что обеспечивает минимальный срок окупаемости – всего 5 месяцев.

Вариант частичной реконструкции, несмотря на умеренные капитальные затраты, характеризуется существенно меньшим экономическим эффектом (30,4 млн руб./год), поскольку не решает проблему ограничений в полном объеме.

Дополнительным преимуществом варианта модернизации АОПО является возможность его поэтапной реализации без длительного вывода линии из работы, что особенно важно для обеспечения надежности электроснабжения потребителей.

При реализации проекта должны быть выполнены требования охраны труда и промышленной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами [7, 8]. Строительно-монтажные работы должны осуществляться специализированной организацией с обязательным оформлением нарядов-допусков и назначением ответственных лиц. Особое внимание следует уделить безопасному производству работ вблизи действующего электрооборудования, находящегося под напряжением.

С экологической точки зрения реализация проекта не оказывает негативного воздействия на окружающую среду. Напротив, более полное использование гидроэнергетического потенциала позволяет заместить выработку на тепловых электростанциях, что способствует снижению выбросов парниковых газов.

Таким образом, на основании проведенного технико-экономического анализа оптимальным решением признана модернизация АОПО ВЛ 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115) с организацией управляющих воздействий на отключение генераторов. Данный вариант обеспечивает:

- полное снятие существующих ограничений на выдачу мощности КВГЭС;

- минимальные капитальные вложения (24,0 млн руб.);
- быструю окупаемость инвестиций (5 месяцев);
- значительный годовой экономический эффект (56,8 млн руб.);
- повышение надежности работы энергосистемы Республики Карелия.

Реализация предложенных мероприятий позволит существенно повысить эффективность использования возобновляемых гидроэнергетических ресурсов региона, увеличить доходность генерирующих компаний и создать условия для устойчивого развития электроэнергетики Карелии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каскад Выгских ГЭС // ПАО «ТГК-1» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tgc1.ru/production/complex/karelia-branch/vyg-cascade/> (дата обращения: 15.03.2026).
2. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 г. № 937 «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации». – 101 с.
3. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13.07.2020 г. № 556 «Об утверждении Правил создания (модернизации) комплексов и устройств релейной защиты и автоматики в энергосистеме...». – 35 с.
4. ГОСТ Р 59384-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования: национальный

стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 04.03.2021 г. № 117-ст: введен впервые: дата введения 2021-04-01. – 26 с.

5. СТО 59012820.27.100.001-2024. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Правила определения логики действия и настройки устройств автоматики ограничения перегрузки оборудования: утв. приказом АО «СО ЕЭС» от 12.01.2024 № 4. – 46 с.

6. Приказ Минэнерго России № 131 от 26.02.2024 г. «Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства». – 278 с.

7. Приказ Минтруда России от 15.12.2020 г. № 903н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок». – 59 с.

8. Приказ Минтруда России от 11.12.2020 г. № 883н «Об утверждении Правил по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте». – 53 с.

DEVELOPMENT OF MEASURES TO REMOVE RESTRICTIONS ON POWER OUTPUT OF THE VYG RIVER HYDROELECTRIC CASCADE

V. M. Nilova, A. S. Makarov, D. E. Petrushin

The article addresses the issues of enhancing the efficiency of utilizing the generating capacity of the Vyg River Hydroelectric Cascade (VHC) by eliminating existing restrictions on power output. An analysis of operational and technical constraints is conducted, related to the transmission capacity of the 110 kV Kem–Belomorsk transmission line (L-115), the parameters of switching equipment, and the absence of modern emergency automation channels. It is shown that for the period from 2020 to 2024, the lost profit from forced idle water discharges exceeded 218 million rubles. Three solution options are proposed and examined: full reconstruction of the 110 kV overhead line, partial reconstruction (replacement of circuit breakers and current transformers), as well as modernization of the equipment overload protection automation (AOPO) with the implementation of control actions for generator disconnection. For each option, a technical and economic analysis is performed, including calculations of capital and operational costs, as well as the potential economic effect. Based on the study results, a conclusion is drawn regarding the feasibility of AOPO modernization as the most effective and fast-paying solution (payback period of 5 months), ensuring the complete removal of restrictions and improving the reliability of power supply to the region.

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности использования генерирующего потенциала Каскада Выгских ГЭС (КВГЭС) за счёт снятия существующих ограничений на выдачу мощности. Проведён анализ режимных и технических ограничений, связанных с пропускной способностью линии электропередачи 110 кВ Кемь-Беломорск (Л-115), параметрами коммутационного оборудования и отсутствием современных каналов противоаварийной автоматики. Показано, что за период с 2020 по 2024 год упущенная выгода от вынужденных холостых сбросов воды превысила 218 млн руб. Предложены и проанализированы три варианта решения задачи: полная реконструкция ВЛ 110 кВ, частичная реконструкция (замена выключателей и трансформаторов тока), а также модернизация автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО) с организацией управляющих воздействий на отключение генераторов. Для каждого варианта выполнен технико-экономический анализ, рассчитаны капитальные и эксплуатационные затраты, а также потенциальный экономический эффект. По результатам исследования сделан вывод о целесообразности модернизации АОПО как наиболее эффективного и быстроокупаемого решения (срок окупаемости 5 месяцев), обеспечивающего полное снятие ограничений и повышение надёжности электроснабжения региона.

УДК 621.311.212

ГРНТИ 44.35.29

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОПОТЕНЦИАЛА
РЕКИ ГУРЬЕВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧЕБНО-ОПЫТНОГО
ХОЗЯЙСТВА ФГБОУ ВО «КГТУ»

Д. А. Евдокимов

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, Россия; dobroeutro04@mail.ru

микрoгенерация, микроГЭС, распределенная энергетика, возобновляемые источники энергии, гидропотенциал

Трансформация электроэнергетики сопровождается переходом от исключительно централизованной модели энергоснабжения к более гибким формам распределённой генерации. Одним из наиболее заметных проявлений этого процесса выступает микрогенерация, под которой в российском праве понимается специальный режим производства электрической энергии потребителем для покрытия собственных бытовых и (или) производственных нужд с возможностью выдачи излишков в сеть в установленных законом пределах. Обязательным признаком объекта микрогенерации является ограничение установленной мощности – не более 15 кВт [1]. Такая модель меняет традиционную роль потребителя, превращая его в субъекта, способного одновременно потреблять и производить электроэнергию.

Актуальность темы обусловлена несколькими причинами. Во-первых, микрогенерация помогает сделать энергоснабжение более надёжным, уменьшить потери электроэнергии в сетях и развивать местную энергетическую инфраструктуру. Во-вторых, на фоне растущего интереса к распределённой энергетике особенно важны решения, которые могут стабильно обеспечивать электроэнергией удалённые, труднодоступные и слабо подключённые к сетям территории. Также развитие микрогенерации соответствует целям Федерального закона (ФЗ) № 261-ФЗ, направленного на энергосбережение, повышение энергетической эффективности, снижение потерь электроэнергии и расширение использования возобновляемых источников энергии [2].

В этом контексте особого внимания заслуживает микрогенерация на базе гидроэлектростанций (рисунок 1). В отличие от наиболее распространённых солнечных установок, микроГЭС потенциально способны обеспечивать более ровный профиль генерации и использовать природный ресурс, который в ряде регионов России обладает устойчивой локальной доступностью.

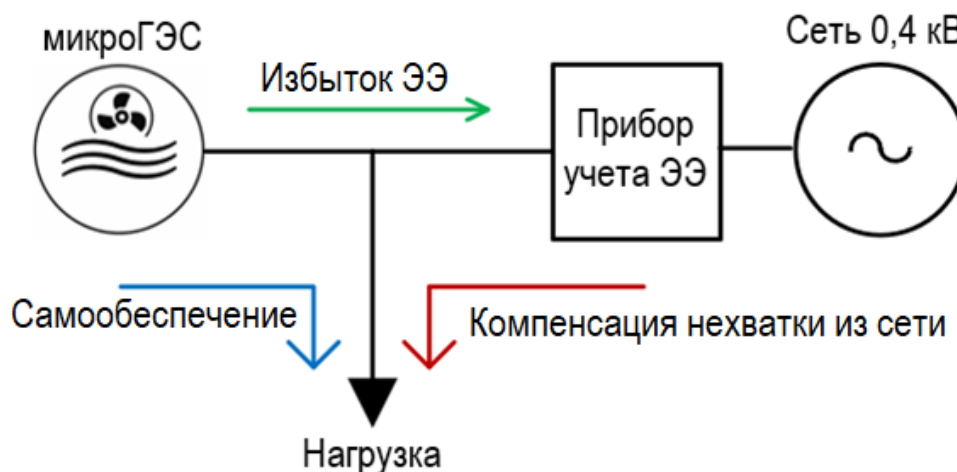


Рисунок 1 – Принцип действия объекта микрогенерации на базе микроГЭС

Малая гидроэнергетика связана с использованием энергии водных ресурсов и гидравлических систем при помощи гидроэнергетических установок малой

мощности. К источникам ресурсов малой энергетики относят естественные и искусственные водотоки, водохранилища, озера и пруды, водохозяйственные или гидравлические системы разного назначения, а также другие малые водные потоки, потенциал которых может быть использован для получения электрической энергии при помощи установок малой мощности [3].

МикроГЭС предназначена для преобразования гидравлической энергии потока жидкости в электрическую для дальнейшей передачи сгенерированной электроэнергии в энергосистему. Принцип работы микроГЭС не отличается от станций большой мощности. Вода под действием напора, создаваемого своей массой, перемещается в заданном направлении и поступает на лопасти гидравлической турбины. Турбина передает свое вращательное движение на генератор. Напор воды создается путем сооружения плотины или естественным течением воды, либо обоими способами одновременно (рисунок 2) [4].

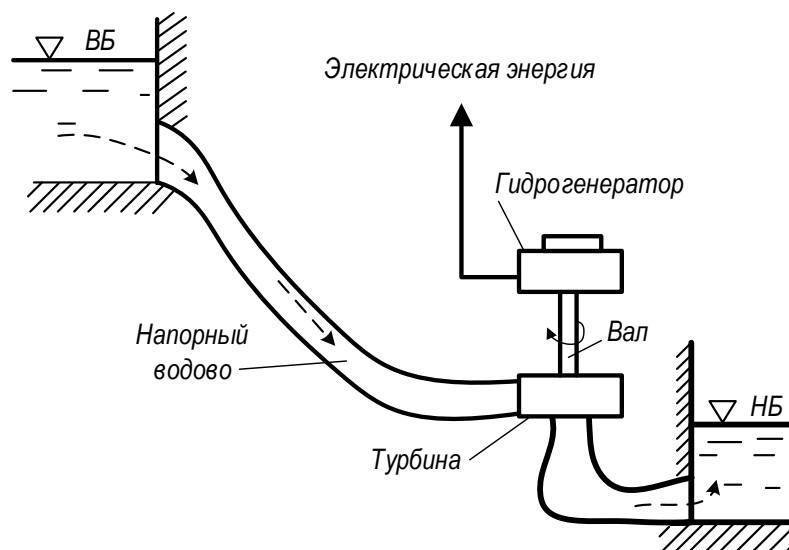


Рисунок 2 – Принципиальная схема ГЭС

Обмен электроэнергией при микрогенерации осуществляется следующим образом (см. рисунок 1): энергия, вырабатываемая объектом микрогенерации, в первую очередь используется для собственных нужд потребителя, а её излишки

передаются в электрическую сеть. При этом сетевая организация обеспечивает технологическое присоединение объекта и физический переток электроэнергии, а гарантирующий поставщик принимает и оплачивает объём электроэнергии, отпущенной в сеть на основании договора купли-продажи.

Учёт такого обмена осуществляется с использованием двустороннего прибора учёта, установленного в месте присоединения объекта к сети. Установкой счетчика занимается энергосбытовая компания (гарантирующий поставщик) [5]. В соответствии с законодательством такой счётчик должен обеспечивать почасовую фиксацию объёмов электроэнергии в обоих направлениях: отдельно энергии, поступившей из сети, и отдельно энергии, переданной в сеть объектом микрогенерации. На основании его показаний определяется объём электроэнергии, потреблённой из сети, а также количество излишков, подлежащих оплате гарантирующим поставщиком [6].

В качестве объекта исследования была выбрана перспективная микроГЭС на базе учебно-опытного хозяйства (УОХ) ФГБОУ ВО «КГТУ», по территории которого протекает р. Гурьевка (рисунок 3). Река Гурьевка является правым притоком р. Преголи и протекает по территории Гурьевского и Полесского районов Калининградской области. Основные параметры р. Гурьевка представлены в таблице 1 и на рисунке 4.



Рисунок 3 – Расположение р. Гурьевка на топографической карте

Таблица 1 – Данные р. Гурьевка

Параметр	Значение
Протяженность, км	26,6
Тип	Равнинная приморская река со смешанным питанием и паводочным режимом
Ширина русла (преобладающая), м	5,5
Глубины, м	0,8–2,8
Уклон реки в верховье, ‰	1,36
Уклон реки в устье, ‰	0,98
Норма годового стока (среднегодовой расход), м³/с	0,85
Качество воды	Умеренно-загрязненная
Рыбохозяйственная категория	2 (водоемы, имеющие значение для сохранения водных биоресурсов)

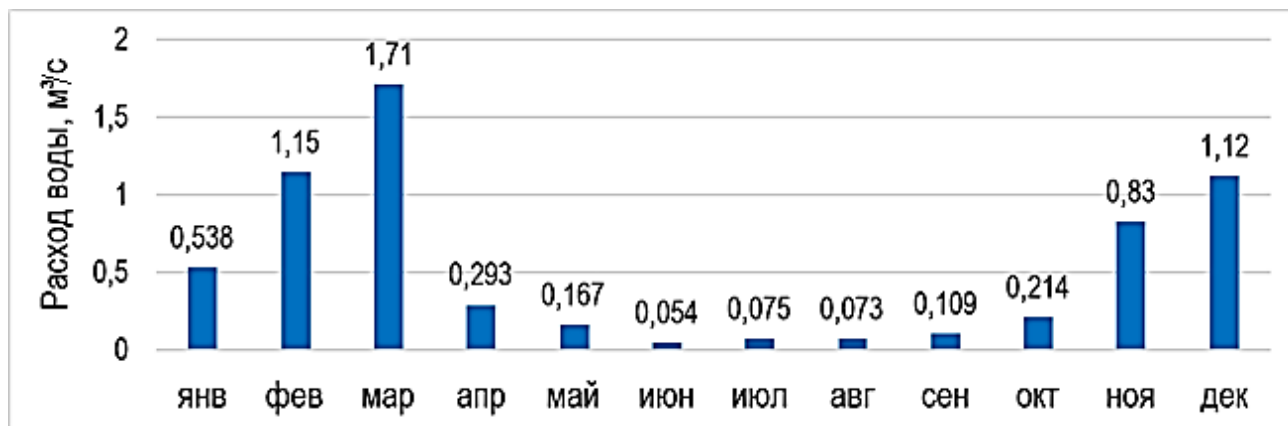


Рисунок 4 – График расхода воды р. Гурьевка в районе расположения УОХ

Учебно-опытное хозяйство (УОХ) Калининградского государственного технического университета (КГТУ) – структурное подразделение университета, которое служит основной базой производственного обучения студентов и ведения научно-исследовательской работы в сфере аквакультуры (рисунок 5). Инфраструктура объекта включает: производственные акватории для рыборазведения; научно-исследовательский лабораторный комплекс; складские помещения для хранения специализированного оборудования и инвентаря.

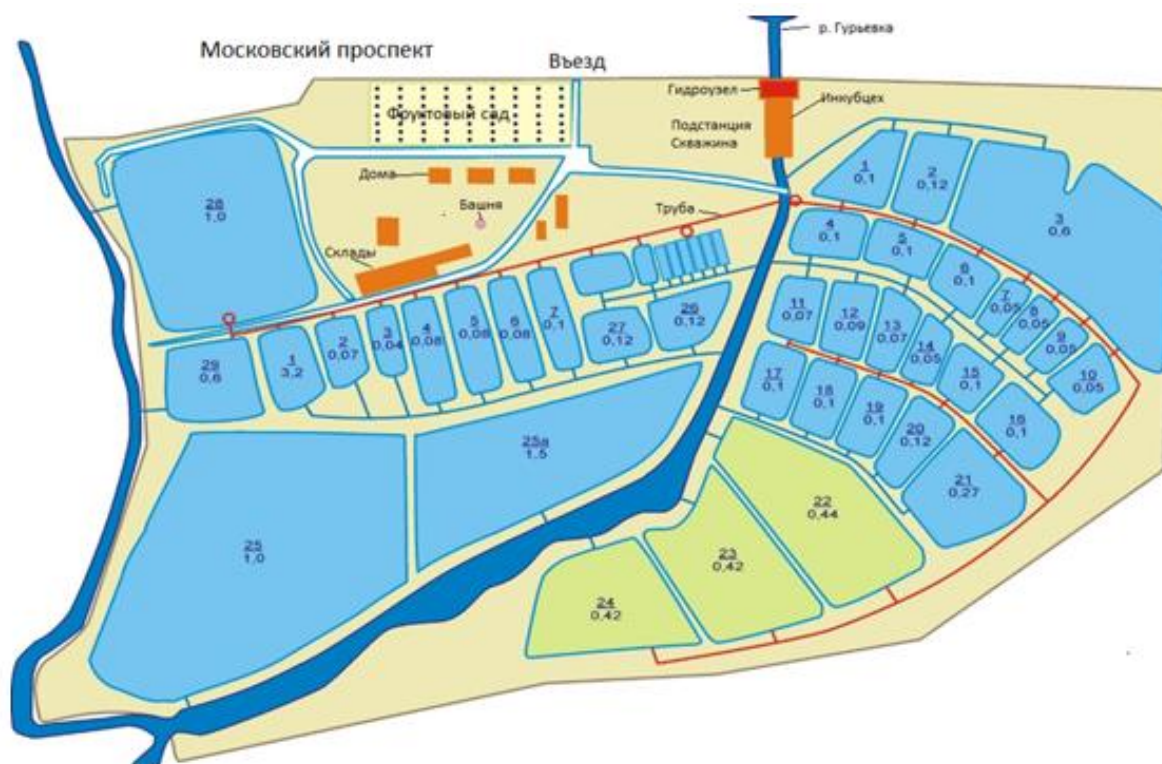


Рисунок 5 – План расположения объектов УОХ на местности

Электрическая мощность, которую можно снять с объекта, обладающего гидропотенциалом, вычисляется по формуле (1) [7]:

$$N_{\text{расч}} = 9,81 \cdot H_p \cdot Q_m \cdot \eta_{\text{эу}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{расч}}$ – расчётная мощность гидрогенератора, кВт; H_p – напор гидротурбины, м (предварительно принимается равным 2 м); Q_m – расход воды, м³/с (рисунок 4); $\eta_{\text{эу}}$ – КПД электроустановки (предварительно принимается равным 90 %).

Следует отметить, что в данной работе расчётная мощность объекта микрогенерации ограничена значением 15 кВт: если фактическая расчётная мощность превышает этот порог, для целей исследования она принимается равной 15 кВт. Результаты анализа данных по энергопотреблению УОХ представлены на рисунке 6 в виде среднемесячного расхода электроэнергии.

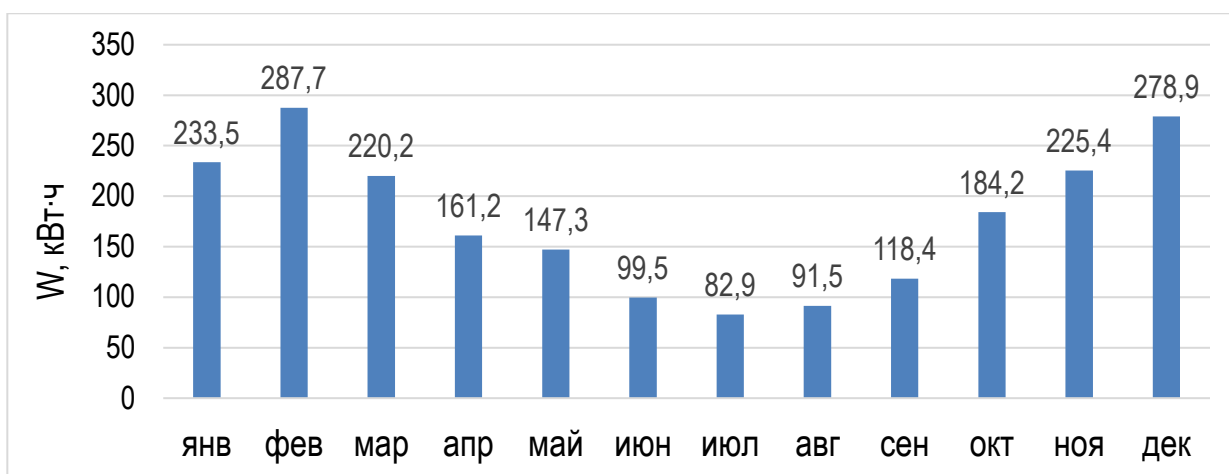


Рисунок 6 – Среднемесячное потребление электроэнергии УОХ

Результаты расчетов энергетических режимов объекта микрогенерации с учетом водного режима р. Гурьевка представлены в таблице 2. Сравнительный анализ среднесуточного производства электроэнергии объектом микрогенерации и потребления электроэнергии УОХ представлены на рисунке 7.

Таблица 2 – Расчет энергетических режимов объекта микрогенерации

Месяц	Расход воды Q_m , м ³ /с	КПД установки $\eta_{\text{эу}}$	Напор гидротурбины H_p , м	Расчетная мощность $N_{\text{расч}}$, кВт	Энергия, производимая гидрогенератором в сутки E , кВт·ч
Янв	0,538	0,9	2	9,50	228,00
Фев	1,15	0,9	2	15,00	360,00
Мар	1,71	0,9	2	15,00	360,00
Апр	0,293	0,9	2	5,17	124,17
Май	0,167	0,9	2	2,95	70,77
Июн	0,054	0,9	2	0,95	22,88
Июл	0,075	0,9	2	1,32	31,78
Авг	0,073	0,9	2	1,29	30,94
Сен	0,109	0,9	2	1,92	46,19
Окт	0,214	0,9	2	3,78	90,69
Нояб	0,83	0,9	2	14,66	351,75
Дек	1,12	0,9	2	15,00	360,00

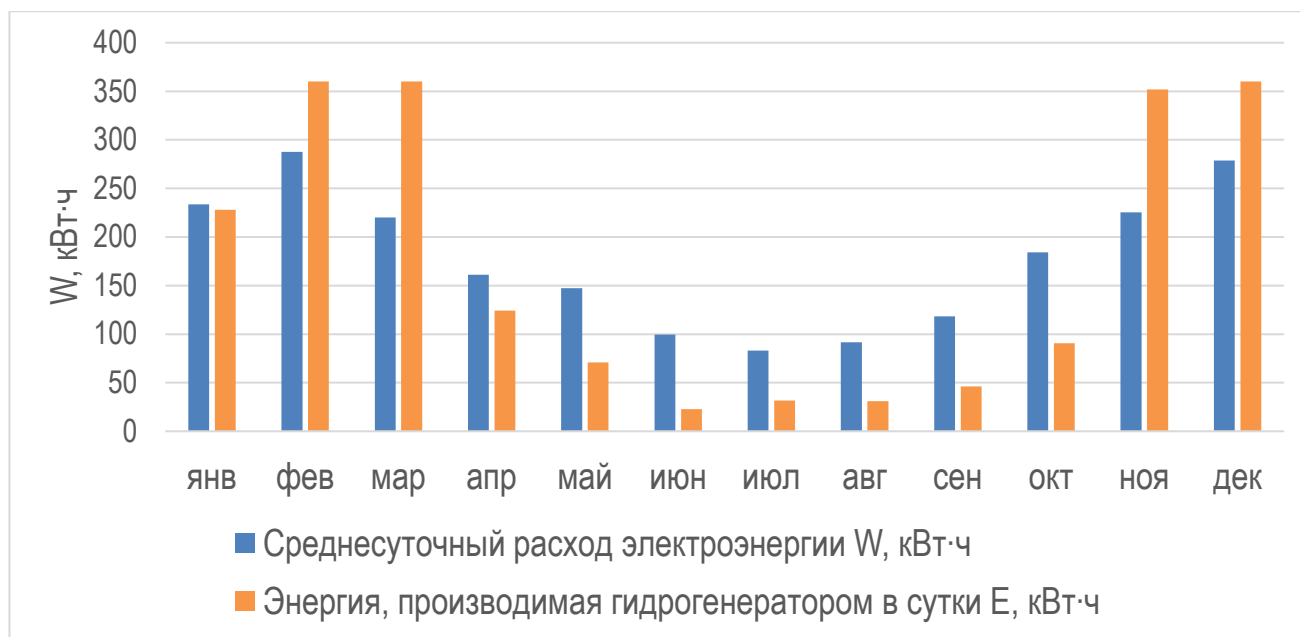


Рисунок 7 – Сравнение среднесуточного расхода электроэнергии и энергии, производимой гидрогенератором в сутки с ограничением номинальной мощности гидрогенератора до 15 кВт

Из анализа рисунка 7 следует, что в феврале, марте, ноябре и декабре суточная выработка электроэнергии гидрогенератором превышает среднесуточный расход электроэнергии УОХ. В эти месяцы появляется возможность не только полностью покрывать потребности УОХ в электроснабжении, но и передавать избыточный объём электроэнергии в сеть с последующим получением соответствующей платы.

Таким образом, оценка перспектив использования гидропотенциала р. Гурьевка для электроснабжения учебно-опытного хозяйства ФГБОУ ВО «КГТУ» показала, что применение микроГЭС в качестве объекта микрогенерации является перспективным решением. Результаты исследования свидетельствуют о возможности повышения энергетической автономности объекта и более эффективного использования местных водных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ.
2. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ.
3. Микро-гидроэлектростанции (МГЭС) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rina.pro/napravleniya-deyatelnosti/alternativnaya-energetika/mikro-gidro-elektrostantsii?hl=ru-RU> (Дата обращения: 07.04.2026).
4. Немирова, В. В. МикроГЭС для получения энергии дождя: исследовательский проект по направлению: современная энергетика / В. В. Немирова. – Рыбинск, 2024.
5. Федеральный закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации» от 27.12.2018 № 522-ФЗ.
6. Постановление Правительства РФ «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» от 04.05.2012 N 442 (ред. от 17.02.2026) (вместе с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии», «Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии») (с изм. и доп., вступ. в силу с 28.02.2026).
7. Быстрицкий, Г. Ф. Общая энергетика (Производство тепловой и электрической энергии): учебник / Г. Ф. Быстрицкий, Г. Г. Гасангаджиев, В. С. Кожиченков. – 2-е изд., стер. – Москва: КНОРУС, 2016. – 408 с.

ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR USING THE HYDROPOWER POTENTIAL OF THE GURYEVKA RIVER TO SUPPLY ELECTRICITY TO THE TRAINING AND EXPERIMENTAL FISH FARM OF KALININGRAD STATE TECHNICAL UNIVERSITY

D. A. Evdokimov

The article is devoted to assessing the prospects for using the hydropower potential of the Guryevka River to supply electricity to the training and experimental fish farm of Kaliningrad State Technical University through the use of a micro-hydropower plant as a microgeneration facility. It examines the legal and technical foundations of microgeneration, the operating principle of a micro-hydropower plant, the specifics of its connection to the electrical grid, presents a calculation of power output and potential electricity generation at the selected site, and also includes a comparative analysis of the average daily electricity consumption and the energy produced by the hydrogenerator per day, taking into account the nominal power limit of the hydrogenerator of up to 15 kW. The results of the study indicate the possibility of increasing the energy autonomy of the facility and making more efficient use of local water resources.

Статья посвящена оценке перспектив использования гидропотенциала р. Гурьевка для электроснабжения учебно-опытного хозяйства ФГБОУ ВО «КГТУ» с применением микроГЭС в качестве объекта микрогенерации. Рассмотрены правовые и технические основы микрогенерации, принцип работы микроГЭС, особенности её подключения к электрической сети, выполнен расчёт мощности и возможной выработки электроэнергии на выбранном объекте, а также был произведен сравнительный анализ среднесуточного расхода электроэнергии и энергии, производимой гидрогенератором с ограничением номинальной мощности гидрогенератора до 15 кВт. Результаты исследования свидетельствуют о возможности повышения энергетической автономности объекта и более эффективного использования местных водных ресурсов.

УДК 629.12

ГРНТИ 55.45

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ В СУДОСТРОЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ РАБОЧЕЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

А. Д. Баева, П. Р. Гришин

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, Россия; baeva.anna.d@gmail.com

судостроение, BIM-технологии, РКД, системы автоматического проектирования, САПР

Судостроительная отрасль является одной из ключевых составляющих мировой промышленности, обеспечивая создание высокотехнологичных морских и речных судов для гражданских, военных и коммерческих целей. Подготовка рабочей конструкторской документации (РКД) занимает одно из важнейших мест в этом процессе. Современные вызовы, включая стремление к повышению конкурентоспособности, цифровизацию и глобализацию производственных процессов, стимулируют внедрение новых методов проектирования и использования инновационных технологий.

В условиях международной конкуренции российское судостроение активно адаптирует передовой мировой опыт. Однако остаются существенные различия в применяемых технологиях, инструментах, стандартах и организационных принципах подготовки РКД. Эти различия влияют на сроки разработки, стоимость проектов и их соответствие современным техническим требованиям.

В современных подходах разработки документации в последнее время активно используется 3D-моделирование: трёхмерное проектирование позволяет визуализировать и оптимизировать конструкции, избегая ошибок на стадии разработки. В особенности в России используют КОМПАС-3D. Это отечественная

система автоматизированного проектирования. Она поддерживает интеграцию с базами данных и управление данными о продукте (PDM – Product Data Management). Несмотря на санкции, активно также используется AVEVA Marine: зарубежное программное обеспечение, адаптированное для российских нужд. Оно применяется для сложных проектов с большим количеством междисциплинарных взаимодействий [1].

В последнее время активно внедряются PLM-системы (Product Lifecycle Management) для управления жизненным циклом изделий. Такие программы, как ЛОЦМАН:PLM позволяют координировать работу всех подразделений, обеспечивая прозрачность процессов и контроль на всех этапах разработки [2].

В целом, автоматизация влияет на качество и скорость разработки РКД: уменьшает вероятность ошибок, так как программное обеспечение выполняет многие рутинные операции (например, проверку геометрии, генерацию спецификаций) [3].

Однако, несмотря на активное введение современных подходов в проектирование, имеются и проблемы в подготовке РКД в российском судостроении:

1. Отставание в цифровизации

Многие судостроительные предприятия в России всё ещё используют устаревшие методы разработки документации, включая бумажные чертежи. Это снижает эффективность и увеличивает вероятность ошибок. Цифровые системы часто внедряются не полностью, что ограничивает их потенциал. Например, активно используются программы для 3D-моделирования, но чертежи выполняются в отдельном ПО. В данном случае связь между моделью и выполняемым РКД теряется, а значит, изменения, внесённые в модель, не отражаются на чертеже. Это может привести к использованию устаревших данных в производстве. Также инженеры вынуждены вручную обновлять чертежи, что увеличивает риск человеческой ошибки и требует дополнительных временных затрат.

2. Недостаточная унификация инструментов и форматов данных

Разные предприятия используют различные системы автоматизированного проектирования (САПР), что затрудняет обмен информацией между проектными

бюро и производственными площадками. Например, часть организаций активно применяет отечественные САПР, однако унифицированные стандарты их взаимодействия не всегда обеспечиваются [4].

3. Недостаточная интеграция инструментов

Отечественные системы, хотя и широко используются, но менее функциональны и универсальны по сравнению с международными аналогами (например, AVEVA Marine, Siemens NX). Это затрудняет работу с зарубежными партнёрами [5].

В условиях активной цифровизации промышленности и перехода к концепции жизненного цикла изделия особую актуальность приобретают современные подходы к управлению инженерными данными. BIM-технологии (Building Information Modeling) представляют собой подход, основанный на создании единой информационной модели, содержащей не просто геометрию, а еще и физические характеристики, а также эксплуатационные данные объекта на протяжении всего его жизненного цикла. В настоящее время BIM широко и эффективно применяется в строительной отрасли [6], однако в судостроении внедрение данной технологии остается ограниченным и носит фрагментарный характер, что связано со спецификой отрасли и наличием устоявшихся CAD/CAE-подходов.

Для расчета эффективности внедрения BIM-технологии в судостроение был рассмотрен этап разработки рабочей конструкторской документации на лоцманское судно. Выделено три варианта создания РКД: частичный BIM-подход, ручной и полное использование BIM-технологий. Объектом исследования является бортовая секция лоцманского судна.

Вариант частичного BIM-подхода представляет собой формирование трёхмерной модели бортовой секции в программном комплексе AVEVA Marine на основе утверждённой проектной документации на постройку судна (ПДСП). В дальнейшем данная модель используется для прокладки систем, расположения оборудования, а также для проведения достроечных работ.

В отличие от полного подхода, предполагающего автоматическую генерацию документации средствами САД-систем, в рамках данной работы была применена ручная схема подготовки чертежей и спецификаций. Это связано с рядом ограничений ПО, в частности – невозможностью полного соблюдения требований ЕСКД, ГОСТов, а также внутренних стандартов предприятия, касающихся графического оформления, структуры спецификаций. Графическая информация из модели извлекалась вручную: формировались сечения, уточнялись сварные соединения и позиции, после чего создавался сборочный чертёж. Процесс разработки РКД и моделирования бортовой секции в рамках данной работы потребовал значительных трудозатрат, что указано в таблице 1.

Таблица 1 – Трудозатраты при частичном ВІМ-подходе

№ п/п	Этап работы	Время, ч	Описание
1	Анализ и систематизация данных ПДСП	3	Сбор исходных чертежей: обшивка, палубы, шпангоуты, переборки
2	Построение 3D-модели бортовой секции в AVEVA Marine	82	Моделирование конструкции: обшивка, набор, узлы
3	Создание и оформление сборочного чертежа	86	Создание проекций, разрезов, нанесение размеров, обозначений, оформление по ЕСКД и ГОСТ
4	Составление и структурирование спецификации	4	Создание спецификации и ее оформление
5	Проверка, вычитка, корректировка чертежей и спецификации	3	Контроль оформления, исправление ошибок, сбор финального комплекта документации
Итого		174	

Следующий вариант разработки РКД был реализован вручную, без применения специализированных 3D САПР. На основе чертежей ПДСП и альбома узловых конструкций использовался для подбора и адаптации узлов сопряжений обшивки с набором, переборками и палубами, а также усилений в критических зонах. Далее выполнялось формирование сборочных чертежей в AutoCAD.

Ручной процесс потребовал многократной проверки согласованности документации: изменения в одном чертеже влекли корректировку нескольких документов, что увеличивало трудоёмкость и риск ошибок. Несмотря на это, такой подход позволил достичь точного соответствия требованиям ЕСКД, ГОСТ и РМРС.

Количество часов, которые потребовались для разработки РКД ручным методом указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Трудозатраты при ручном подходе

№ п/п	Этап работы	Время, ч	Описание
1	Анализ и систематизация данных ПДСП	3	Сбор исходных чертежей: обшивка, палубы, шпангоуты, переборки
2	Создание, проработка размеров и узлов, а также оформление сборочного чертежа	212	Создание проекций, разрезов, нанесение размеров, обозначений, оформление по ЕСКД и ГОСТ
3	Составление и структурирование спецификации	24	Создание спецификации и ее оформление
4	Проверка, вычитка, корректировка чертежей и спецификации	9	Контроль оформления, исправление ошибок, сбор финального комплекта документации
Итого		248	

Третий вариант разработки РКД выполнялся с использованием специализированного программного обеспечения AVEVA Marine и представлял собой полностью цифровой подход – от построения 3D-модели до выпуска чертежей и спецификаций, тем самым используя полностью BIM-подход.

На начальном этапе была создана детализированная трёхмерная модель бортовой секции корпуса, а затем автоматически формировались чертежи, спецификации и ведомости материалов. Программа обеспечивала высокую связность данных: любые изменения в модели автоматически отражались на всех чертежах и спецификациях, что значительно сокращало трудозатраты и минимизировало ошибки при внесении изменений. Однако данный метод не предоставляет оформление чертежей в соответствии с требованиями ЕСКД и ГОСТов.

Трудозатраты при разработке РКД с полным использованием ПО указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Трудозатраты при разработке РКД с полным использованием ПО

№ п/п	Этап работы	Время, ч	Описание
1	Анализ и систематизация данных ПДСП	3	Сбор исходных чертежей: обшивка, палубы, шпангоуты, переборки
2	Построение 3D-модели бортовой секции в AVEVA Marine	82	Моделирование конструкции: обшивка, набор, узлы
3	Создание и оформление чертежа	44	Создание проекций, разрезов, нанесение размеров
4	Составление и структурирование спецификации	3	Создание спецификации и ее оформление.
5	Проверка и корректировка чертежей и спецификации	2	Контроль оформления, исправление ошибок, сбор финального комплекта документации
Итого		134	

Для оценки экономической эффективности были произведены расчеты. Трудоёмкость разработки РКД одной секции при ручном методе составляет 248 ч. При частичном использовании программного обеспечения трудоёмкость снижается до 174 ч, из которых 86 ч выполняются с применением ПО. При частичном использовании AVEVA Marine общая трудоёмкость составляет 134 ч, при этом 126 ч выполняются с применением программного обеспечения. Часовая ставка инженера-конструктора в России принята равной 600 руб./ч.

Стоимость постоянной лицензии AVEVA Marine составляет 20 000 евро, что примерно равно 200 тыс. руб. Для учёта затрат на программное обеспечение была применена линейная амортизация лицензии. Срок полезного использования лицензии принят равным пяти годам, при среднем объёме работ 10 судовых секций в год. Таким образом, суммарное количество секций, на которое распределяется стоимость лицензии, составляет 50 единиц. Амортизационные отчисления на одну секцию определяются по формуле:

$$A = \frac{200000}{5 \cdot 10} = 40000 \text{ Р.}$$

Стоимость разработки секции для каждого варианта определялась как сумма затрат на оплату труда и, при использовании ПО, амортизационных отчислений на лицензию.

При полностью ручной разработке стоимость работ определяется только затратами на оплату труда и составляет:

$$C_{\text{ручн}} = 248 * 600 = 148\,800\text{Р.}$$

Данный вариант принят в качестве базового для сравнения.

При частичном использовании программного обеспечения стоимость разработки секции складывается из затрат на труд и амортизации лицензии:

$$C_{\text{част}} = 174 * 600 + 40000 = 144\,400\text{Р.}$$

При активном использовании AVEVA Marine стоимость разработки секции определяется следующим образом:

$$C_{\text{ПО}} = 134 * 600 + 40000 = 120\,400\text{Р.}$$

Сравнительный анализ эффективности разработки РКД представлен в таблице 4 и на рисунках 1 и 2, где можно прийти к выводу, что частичное использование ПО почти не даёт экономии (всего 3 %), а полное использование BIM-технологий снижает стоимость секции на ~19 %. Однако данные расчеты не учитывают экономические и временные издержки, которые появятся на последующих этапах строительства проекта, в особенности при ручной разработке РКД. Основной эффект BIM-технологий проявляется при глубокой автоматизации операций.

Таблица 4 – Итоговая стоимость работ на секцию

№ п/п	Вариант разработки	Стоимость, Р	Экономия, Р	Экономия, %
1	Без ПО	148 800	-	-
2	С частичным использованием BIM-технологий	144 400	44 000	3,0
3	С полным использованием BIM-технологий	120 400	284 000	19,1

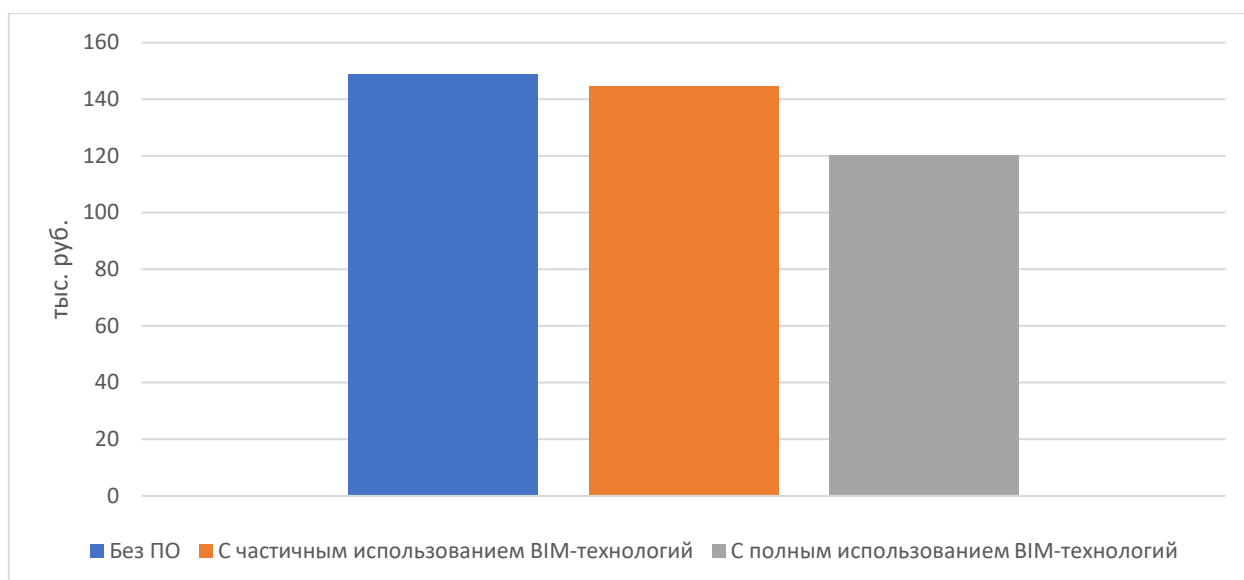


Рисунок 1 – Сравнение итоговой стоимости работ на секцию

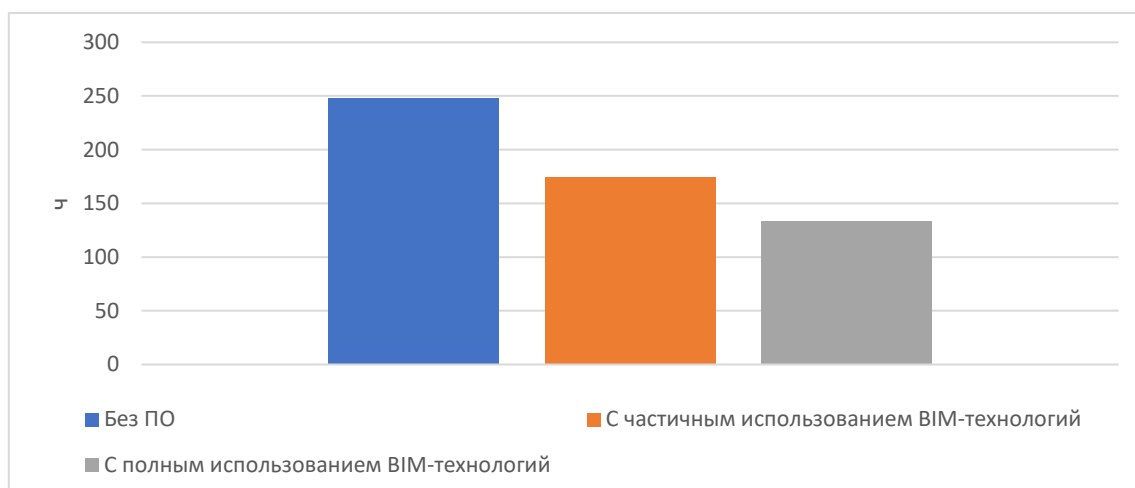


Рисунок 2 – Сравнение трудозатрат для разработки РКД на секцию

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдова, С. В. Исследование возможностей импортозамещения программного обеспечения для подготовки производства на отечественных предприятиях судостроения / С. В. Давыдова, Т. А. Михеева: Материалы международного научно-промышленного форума. Секция IV Судостроение, судоремонт и технологии конструкционных материалов. – 2024. – № 4. – 7 с.

2. Минченко, Л. В. Системы автоматического проектирования в судостроении / Л. В. Минченко, Т. А. Кандратова // Современные тенденции технических наук: материалы V Междунар. науч. конф. – Казань: Бук, 2017. – С. 73–76.

3. Михеева, Т. А. Сравнительная характеристика программных продуктов в области управления проектами и проблемы их применения на отечественных судостроительных верфях / Т. А. Михеева // Научные проблемы водного транспорта. – 2016. – № 49.

4. Янченко, А. Ю. Моделирование информационно-экономической системы в целях разработки программного обеспечения для безопасности в судостроении / А. Ю. Янченко // Ученые записки российской академии предпринимательства. – 2024. – Т. 23, № 3.

5. Эннс, Е. А. Цифровизация судостроения в России через призму мировых тенденций / Е. А. Эннс, Е. А. Заостровских // Региональные проблемы. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 105–116.

6. Молчанова, С. М. BIM как инструмент информационного моделирования при реализации проектов в строительной отрасли / С. М. Молчанова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №7 (145).

THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING BIM TECHNOLOGY IN SHIPBUILDING: A CASE STUDY OF WORKING AND DESIGN DOCUMENTATION

A. D. Baeva, P. R. Grishin

Against the backdrop of rapid digitalisation in industry and the shift towards a product lifecycle approach, modern approaches to engineering data management are becoming increasingly important. BIM technologies represent an approach based on the creation of a single information model containing not only geometry but also physical characteristics and operational data for the facility throughout its entire life cycle. Currently, BIM is widely and effectively used in the construction industry; however, in shipbuilding, the adoption of this technology remains limited and fragmented, which is linked to the specific nature of the industry and the prevalence of established CAD/CAE approaches. To assess the effectiveness of implementing BIM technology in shipbuilding, the stage of developing working and design documentation for a pilot vessel was examined.

В условиях активной цифровизации промышленности и перехода к концепции жизненного цикла изделия особую актуальность приобретают современные подходы к управлению инженерными данными. BIM-технологии представляют собой подход, основанный на создании единой информационной модели, содержащей не просто геометрию, а еще и физические характеристики, а также эксплуатационные данные объекта на протяжении всего его жизненного цикла. В настоящее время BIM широко и эффективно применяется в строительной отрасли, однако в судостроении внедрение данной технологии остается ограниченным и носит фрагментарный характер, что связано со спецификой отрасли и наличием устоявшихся CAD/CAE-подходов. Для расчета эффективности внедрения BIM-технологии в судостроение был рассмотрен этап разработки рабочей конструкторской документации на лоцманское судно.

УДК 621.31

ГРНТИ 44.37

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ЗАТЕНЕНИИ

А. Аккаш, М. С. Харитонов

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия,
e-mail: ahmadakkash@gmail.com

фотоэлектрическая система, точка максимальной мощности, частичное затенение, алгоритм возмущения и наблюдения, оптимизация роя частиц

Возобновляемые источники энергии, в частности солнечная энергия, представляют собой перспективное решение для удовлетворения растущих мировых энергетических потребностей. Фотоэлектрические системы получили широкое распространение на жилых, промышленных и сельскохозяйственных объектах благодаря своей экологичности и модульности. Тем не менее, их повсеместное внедрение по-прежнему сдерживается двумя основными факторами: высокой стоимостью оборудования и относительно низким коэффициентом полезного действия самих фотоэлектрических модулей [1, 2].

Для максимального извлечения энергии из солнечных панелей применяются системы отслеживания точки максимальной мощности (ТММ). Как правило, они интегрируются с DC-DC преобразователями постоянного тока, что позволяет эксплуатировать фотоэлектрический массив в режиме генерации максимально возможной мощности [3, 4].

Однако положение ТММ на вольт-ваттной характеристике (ВВХ) не является статичным. Оно нелинейно изменяется в зависимости от условий окружающей среды, главным образом от уровня инсоляции и температуры модуля [5–7]. Для эффективного поиска этой точки разработаны различные алгоритмы отслеживания ТММ. Среди классических подходов наиболее известны: метод возмущения и наблюдения (P&O) [6, 7], метод инкрементальной проводимости (INC) [8], методы на основе напряжения холостого хода [9] и тока короткого замыкания [10]. Данные алгоритмы демонстрируют высокую эффективность при равномерном освещении, когда ВВХ имеет единственный экстремум, соответствующий истинной ТММ [11].

Ситуация усложняется в условиях частичного затенения, которое возникает при перекрытии части фотоэлектрического массива тенью от облаков, зданий, деревьев или из-за загрязнения поверхности. В таких случаях ВВХ становится многоэкстремальной: на графике формируется несколько локальных максимумов мощности наряду с одним глобальным максимумом [12, 13]. Традиционные алгоритмы (такие как P&O и INC), опирающиеся на вычисление локальных производных или анализ малых приращений мощности, часто сходятся к первому найденному локальному максимуму, не имея математического аппарата для поиска глобального оптимума [14]. По оценкам исследователей, подобная ошибка слежения может приводить к потере до 70 % от потенциально доступной мощности [15], что критически снижает общую технико-экономическую эффективность системы.

Это обуславливает необходимость применения более совершенных, интеллектуальных алгоритмов отслеживания ТММ, способных исследовать всё пространство решений и гарантированно находить глобальный максимум даже при сложных сценариях частичного затенения. Таким образом, целью данного исследования является сравнительный анализ производительности классического метода возмущения и наблюдения (P&O) и эвристического алгоритма на основе метода оптимизации роя частиц (PSO). Оценка эффективности алгоритмов при

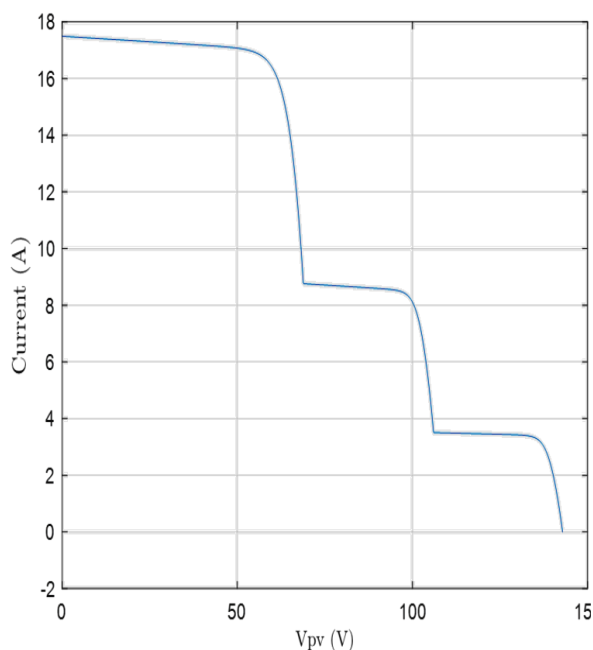
поиске ТММ в условиях частичного затенения проводится по критериям точности, скорости и устойчивости.

Влияние частичного затенения на характеристики фотоэлектрических модулей

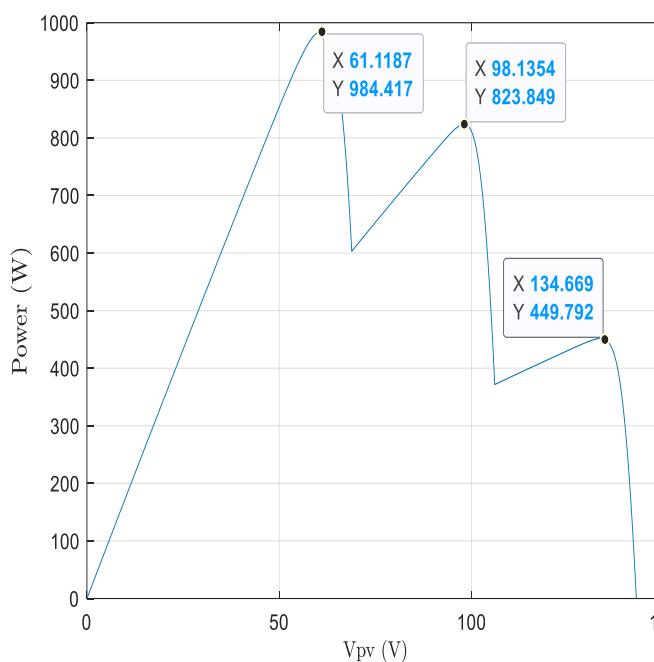
Частичное затенение – режим работы фотоэлектрического массива при неравномерном распределении инсоляции по его поверхности. Когда ток, генерируемый затененным солнечным элементом, становится меньше общего тока последовательной цепи, его р-п-переход смещается в обратном направлении. В этом режиме элемент перестает генерировать энергию и начинает рассеивать мощность, что приводит к его локальному перегреву – образованию так называемой «горячей точки», способной вызвать необратимую деградацию материала.

Для предотвращения этого эффекта в конструкцию фотоэлектрических модулей интегрируют байпасные диоды. При достижении на затененной группе элементов порогового обратного напряжения диод открывается, шунтируя данный участок цепи. Это исключает зашунтированные элементы из процесса генерации, что приводит к ступенчатому падению выходного напряжения модуля и, как следствие, всего массива. Для анализа данного явления была смоделирована система из четырех последовательно соединенных фотоэлектрических модулей, работающих при следующих уровнях инсоляции: 1000, 1000, 500 и 200 Вт/м².

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) такой системы (рисунок 1, а) имеет ярко выраженную ступенчатую форму. Каждый излом на кривой соответствует моменту открытия байпасного диода на одном из затененных модулей.



а)



б)

Рисунок 1 – Вольт-амперная (а) и вольт-ваттная (б) характеристики для фотоэлектрической системы из четырех последовательных ячеек при частичном затенении

Ступенчатый характер ВАХ обуславливает формирование многоэкстремальной ВВХ, представленной на рисунке 1, б. На данной характеристике идентифицируются несколько локальных максимумов и один глобальный максимум мощности:

- глобальный максимум (G1): $P = 984,4$ Вт при $U = 61,1$ В,
- локальный максимум (G2): $P = 823,8$ Вт при $U = 98,1$ В,
- локальный максимум (G3): $P = 449,8$ Вт при $U = 134,7$ В.

Наличие нескольких максимумов мощности представляет собой основную сложность для классических алгоритмов отслеживания, которые не способны отличить локальный оптимум от глобального.

Методы слежения за точкой максимальной мощности

Метод возмущения и наблюдения (P&O) является итерационным алгоритмом градиентного восхождения, реализующим поиск ТММ путем внесения периодических малых возмущений в рабочую точку фотоэлектрического массива.

Управляющим параметром выступает коэффициент заполнения (D) ШИМ-сигнала DC-DC преобразователя. На каждой итерации алгоритм изменяет D на фиксированный шаг ΔD , измеряет приращение выходной мощности ΔP и принимает решение о направлении следующего шага (рисунок 2). Если $\Delta P > 0$, возмущение было корректным, и направление изменения D сохраняется. Если $\Delta P < 0$, рабочая точка пересекла максимум мощности, и направление изменения D инвертируется.

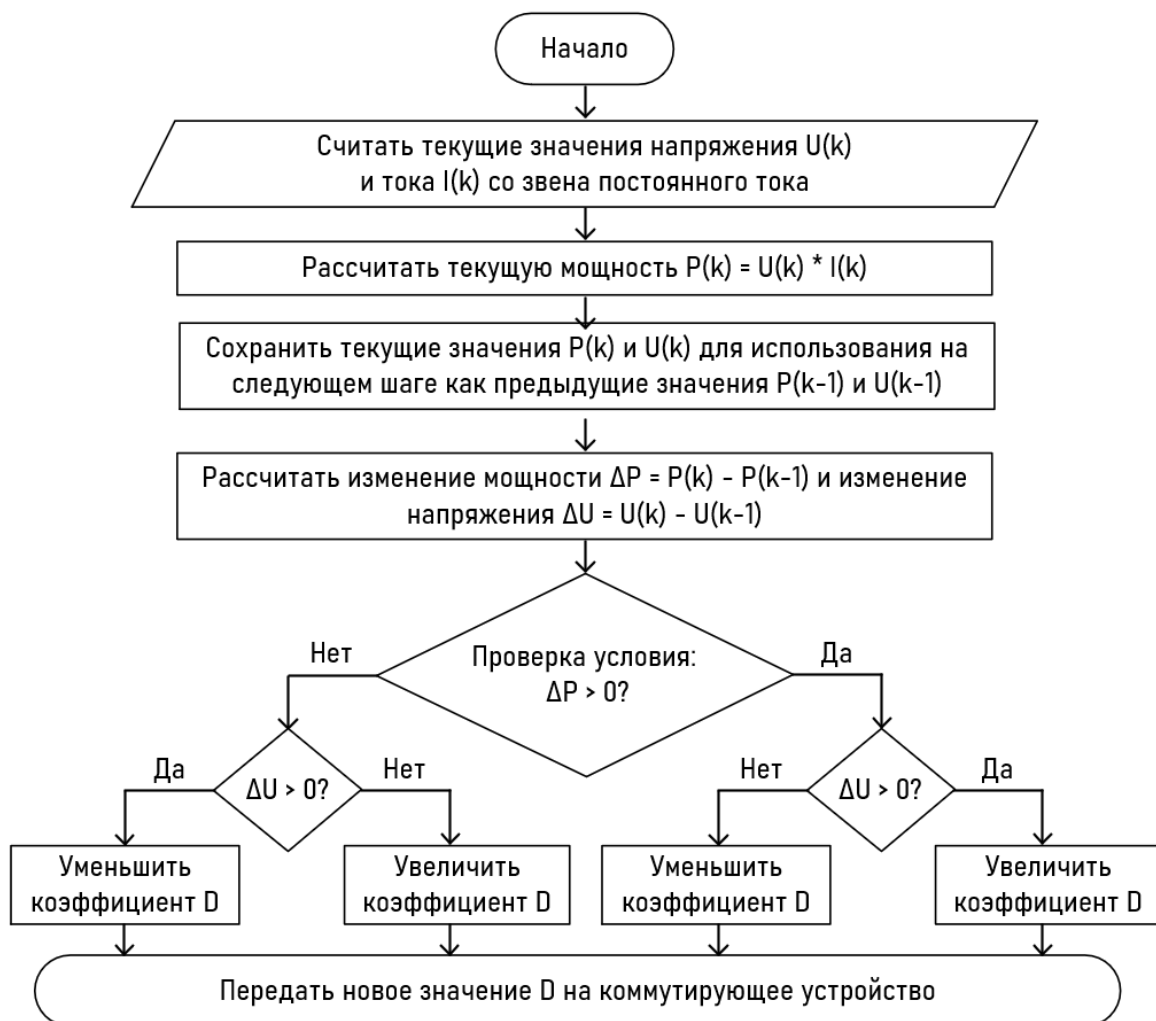


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма поиска ТММ методом возмущения и наблюдения

Ключевыми преимуществами метода являются простота реализации и высокая эффективность при равномерной инсоляции. Основные недостатки – наличие автоколебаний рабочей точки вблизи ТММ в установившемся режиме и неспособность находить глобальный максимум на многоэкстремальной ВВХ.

Алгоритм оптимизации роя частиц (PSO) является стохастическим популяционным методом глобальной оптимизации, основанным на моделировании социального поведения коллективных систем [16]. Применительно к задаче отслеживания ТММ данный алгоритм используется для поиска оптимального значения коэффициента заполнения D , при котором выходная мощность фотоэлектрической системы максимальна.

В рамках алгоритма рой, состоящий из N частиц, исследует пространство решений. Каждая частица i характеризуется вектором положения $x_i(k)$ и вектором скорости $v_i(k)$ на итерации k . В данной задаче положение $x_i(k)$ является скалярной величиной, соответствующей коэффициенту заполнения $D_i(k)$.

Итеративный процесс поиска оптимального решения описывается уравнениями обновления скорости и положения для каждой частицы (1):

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best\ i}^k - D_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best\ i}^k - D_i^k), \quad (1)$$

где w – инерционный вес, регулирующий баланс между глобальным (исследование) и локальным (эксплуатация) поиском; c_1, c_2 – когнитивный и социальный коэффициенты, определяющие влияние лучшего личного и лучшего глобального опыта соответственно; r_1, r_2 – случайные числа, равномерно распределенные в диапазоне $[0, 1]$; $P_{best\ i}^k$ – наилучшее положение, достигнутое частицей i до итерации k (соответствует максимальной выходной мощности); $g_{best\ i}^k$ – наилучшее положение, достигнутое всем роем до итерации k .

Оценка эффективности каждого потенциального решения производится с помощью целевой функции, в качестве которой для задачи поиска ТММ учитывается максимизация отдаваемой мощности фотоэлектрической панели (2):

$$P_{pv}(x_i) = U_{pv}(x_i) \cdot I_{pv}(x_i). \quad (2)$$

Основные этапы реализации алгоритма PSO представлены на рисунке 3. Процедура включает инициализацию параметров роя, итеративное вычисление функции пригодности, обновление персональных (P_{best}) и глобального (g_{best}) оптимумов до выполнения критерия останова. Результатом работы алгоритма является значение g_{best} , соответствующее оптимальному коэффициенту заполнения.



Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма поиска ТММ методом роя частиц

Результаты моделирования и их обсуждение

Для сравнительного анализа производительности алгоритмов отслеживания ТММ в условиях частичного затенения было выполнено моделирование в среде MATLAB/Simulink. Модель фотоэлектрической системы состояла из четырех последовательно соединенных фотоэлектрических модулей, работающих при неравномерном распределении солнечной радиации (1000, 1000, 500 и 200 Вт/м²). Такой сценарий приводит к формированию многоэкстремальной ВВХ (см. рисунок 1, б).

Результаты работы алгоритмов P&O и PSO в рассматриваемых условиях показаны на рисунке 4. Графики демонстрируют принципиальное различие в эффективности двух подходов.

Алгоритм P&O (синяя линия) показывает быструю первоначальную реакцию, однако стабилизируется на уровне мощности около 450 Вт. Это значение соответствует локальному максимуму $G3$ на ВВХ (см. рисунок 1, б), что свидетельствует о неспособности алгоритма исследовать всю характеристику и найти глобальную ТММ. Таким образом, несмотря на свою простоту и высокое быстродействие в стандартных условиях, метод P&O оказывается неэффективным при частичном затенении.

Напротив, алгоритм PSO (красная линия) после короткого переходного процесса (0,1 с), в ходе которого происходит исследование пространства решений, уверенно сходится к уровню мощности около 980 Вт. Это значение практически совпадает с глобальным максимумом мощности системы (984,4 Вт), что подтверждает способность метода успешно решать многоэкстремальные задачи оптимизации.

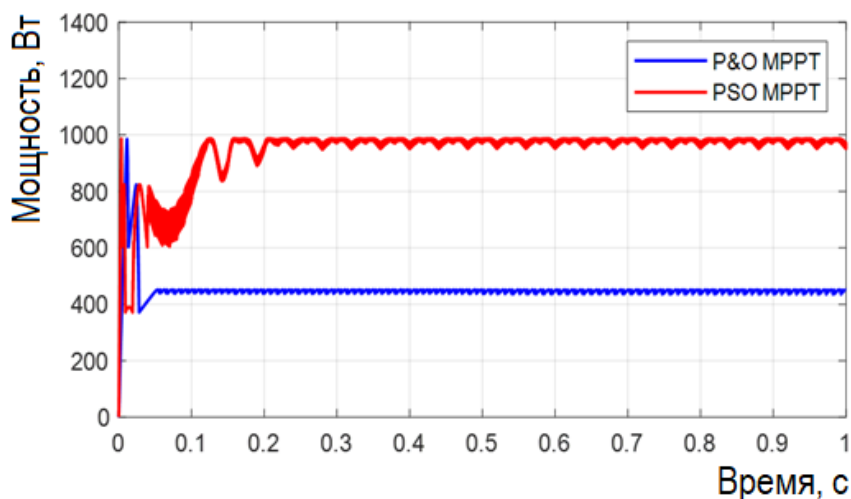


Рисунок 4 – Сравнение алгоритмов отслеживания ТММ при частичном затенении

Выводы

На основании проведенного численного моделирования можно сформулировать следующие выводы:

1. Классический метод возмущения и наблюдения (P&O) не обеспечивает эффективного отслеживания ТММ при наличии многоэкстремальной ВВХ, характерной для условий частичного затенения. Застревание алгоритма в точке локального максимума приводит к потере более 53 % от потенциально доступной энергии, что делает его применение в подобных условиях нецелесообразным.

2. Алгоритм оптимизации роя частиц (PSO) продемонстрировал высокую эффективность, успешно определив глобальный максимум мощности с точностью, превышающей 99 % от теоретического значения. Небольшое увеличение времени сходимости и вычислительной сложности по сравнению с P&O полностью компенсируется значительным ростом выработки энергии.

3. Исследование подтверждает, что для повышения производительности фотоэлектрических систем, эксплуатируемых в реальных условиях с переменной и неравномерной инсоляцией, необходимо использовать интеллектуальные алгоритмы отслеживания ТММ. Интеграция методов, подобных PSO, с силовыми преобразователями является практичным и эффективным решением для максимизации энергетической отдачи фотоэлектрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bidram A., Davoudi A., Balog S. Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in Photovoltaic arrays / A. Bidram, A. Davoudi, S. Balog // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2012. – Vol. 2, No. 4. – P. 532–546.

2. Mutoh N., Ohno M., Takayoshi I. A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems / N. Mutoh, M. Ohno, I. Takayoshi // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 53, No. 4. – P. 1055–1065.

3. Masoum A.S., Mousavi Badejani S.M., Fuchs E.F. Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic applications / A.S. Masoum, S.M. Mousavi Badejani, E.F. Fuchs // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2004. – Vol. 19, No. 3. – P. 599–606.

4. Gules R., De Pellegrin Pacheco J., Hey H.L. A maximum power point tracking system with parallel connection for PV stand-alone applications / R. Gules, J. De Pellegrin Pacheco, H.L. Hey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55, No. 7. – P. 2674–2683.
5. Gomes M.A., Galotto Jr. L., Sampaio L., Melo A., Canesin C.A. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications / M.A. Gomes et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60, No. 3. – P. 1156–1167.
6. Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. A multivariable perturb and observe maximum power point tracking technique applied to a single stage photovoltaic inverter / G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 1. – P. 76–84.
7. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. A technique for improving P&O MPPT performance of double-stage grid-connected photovoltaic systems / N. Femia et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 11. – P. 76–84.
8. Safari A., Mekhilef S. Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter / A. Safari, S. Mekhilef // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 4. – P. 1154–1161.
9. Mei Q., Shan M., Liu L., Guerrero J.M. A novel variable step size incremental resistance MPPT method for PV systems / Q. Mei et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 4. – P. 2427–2434.
10. Noguchi T., Togashi S., Nakamoto R. Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system / T. Noguchi, S. Togashi, R. Nakamoto // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49, No. 1. – P. 217–223.
11. Esumi T., Chapman L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques / T. Esumi, L. Chapman // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 439–449.

12. Masoum M.A.S., Dehbonei H., Fuchs E.F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking / M.A.S. Masoum et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2002. – Vol. 17, No. 4. – P. 514–522.
13. Patel H., Agarwal V. MATLAB based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics / H. Patel, V. Agarwal // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2008. – Vol. 23, No. 1. – P. 302–310.
14. Maki A., Valkealahti S. Power losses in long string and parallel connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions / A. Maki, S. Valkealahti // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2012. – Vol. 27, No. 1. – P. 173–183.
15. Wang Y.-J., Hsu P.-C. Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules / Y.-J. Wang, P.-C. Hsu // IET Renewable Power Generation. – 2010. – Vol. 4, No. 3. – P. 272–282.
16. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MPPT ALGORITHMS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS UNDER PARTIAL SHADING

A. Akkash, M. S. Kharitonov

Paper presents a comparative performance analysis of maximum power point tracking algorithms in photovoltaic systems operating under non-uniform solar irradiance (partial shading) conditions. This specific operating mode leads to the formation of a multi-peak Power-Voltage characteristic, which degrades the performance of traditional control methods due to their tendency to converge to local optima. The study investigates a classical gradient-based algorithm, the Perturb and Observe (P&O) method, and the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. A simulation model comprising four series-connected PV modules subjected to varying irradiance levels was developed in the MATLAB/Simulink environment. The simulation results confirm a fundamental drawback of the P&O algorithm: it converges to a local maximum, resulting in a failure to extract over 50 % of the potentially available energy in the considered scenario. Conversely, the stochastic nature of the PSO algorithm ensures the successful detection of the global maximum power point. Based on the obtained data, the study justifies the technical feasibility of integrating intelligent optimization algorithms into power converter control systems to maximize the energy efficiency of photovoltaic installations under real-world operating conditions.

В статье представлен сравнительный анализ эффективности алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности в фотоэлектрических системах, функционирующих в условиях неравномерного распределения инсоляции (частичного затенения). Специфика данного режима работы обуславливает формирование многоэкстремальной вольт-ваттной характеристики, что снижает производительность традиционных методов управления из-за их подверженности сходимости к локальным оптимумам. В качестве объектов исследования рассмотрены классический алгоритм градиентного типа – метод возмущения и наблюдения (P&O), и алгоритм оптимизации роя частиц (PSO). На базе программного комплекса MATLAB/Simulink разработана имитационная модель системы, включающей четыре последовательно соединенных фотоэлектрических модуля с различными уровнями инсоляции. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что алгоритм P&O обладает принципиальным недостатком, сходясь к локальному максимуму, что в рассматриваемом сценарии приводит к недовыработке более 50 % потенциально доступной энергии. В свою очередь, стохастический аппарат алгоритма PSO обеспечивает нахождение глобального максимума мощности. На основании полученных данных научно обоснована техническая целесообразность интеграции интеллектуальных оптимизационных алгоритмов в системы управления силовыми преобразователями для максимизации энергетической эффективности фотоэлектрических установок в реальных условиях эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОК

О. О. Варзанова, А. С. Лаврова, И. В. Кожевникова

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, Россия; ovarzanova385@mail.ru

усиление стальных балок, композитные материалы, углепластик, базальтопластик, эпоксидный клей, адгезия к стали, гальваническая коррозия, внешнее армирование

В современном промышленном и гражданском строительстве широко распространены здания на металлическом каркасе. Наиболее распространенным несущим элементом стального каркаса являются балки. Кроме каркасных зданий стальные балки находят применение в несущих конструкциях мостов, эстакад и др. В процессе длительной эксплуатации они неизбежно подвергаются негативным воздействиям, включая коррозию, механические повреждения и воздействия запроектных нагрузок. По данным многочисленных исследований, физический износ, коррозия, а также необходимость модернизации производства (с увеличением полезных нагрузок) часто приводят к тому, что несущая способность элементов становится недостаточной или близкой к предельной [2, 3]. Для восстановления или увеличения несущей способности прибегают к усилению металлических балок. Отметим, что традиционно металлические конструкции являются наиболее доступными для усиления.

Классическим подходом усиления элементов металлических конструкций, в том числе и балок, является увеличение сечения путём приварки дополнительных элементов (часто металлических пластинок), установка вспомогательных связей и распорок, обетонирование или использование шпренгелей (рисунок 1) [7]. Однако, перечисленные методы имеют и недостатки:

- высокая трудоёмкость и увеличение веса конструкций;
- необходимость сварки элементов под действием нагрузки;
- уменьшение полезного пространства (дополнительные стойки, распорки сокращают полезный объём здания);
- остановка производства (для выполнения работ по усилению технологический процесс предприятия приходится останавливать, что связано с экономическими потерями).

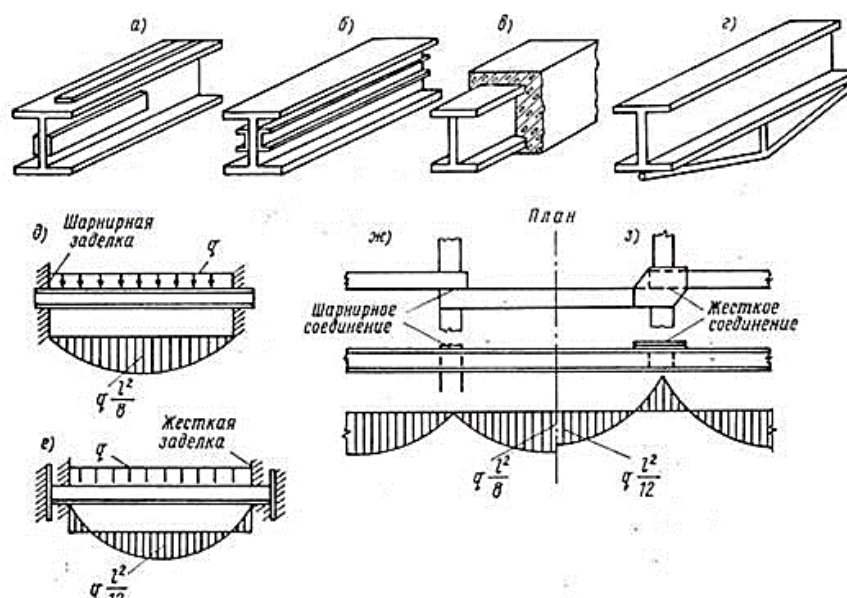


Рисунок 1 – Традиционные способы усиления стальных балок [7]:

- а), б) применение накладок для увеличения сечения; в) обетонирование;
- г) использование шпренгеля; д), е) применение распорных или натяжных устройств для регулировки напряжений; ж), з) использование дополнительных опор

Поэтому при проектировании реконструкции возникает необходимость усиления металлических конструкций без остановки производства, с минимальным увеличением веса и габаритов. Мировой опыт (США, Япония, Европа) показывает высокую эффективность внешнего армирования стальных конструкций композитными материалами – фиброармированными пластиками (ФАП). Они лишены большинства недостатков традиционных методов, что делает их использование привлекательным.

Перечислим некоторые преимущества ФАП для усиления металлических конструкций:

- высокая удельная прочность (например, прочность углепластиков на разрыв в несколько раз выше, чем у стали, при плотности меньшей в 5 раз);
- технологичность (материал поставляется в рулонах, его можно наклеивать в труднодоступных местах без использования тяжёлой техники);
- коррозионная стойкость (композиты не подвержены коррозии, что делает возможным их применение в агрессивных средах);
- возможность работы без демонтажа конструкций (отсутствие сварки и возможность дозированного нанесения материала позволяют проводить усиление без остановки производства).

Однако, эффективность усиления такого усиления зависит от следующих факторов [1]:

1. Качество подготовки поверхности. Для обеспечения качественной адгезии клеевого слоя со сталью необходима тщательная очистка поверхности балки до металлического блеска, немедленное грунтование (праймирование) и точное соблюдение временных регламентов.

2. Предотвращение гальванической коррозии. При использовании углепластиков (на основе углеродного волокна) в паре со сталью возникает риск образования гальванической пары в присутствии влаги. Требуется надёжный изолирующий барьер (слой эпоксидного клея толщиной не менее 0,25 мм) либо применение стекло- или базальтопластиков, которые являются диэлектриками.

Для российской строительной отрасли применение композитов для усиления металлических элементов несущих конструкций – относительно новое направление. Ограничение применения такого способа усиления связано со следующими факторами:

- экономическим – сравнительно высокая стоимость материалов;
- нормативным – отсутствие нормативных документов (сводов правил), регламентирующих расчет и проектирование усиления стальных конструкций композитными материалами. Отметим, что для усиления железобетонных конструкций разработан и введен в действие свод правил СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными

материалами» регламентирующий проектирование их усиления и восстановление. Отсутствие нормативных документов по усилению стальных конструкций композитными материалами связан, в том числе, с необходимостью проведения дополнительных исследований;

- кадровый и технологический – существует дефицит квалифицированных специалистов, владеющих тонкостями производства работ по усилению металлических конструкций композитными материалами.

Цель настоящей статьи – систематизировать сведения о композитных материалах и клеевых системах, применяемых для внешнего армирования стальных балок, и дать практические рекомендации по их выбору. Результаты лягут в основу натурных исследований, которые необходимы для конечно-элементного моделирования усиления стальных конструкций композитными материалами.

Классификация композитных материалов для внешнего армирования строительных конструкций

Композитные материалы (КМ) – это гетерофазные системы, состоящие из двух и более компонентов, сохраняющих свои границы раздела. Эффективность КМ обусловлена синергизмом свойств армирующего наполнителя и связующей матрицы [1]. По материалу матрицы композиты подразделяются на металлические и неметаллические. В качестве системы внешнего армирования строительных конструкций наибольшее применение нашли полимерные матрицы (эпоксидные, полиэфирные смолы), армированные высокопрочными волокнами. Волокна относятся к одномерным наполнителям композитных материалов (рисунок 2) [1]. По схеме армирования различают одноосные, двухосные и трехосные структуры.

Для усиления изгибаемых элементов (балок) преимущественно используются однонаправленные материалы, где волокна ориентированы вдоль оси главных растягивающих напряжений (рисунок 2, а) [1].

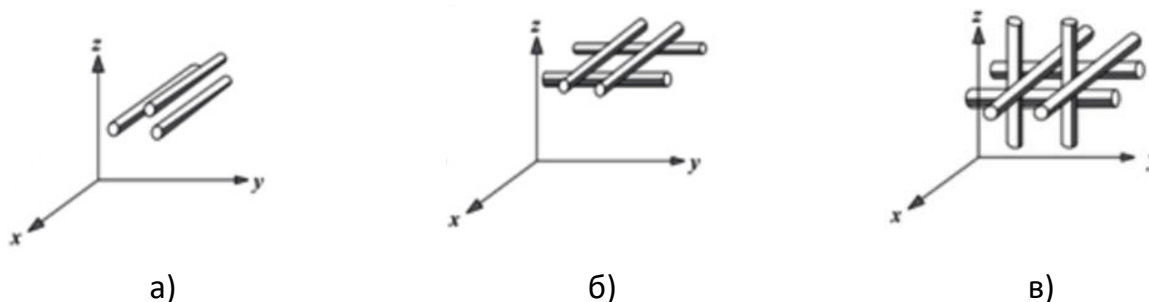


Рисунок 2 – Схема расположения компонентов армирования композитов одномерными наполнителями:

а) одноосное (линейное); б) двухосное (плоскостное); в) трехосное (объемное) [1]

В практике усиления стальных балок, как правило, применяют следующие волокна: углеродные (карбон), стеклянные и базальтовые. Их характеристики определяют эффективность и долговечность системы усиления. Рассмотрим указанные материалы более подробно.

Углеродные волокна (толщина 5–15 мкм) состоят преимущественно из атомов углерода с высокой ориентацией фибрилл вдоль оси. При усилении стальных конструкций используются в форме углеродных лент, углеродных ламелей и углеродных сеток. Недостатком использования углепластиков является возможность гальванической коррозии из-за близости углерода и стали в электрохимическом ряду. Поэтому при использовании углеволокон обязателен изолирующий слой – например, дополнительный слой эпоксидного клея или стеклоткани.

Стекловолокно дешевле углеволокну, но обладает меньшим модулем упругости и склонно к ползучести под длительной нагрузкой и хрупкому разрушению при ударных воздействиях. Поэтому стеклопластики при усилении строительных конструкций применяют ограниченно.

Базальтовое волокно – перспективная альтернатива углеволокну. Его получают из природного базальта. Волокно характеризуется высокой химической стойкостью к щелочам и кислотам, экологически безопасно и обладает диэлектрическими свойствами – базальтопластик не образует гальванической пары со сталью, поэтому не требует дополнительной защиты от электрохимической коррозии. Это свойство делает базальтопластики особенно привлекательными для усиления стальных балок в агрессивных средах или при невозможности создать идеальный изолирующий слой.

При выборе материала для усиления строительных конструкций важными являются его прочностные характеристики. Механические свойства композитных материалов на основе рассмотренных волокон представлены в таблице 1. Из таблицы можно видеть, что углепластики обладают лучшими прочностными характеристиками.

Таблица 1 – Механические свойства композитным материалов

Тип композита	Плотность (г/см ³)	Предел прочности на растяжение (МПа)	Предел прочности на сжатие (МПа)	Модуль упругости (ГПа)	Ударная вязкость (кДж/м ²)
Углепластик (UD, HT)	1,55	2400	1200	135	65
Стеклопластик	1,85–1,95	800–1100	600–800	40–46	115–120
Базальтопластик	2,0	1000	850	50	95

Клеевые составы

Клеевой состав является важным элементом системы усиления, поскольку обеспечивает передачу касательных напряжений с металла на композитный материал. Клеевые составы, используемые для усиления железобетонных и металлических конструкций, различаются.

Для приклеивания композитов к стали применяются высокопрочные эпоксидные клеи с модификаторами, повышающими адгезию к металлу. Например, эпоксидный клей CarbonWrap Resin Laminate+ отечественного производства используется для устройства системы усиления конструкций на основе композитных углеродных ламелей. Важно отметить, что клей должен быть тиксотропным и совместимым с материалом композита.

Поскольку клей обеспечивает передачу касательных напряжений с усиливаемого элемента на композитный материал, то определяющими являются такие свойства клея, как адгезия к стали, прочность и модуль упругости.

Согласно ГОСТ 57921-2017 [5], для металлических конструкций клеевой состав должен обеспечивать адгезию к стали не менее 15 МПа, прочность на

сдвиг более 18 МПа, а также его модуль упругости должен быть сопоставим с модулем упругости композита, чтобы обеспечить совместность деформаций. Как правило, производители композитных материалов поставляют клеевой состав, соответствующий требованиям регламентов, для использования его в применяемой системе усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Композитные материалы являются эффективным способом усиления стальных балок, в том числе работающих под нагрузкой.

2. Для эффективной работы системы внешнего армирования при усилении стальных конструкций необходимо подобрать соответствующий клеевой состав и качественно подготовить поверхность усиливаемого элемента.

3. Широкое распространение композитных материалов для усиления и восстановления стальных конструкций сдерживается отсутствием нормативных документов, регламентирующих методы расчета и проектирование. Отсутствие нормативных документов по усилению стальных конструкций композитными материалами связано, в том числе, с необходимостью проведения дополнительных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Композиционные материалы в строительстве: учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство / В. Г. Соловьев [и др.]. – Москва: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2020. – 85 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Kafedri/TVViB/mmaterials/Композиционные%20материалы%20в%20строительстве_уч.пособ.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

2. Шилин, А. А. Усиление железобетонных и каменных конструкций композитными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. В. Картузов – Москва: Стройиздат, 2004. – 144 с.

3. Леонова, А. Н. Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами при воздействии агрессивной среды / А. Н. Леонова, О. Д. Софьяников, И. А. Скрипкина // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, вып. 4. – С. 496–509. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.496-509.

4. Металлические конструкции: учебник для вузов / под ред. Ю. И. Кудишина. – Москва: Академия, 2010. – 688 с.

5. ГОСТ Р 57921-2017. Композиты полимерные. Методы испытаний. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 38 с.

6. ГОСТ 12423-2013. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)». – Москва: Стандартинформ, 2014. – 8 с.

7. Виды металлических балок для перекрытий: статья [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://металловъ.рф/stati/vidy-metallicheskih-balok-dlja-perekritij/> (дата обращения: 01.03.2026).

THE COMPOSITE MATERIALS USING TO STRENGTHEN STEEL BEAMS

O. O. Varzanova, A. S. Lavrova, I. V. Kozhevnikova

This article examines a method for strengthening steel beams using composite materials. An attempt is made to systematize information on composite materials and adhesives used in systems for external reinforcement of metal elements. The advantages of strengthening steel structures with composite materials compared to traditional reinforcement methods are identified. It is noted that the widespread use of composite materials for strengthening and restoring steel structures is hindered by the lack of regulatory documents governing calculation and design methods. The lack of regulatory documents on strengthening steel structures with composite materials is due, among other things, to the need for additional scientific research.

В статье рассматривается способ усиления стальных балок с применением композитных материалов. Сделана попытка систематизировать сведения о композитных материалах и клеевых составах, применяемых в системах для внешнего армирования металлических элементов. Выявлены достоинства усиления стальных конструкций композитными материалами по сравнению с традиционными методами усиления. Отмечено, что широкое распространение композитных материалов для усиления и восстановления стальных конструкций сдерживается отсутствием нормативных документов, регламентирующих методы расчета и проектирование. Отсутствие нормативных документов по усилению стальных конструкций композитными материалами связано, в том числе, с необходимостью проведения дополнительных научных исследований.

ВЕРИФИКАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТИН ПОСТОЯННОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

А. А. Шилова, В. Р. Синюкова, А. С. Лаврова

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, Россия;
alex_shilova@inbox.ru, valeriasvr2003@gmail.com

метод конечных элементов, верификация, прямоугольная пластина, изгибающий момент, граничные условия, конечно-элементная сетка, аналитическое решение, погрешность, сходимость

Современное проектирование, связанное с прочностными расчетами, в строительной отрасли, машиностроении и кораблестроении невозможно представить без использования методов математического моделирования, среди которых метод конечных элементов (МКЭ) занимает доминирующее положение [1].

Программные комплексы класса CAE (Computer-Aided Engineering), такие как отечественная платформа Fidesys, позволяют с высокой точностью прогнозировать напряженно-деформированное состояние конструкций, сокращая временные и материальные затраты на натурные испытания. Однако достоверность полученных численных результатов напрямую зависит от качества построенной конечно-элементной модели [2]. Ошибки дискретизации, выбора типа элементов, задания граничных условий или свойств материалов могут привести к не-

корректным выводам, что ставит задачу верификации моделей в разряд перво-степенных.

Верификация расчетных моделей представляет собой процесс подтверждения того, что математическая модель и её численная реализация корректно отражают физическую постановку задачи [3, 4]. Наиболее надежным способом верификации является сравнение полученных численных данных с аналитическими решениями, которые существуют для ряда тестовых задач теории упругости, пластичности и других разделов механики сплошных сред. Использование аналитических методов расчета в качестве эталона позволяет отделить ошибки численного метода от ошибок построения модели и оценить сходимость решения [5].

Настоящая работа посвящена верификации конечно-элементных моделей пластин постоянной жесткости, моделируемых в среде отечественного программного комплекса CAE Fidesys, с различными условиями закрепления кромок.

Целью исследования является оценка погрешности значения изгибающих моментов и прогибов пластин постоянной жесткости, полученных в результате численного расчета. В работе рассматриваются критерии сходимости, влияние густоты сетки на точность результатов и соответствие численных данных аналитическим решениям, что позволит сформировать рекомендации по расчету стальных пластинчатых конструкций в программном комплексе CAE Fidesys [6].

В исследовании рассматривалась прямоугольная пластина с различными вариантами закрепления контура. Размеры пластины были приняты 1×1 м, толщина пластины $\delta = 0,01$ и $0,005$ м. Материал пластины – углеродистая сталь со следующими характеристиками: модуль упругости $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность $\rho = 7850$ кг/м³, предел текучести $\sigma_y = 2,4 \cdot 10^8$ Па. В качестве нагрузки была принята равномерно распределенная нагрузка интенсивностью $q = 100$ Н/м².

Определение эталонных значений максимальных изгибающих моментов M_x и M_z и вертикального прогиба выполнялось по справочнику «Прочность. Устойчивость. Колебания» [1].

Первым этапом исследования стал расчет пластины постоянной жесткости шарнирно-опертой по контуру. При моделировании пластины в программном комплексе CAE Fidesys использовалась сетка различной густоты. Размеры четырехугольных конечных элементов (КЭ) были приняты следующими 200; 143; 100; 63; 43; 33; 30; 20 мм, что соответствует сетке с количеством ячеек 5×5; 7×7; 10×10; 16×16; 23×23; 30×30; 33×33; 50×50. На рисунке 1 показаны конечно-элементные модели пластины с различной густотой сетки.

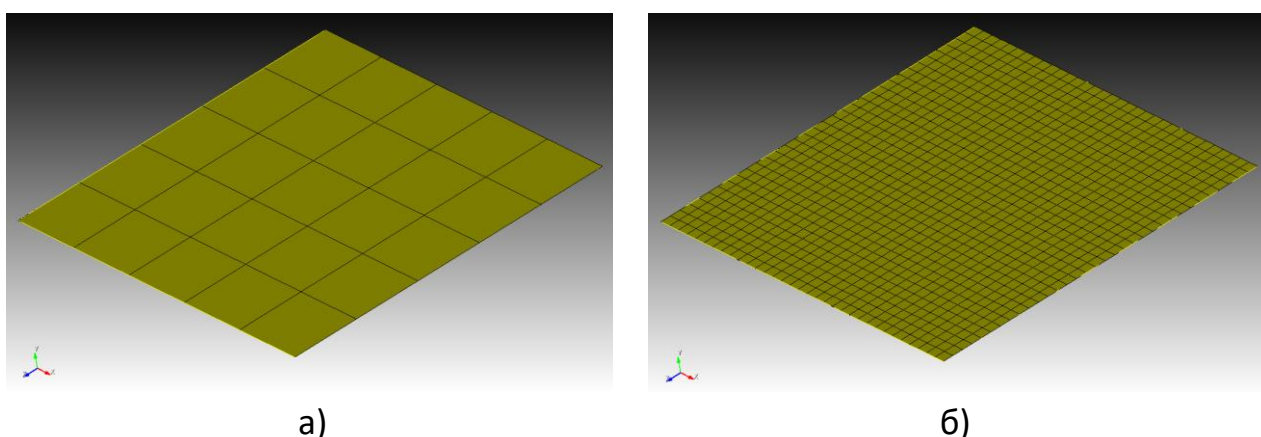


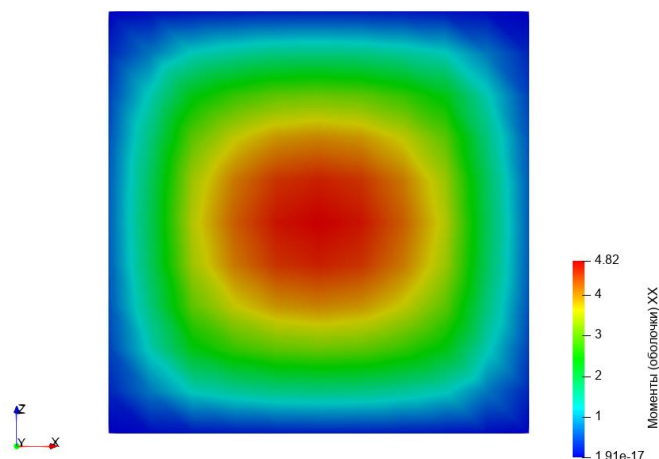
Рисунок 1 – Расчетная модель пластины в программном комплексе CAE Fidesys с различной густотой сетки: а) 5×5; б) 33×33

Результаты, полученные в ходе численного моделирования представлены на рисунке 2. Для удобства анализа, данные по результатам расчета МКЭ и аналитическим зависимостям, представлены в таблице 1. По данным таблицы 1 построены графики зависимости значений изгибающих моментов и прогибов в середине пролета от размера КЭ (рисунок 3).

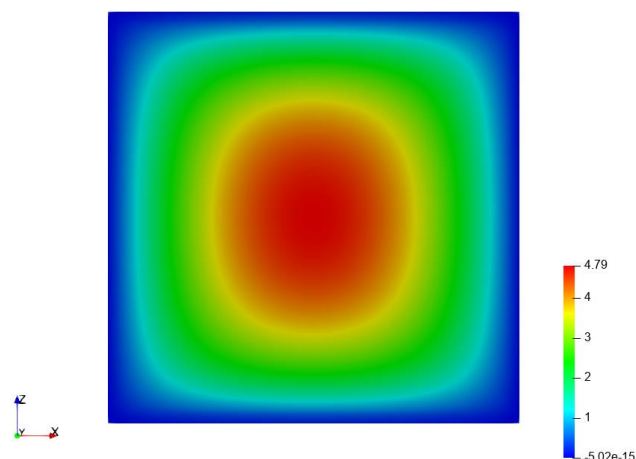
Таблица 1 – Значения изгибающих моментов $M_x = M_z$ в середине пролета и вертикальных перемещений Δy для пластины 1×1 м шарнирно-опертой по контуру

Показатели	По [1]	5×5	7×7	10×10	16×16	23×23	30×30	33×33	50×50
$M_x=M_z, \text{Н} \cdot \text{м}$	4,79	4,7	4,68	4,82	4,8	4,78	4,79	4,78	4,79
Расхождение, %	-	1,9	2,3	0,6	0,2	0,2	0	0,2	0
$\Delta y, \text{м} \times 10^{-5}$ (при $\delta=0,01$)	2,15	1,99	2,11	2,22	2,22	2,21	2,22	2,22	2,22

Показатели	По [1]	5×5	7×7	10×10	16×16	23×23	30×30	33×33	50×50
Расхождение, %	-	7,44	1,86	3,26	3,26	2,79	3,26	3,26	3,26
$\Delta y,$ $m \times 10^{-5}$ (при $\delta=0,005$)	1,72	1,60	1,69	1,77	1,78	1,77	1,77	1,78	1,78
Расхождение, %	-	6,98	1,74	2,91	3,49	2,91	2,91	3,49	3,49



а)

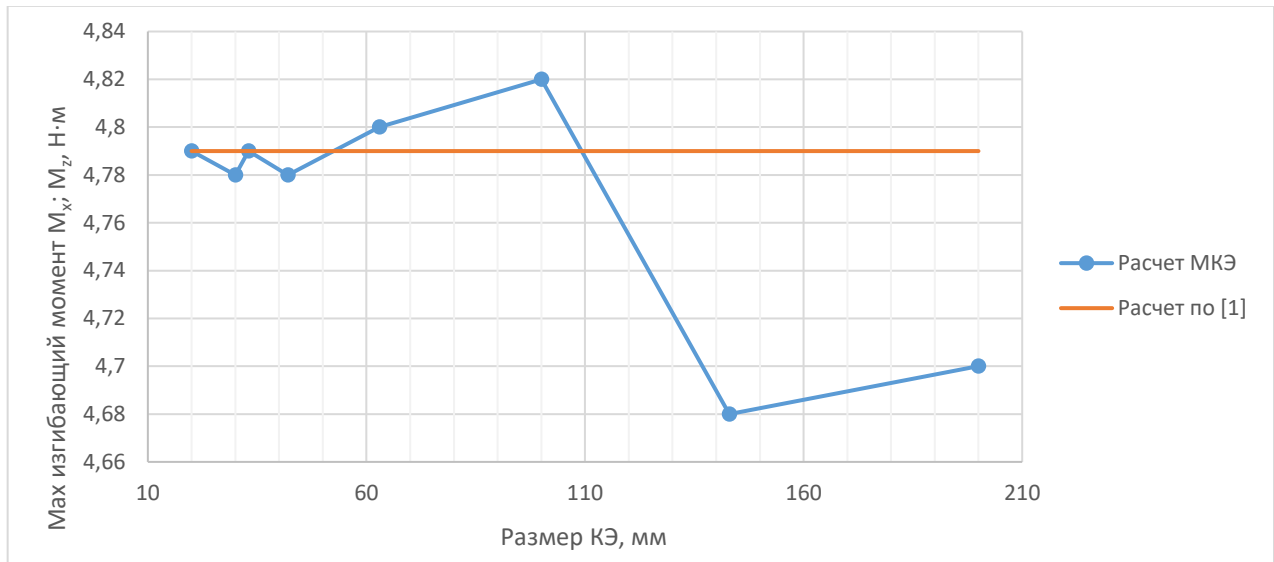


б)

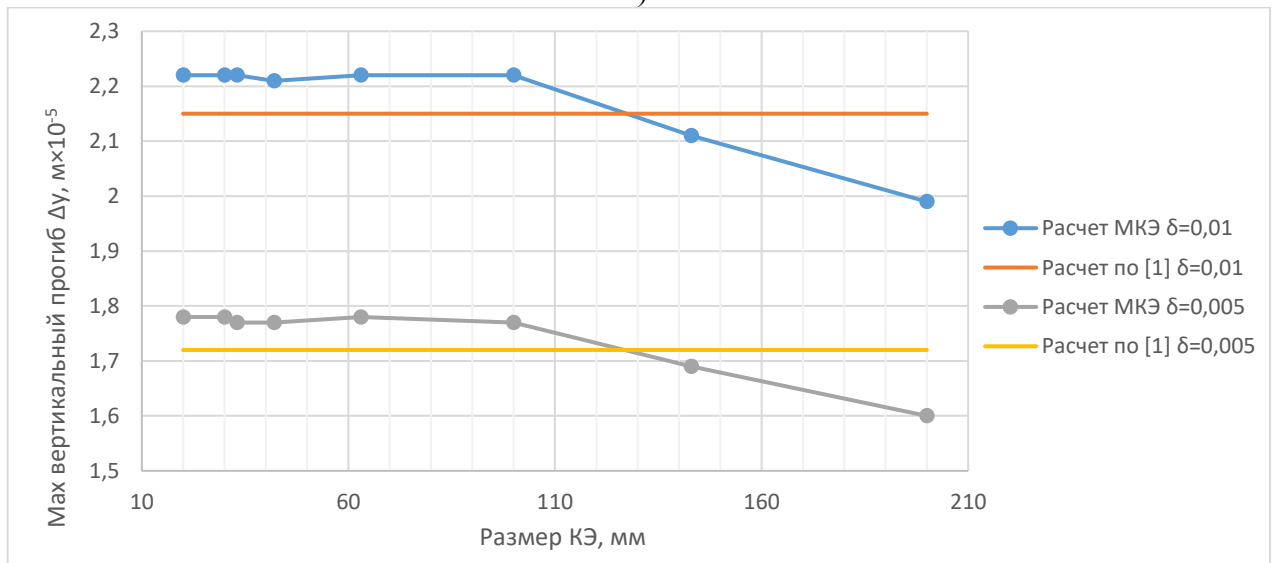
Рисунок 2 – Результаты расчета шарнирно-опертой пластины:
а) с сеткой 10×10; б) с сеткой 30×30

Анализ результатов показал, что значения изгибающих моментов, полученные по данным расчета МКЭ пластин постоянной жесткости шарнирно-опертых по контуру, соответствуют значениям, полученным по аналитическим зави-

симостям. Достаточная точность была достигнута при размере конечного элемента 100 мм, что соответствует сетке 10×10 . Расхождение составило 0,6 %. Дальнейшее уменьшение размера КЭ не привело к существенным изменениям величины максимального изгибающего момента в середине пролета пластины.



а)



б)

Рисунок 3 – График зависимости значений:
а) изгибающих моментов M_x, M_z ; б) вертикального прогиба Δy
от размера конечного элемента для пластины 1×1 м шарнирно-опертой по контуру

В ходе численного исследования также был проведен анализ влияния размера конечного элемента на величину вертикальных перемещений Δy . Прогибы

определялись для пластин постоянной толщины $\delta = 0,01$ и $\delta = 0,005$ м. Из графика (рисунок 3, б) видно, что очертания кривых, полученных по результатам численного расчета пластинок разной толщины, совпадают. Для обоих случаев сходимость решения была достигнута при размере конечного элемента 100 мм, что соответствует сетке 10×10 . Расхождение в значении вертикального прогиба в сравнении с аналитическим решением составляет порядка 3 %. Деформированная схема, полученная при расчете в программном комплексе CAE Fidesys, показана на рисунке 4.

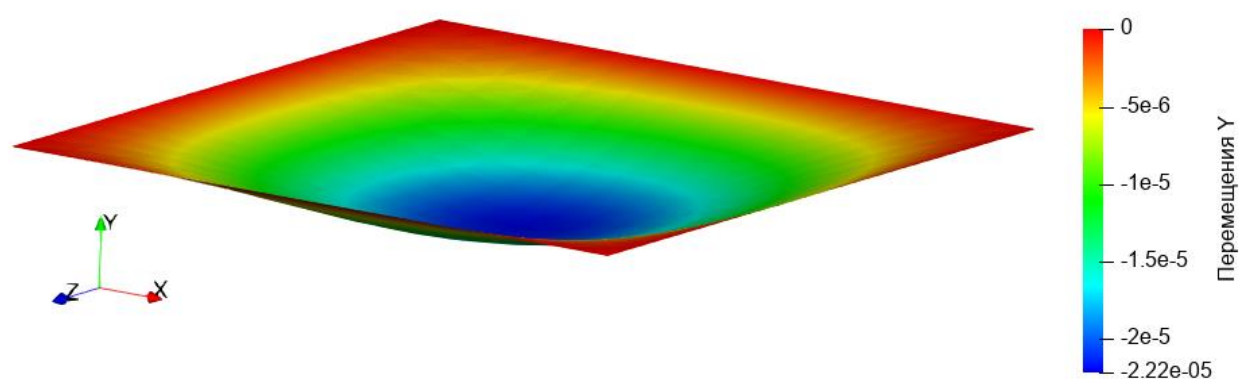
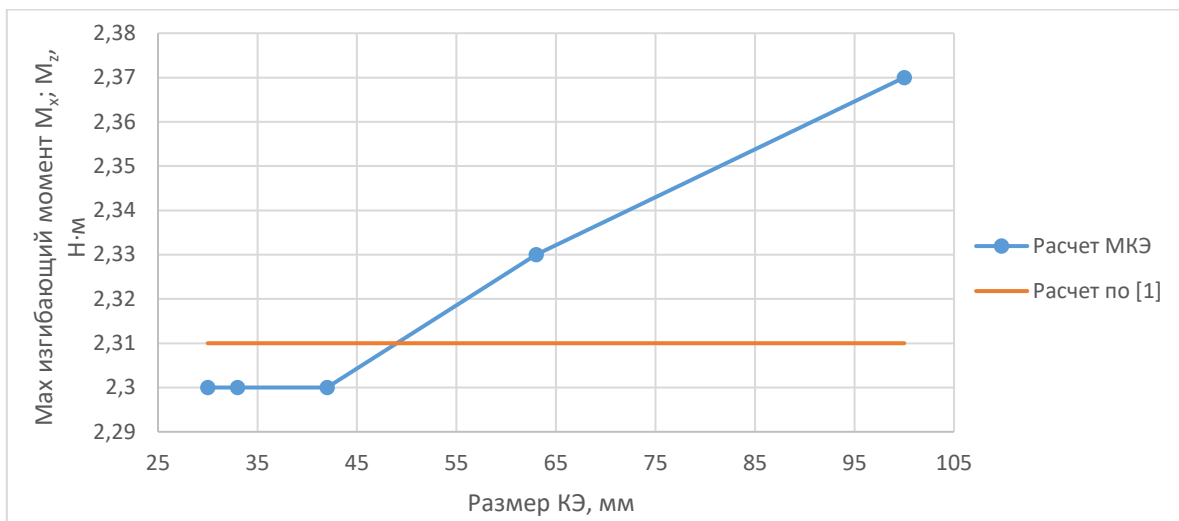


Рисунок 4 – Вертикальные перемещения Δy пластины 1×1 м при $\delta=0,01$ шарнирно-опертой по контуру

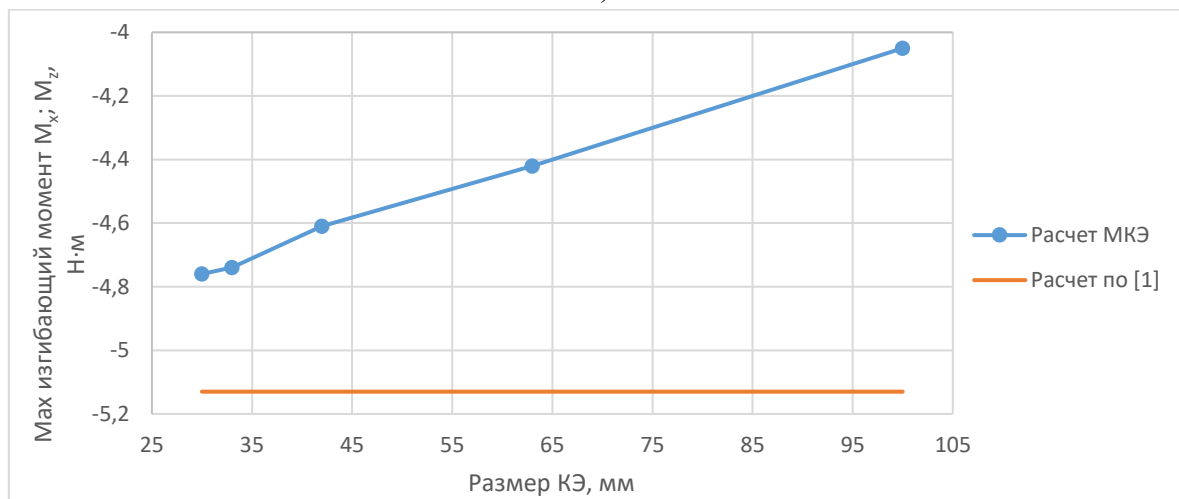
Кроме шарнирно-опертых по контуру пластин в исследовании рассматривались пластины защемленные по четырем сторонам. Полученные результаты расчета представлены в таблице 2 и на рисунках 5.

Таблица 2 – Значения изгибающих моментов $M_x = M_z$ в середине пролета и в заделке, вертикальных перемещений Δy для пластины 1×1 м защемленной с двух сторон

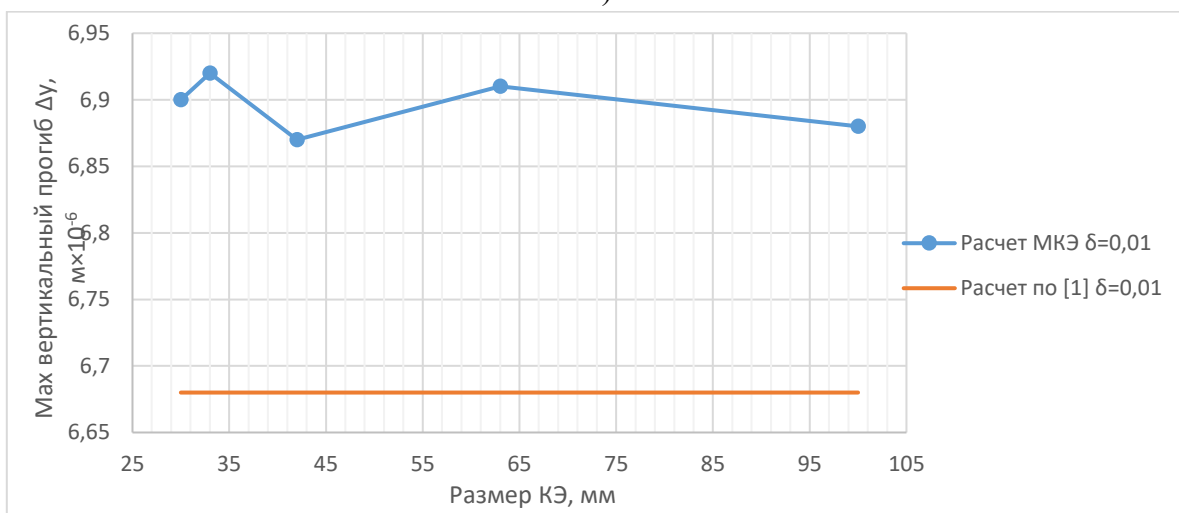
Показатели	по [1]	10×10	16×16	23×23	30×30	33×33
$M_x=M_z$ в пролете, Н·м	2,31	2,37	2,33	2,3	2,3	2,3
Расхождение, %	-	2,59	0,87	0,43	0,43	0,43
$M_x=M_z$ в заделке, Н·м	-5,13	-4,05	-4,42	-4,61	-4,74	-4,76
Расхождение, %	-	21,1	13,8	10,1	7,6	7,21
Δy , м $\times 10^{-6}$ (при $\delta=0,01$)	6,68	6,88	6,91	6,87	6,92	6,90
Расхождение, %	-	2,99	3,44	2,84	3,59	3,29



а)



б)



в)

Рисунок 5 – График зависимости значений:

а) изгибающих моментов $M_x; M_z$ в середине пролета; б) изгибающих моментов $M_x; M_z$ в заделке; в) вертикального прогиба Δy от размера конечного элемента для пластины 1×1 м шарнирно-опертой по контуру

Из графика видно, что значения изгибающих моментов в середине пролета (рисунок 5, а), полученные по аналитическим зависимостям и данным численного расчета, соответствуют. При размере конечного элемента 63 мм расхождение составило менее 1 %. Дальнейшее уменьшение размера КЭ не привело к существенному изменению рассматриваемых значений.

Анализ величин изгибающего момента в заделке (рисунок 5, б) показал, что с уменьшением размера конечного элемента наблюдается значительное увеличение значения. Также следует отметить, что значение, полученное по аналитическим зависимостям, больше полученного при расчете МКЭ на 7–21 %. При этом с уменьшением размера КЭ расхождение снижается.

Величина вертикальных перемещений пластины постоянной толщины $\delta = 0,01$ в середине пролета (рисунок 5, в), полученная по результатам численного моделирования и аналитическом решении, отличается на 3–4 %. При этом размер конечного элемента не оказывает влияния на результат. Деформированная схема пластины постоянной толщины, защемленной по контуру, представлена на рисунке 6.

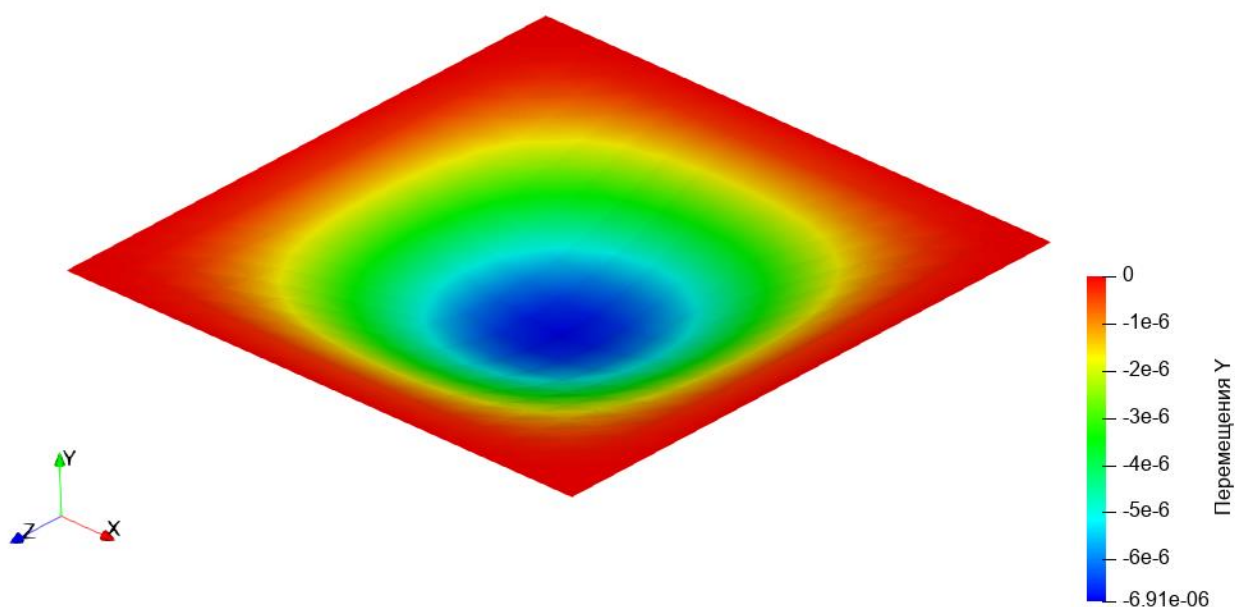


Рисунок 6 – Вертикальные перемещения Δy пластины 1×1 м при $\delta = 0,01$, защемленной по контуру

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Расчет методом конечных элементов пластин постоянной жесткости в программном комплексе CAE Fidesys позволяет определять величину изгибающих моментов и прогибов с допустимой погрешностью (менее 7 %).
2. Размер конечного элемента влияет на точность результата расчета. С уменьшением размера КЭ погрешность величины изгибающего момента и прогиба, по сравнению с аналитическим расчетом, снижается.
3. Для пластин шарнирно-опертых по контуру сходимость решения была достигнута при размере КЭ 100 мм, защемленных по контуру – 30 мм. Таким образом, при наличии жесткого закрепления кромок пластины при численном моделировании следует использовать КЭ меньшего размера.
4. Верификация расчетных моделей позволяет подтвердить правильность моделирования элементов конструкций и исправить ошибки построения модели, а также оценить сходимость решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прочность. Устойчивость. Колебания: справочник: в 3 т. / под общ. ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – Москва, 1988. – Т. 1. – 384 с.
2. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва, 1986. – 318 с.
3. Шайдуров, В. В. Многосеточные методы конечных элементов / В. В. Шайдуров. – Москва, 1989. – 288 с.
4. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов: в 2 т. / С. П. Тимошенко. – Москва, 1965. – Т. 1: Элементарные теории и задачи. – 364 с.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов. Верификация методик расчета на прочность: НП-105-18. – Москва, 2018. – 27 с.

6. Тарасов, И. И. Верификация программного комплекса Fidesys при решении задач теории упругости / И. И. Тарасов, А. В. Ткачев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы международной конференции. – Красноярск, 2020. – Т. 1. – С. 98–100.

VERIFICATION OF FINITE ELEMENT MODELS OF CONSTANT STIFFNESS PLATES IN ASSESSING THEIR STRESS-STRAIN STATE

A. A. Shilova, V. R. Sinyukova, A. S. Lavrova

The paper verifies finite element models of rectangular plates of constant stiffness, created in the CAE Fidesys software package, by comparing numerical results with analytical solutions for various boundary conditions of edge fastening (simply supported and fixed support along the contour). The influence of mesh density on the accuracy of determining bending moments and deflections was investigated. Sufficient agreement between the results of numerical and analytical calculations was established, confirming the reliability of calculations in CAE Fidesys. It was found that in the presence of rigid fixation of the plate edge, smaller finite elements should be used.

В работе выполнена верификация конечно-элементных моделей прямоугольных пластин постоянной жесткости, созданных в программном комплексе CAE Fidesys путем сравнения численных результатов с аналитическими решениями для различных граничных условий закрепления кромок (шарнирное опирание и защемление по контуру). Исследовано влияние густоты сетки на точность определения изгибающих моментов и прогибов. Установлено достаточное согласование результатов по данным численного и аналитического расчетов, подтверждающее достоверность расчетов в CAE Fidesys. Выявлено, что при наличии защемления кромки пластины следует использовать конечные элементы меньшего размера.

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК

Редактор Е. Билко

Подписано в печать 09.07.2026 г. Формат 60 × 90 1/16.
Уч.-изд. л. 4,8. Печ. л. 6,6. Тираж 32 экз. Заказ № 34

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1