

16+

ISSN: 2949-558X

ВЕСТНИК

Керченского Государственного
Морского Технологического Университета

СЕРИЯ

Морские Технологии

Выпуск 1
2025

Рецензируемое научное издание «Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии» зарегистрировано как средство массовой информации (СМИ) и издается в соответствии с Законом Российской Федерации от 27.12.1991 № 2124-1 «О средствах массовой информации», Федеральным законом от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», уставом ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». Учредитель научного сетевого издания «Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии» – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет». Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-85910 от 04 сентября 2023 г.

Редакционный Совет журнала

Главный редактор:

Виноградов Владимир Николаевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры судовождения и промышленного рыболовства

Заместитель главного редактора:

Ивановская Александра Витальевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок

Редакционная коллегия журнала

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Авдеев Б.А.
Горелов С.В.
Емельянов В.А.
Каторин Ю.Ф.
Нырков А.П.
Саушев А.В.
Сычев Ю.А.
Титов И.Л.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)

Викулов С.В.
Ениватов В.В.
Жуков В.А.
Кирюхин А.Л.
Конюков В.Л.
Матвеев Ю.И.
Николаев Н.И.
Халявкин А.А.

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки)

Васьков А.С.
Виноградов В.Н.
Ермаков С.В.
Ивановский Н.В.
Пашков Д.П.
Субанов Э.Э.
Хекерт Е.В.

Уманец В.А. – ответственный секретарь

Бобарыкин О.В. – технический редактор, компьютерная верстка

Статьи в журнале издаются на русском и английском языках.

Позиция автора публикаций может не совпадать с точкой зрения редакционного совета и редакционной коллегии журнала.

Издается по решению НТС ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», протокол № 2 от 25.03.2025 г.

Адрес: 298309, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

E-mail: mor.tech@vestnik-kgmtu.ru

Web: <https://mtjv.ru/>

Редакционная коллегия журнала

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

1. Авдеев Борис Александрович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства
2. Горелов Сергей Валерьевич – действительный член РАЕН, доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», заведующий кафедрой ЭСЭ
3. Емельянов Виталий Александрович – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», профессор кафедры бизнес-информатики
4. Каторин Юрий Федорович – доктор воен. наук, профессор ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
5. Нырков Анатолий Павлович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
6. Саушев Александр Васильевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой ЭПиЭОБУ
7. Сычев Юрий Анатольевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики
8. Титов Иван Леонидович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)

1. Викулов Станислав Викторович – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», заведующий кафедрой «Физики, химии и инженерной графики»
2. Ениватов Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», заведующий кафедрой кафедры судовых энергетических установок
3. Жуков Владимир Анатольевич – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой судостроения и энергетических установок
4. Кирюхин Александр Львович – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатации СЭУ ЧВВМУ имени П.С. Нахимова
5. Конюков Вячеслав Леонтьевич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры судовых энергетических установок
6. Матвеев Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» г. Нижний Новгород, зав. кафедрой «Эксплуатация судовых энергетических установок»
7. Николаев Николай Иванович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», профессор

кафедры эксплуатации судовых механических установок

8. Халявкин Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент, Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина - филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», доцент кафедры судомеханических дисциплин

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки)

1. Васьков Анатолий Семенович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», профессор кафедры судовождения
2. Виноградов Владимир Николаевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», профессор кафедры судовождения и промышленного рыболовства
3. Ермаков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», директор Морского института
4. Ивановский Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», декан морского факультета, заведующий кафедрой судовождения и промышленного рыболовства
5. Пашков Дмитрий Павлович – доктор техн. наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, старший преподаватель кафедры судовождения
6. Субанов Эркин Эргешевич – канд. техн. наук, Начальник дипломного отдела, Службы капитана морского порта Новороссийск, ФГБУ «АМП Черного моря»
7. Хекерт Евгений Владимирович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», проректор по учебной и научной работе

СОДЕРЖАНИЕ

Научная специальность 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

Вынгра А.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В СЕТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

6

Кошевой Д.О., Бордюг А.С., Пласта О.А.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

16

Научная специальность 2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Ениватов В.В., Сапожников Ф.В., Ухин В.И., Полянский Ю.В.

БИООБРАСТАНИЕ И БИОКОРРОЗИЯ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

24

Жуков В.А., Кротовская Е.А.

ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

34

Ивановская А.В., Ивановский А.Н., Афанасьев В.В., Мельник В.Д.

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА РЫБОПРОМЫСЛОВОМ СУДНЕ: КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

42

Конюков В.Л., Богатырева Е.В.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

54

Халявкин А.А., Ивановская А.В., Ениватов В.В.

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗИНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

64

Научная специальность 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

Иванова О.А., Михайлова Т.В., Никонова Е.А., Родькина А.В.

СУДА С ИНВЕРСНЫМ НОСОМ ДЛЯ АРКТИКИ

71

Вынгра А.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В СЕТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация. Рассмотрено проектирование и реализация экспериментального проекта подключения солнечной электростанции к сети электроснабжения на примере образовательной организации. Интеграция производится для детального анализа возможностей применения твердотельного трансформатора в сравнении с применением бестрансформаторного инвертора. В результате проведенных исследований заключено, что предлагаемый ТТТ, используемый как компонент интеграции электроэнергии солнечных панелей в сеть электроснабжения, не уступает импортным инверторам по параметрам качества электроэнергии, превосходит их по параметрам количества режимов работы и гибкости. Также определено, что ТТТ незначительно уступает инверторам в части эффективности и коэффициента полезного действия, ввиду наличия в нем дополнительной высокочастотного звена. Дальнейшие исследования будут посвящены дальнейшему совершенствованию конструкции с целью повышения надёжности, эффективности и функциональности ТТТ в распределённых интеллектуальных сетях электроснабжения.

Ключевые слова: солнечная электростанция, инвертор, твердотельный трансформатор, возобновляемые источники электроэнергии.

Vyngra A.V.

A EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTEGRATION OF A SOLAR POWER PLANT INTO THE POWER SUPPLY NETWORK USING A SOLID STATE TRANSFORMER

Abstract. The design and implementation of an experimental project for connecting a solar power plant to the power supply network is considered on the example of an educational organization. Integration is performed for a detailed analysis of the possibilities of using a solid-state transformer in comparison with the use of a transformer-free inverter. As a result of the conducted research, it was concluded that the proposed SST, used as a component of the integration of electricity from solar panels into the power supply network, is not inferior to imported inverters in terms of electricity quality parameters, surpasses them in terms of the number of operating modes and flexibility. It is also determined that SST is slightly inferior to inverters in terms of efficiency and efficiency, due to the presence of an additional high-frequency link in it. Further research by the author will be devoted to further improving the design in order to increase the reliability, efficiency and functionality of SST in distributed intelligent systems..

Keywords: solar panels, alternative energy sources, inverter, solid-state transformer.

Введение. В настоящее время широкое распространение получают альтернативные источники электроэнергии, в первую очередь солнечные электростанции. Несмотря на то, что мощности промышленных солнечных электростанций достигают сотен мегаватт, большое количество частных домовладений и малых предприятий также оборудуются солнечными панелями мощностью до десятков киловатт. При сохранении текущего роста распространения солнечной энергетики к 2050 году использование фотогенерации может составить около 25 % всей мировой выработки электроэнергии. Наиболее часто используемым вариантом использования являются гибридные электростанции, позволяющие поддерживать совместную работу с сетью, а в темное время суток работающие от аккумуляторных батарей. Остаётся актуальной проблема интеграции энергии постоянного тока солнечных панелей в сети переменного тока, которая частично решается солнечными инверторами, но в дальнейшем требует более эффективного и гибкого устройства, позволяющего делать солнечные

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

электростанции составной частью интеллектуальных сетей электроснабжения.

Солнечные электростанции (СЭС) – это инженерные сооружения, состоящие из фотоэлектрических модулей и преобразователей, позволяющие преобразовывать энергию солнечного света (солнечной радиации) в электрическую энергию. Существуют различные топологии подключения панелей в сеть электроснабжения, требующие инверторы различных видов и позволяющие преобразовывать постоянный ток источника в переменный ток сети с различными уровнями эффективности.

Коэффициент полезного действия панелей обычно составляет не более 20 %, дополнительно каждый этап преобразования и передачи энергии создает дополнительные потери, что в итоге снижает эффективность солнечной электростанции в целом. В настоящее время существует проблема снижения потерь преобразования и достижения более эффективного применения энергии солнечного света.

Ряд современных ученых посвящают свои труды попыткам решения аналогичной проблемы. Так, в работе [1] авторами рассматриваются оценка аппаратного обеспечения и моделирование фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии. Рассмотрены показатели качества выходного напряжения, влияющие на эффективность преобразования и передачи энергии. Предложено улучшение показателей за счет управления коэффициентом мощности. Авторами работ [2] предложены современные способы улучшения эксплуатационных характеристик солнечных инверторов за счет применения в его структуре однофазных силовых электронных схем, как правило, выполненных на двух силовых полупроводниковых приборах. В этом случае, трёхфазная симметричная система напряжений получается однофазно-трёхфазным трансформатором с вращающимся магнитным полем. Такие трансформаторы выполняются на базе магнитной системы электрических машин или тороидальных трансформаторов.

В статье [3] с целью обоснования выбора типа инвертора на основании разработанной программы посредством спектрального анализа исследуются формы генерированного напряжения, их искажения относительно синусоидальной и частотные спектры сравнительно для инвертора напряжения и инвертора тока. Определяются величины коэффициентов искажения. Обосновано, что инверторы тока обеспечивают меньшие искажения напряжения относительно инверторов напряжения – более чем в два раза, как для фазовых, так и для линейных напряжений. Установлено, что в солнечных электростанциях по критерию искажения формы выходного напряжения и коэффициенту полезного действия более целесообразно использование инверторов тока, нежели инверторов напряжения.

Целью работы является экспериментальное исследование решения проблемы эффективности и гибкости преобразования альтернативной солнечной энергии и передачи ее в силовую сеть путем применения новейших разработок твердотельного трансформатора.

Описание проекта солнечной электростанции. Для реализации лабораторной исследовательской установки солнечной электростанции и проведения эксперимента спроектирована и установлена автономная солнечная электростанция, мощностью 7 кВт*ч/сутки, включающая 6 солнечных панелей по 280 Вт, аккумулятор 100 Ач и солнечный инвертор на 2 кВт с пиковой мощностью до 4 кВт.

Устанавливаемые солнечные панели характеризуются низким уровнем снижения мощности, не превышающим 20 % за 25 лет интенсивной эксплуатации. Коэффициент полезного действия преобразования солнечной энергии 17,11 %. Следовательно, у каждой панели установленный запас мощности выше номинального до +3 %, что позволяет осуществлять высокую выработку мощности даже при пасмурной погоде или затенении.

Для сравнения данных работы твердотельного трансформатора с импортными устройствами инвертирования в проекте предусмотрено использование солнечного автономного инвертора GWS-Energy мощностью 2 кВт. В зависимости от различных ситуаций инвертор предназначен для непрерывной подачи энергии на нагрузку от фотоэлектрических модулей, аккумулятора или централизованной сети. Устройство не обладает функцией подмешивания, а только лишь работает в режиме переключения между источниками питания.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Работа такого инвертора невозможна без дополнительных аккумуляторных батарей, поэтому установка также оснащена свинцово-углеродными аккумуляторами. Рассмотренные аккумуляторы являются дополнительным источником питания не только для инвертора, а и для рассматриваемого ниже твердотельного трансформатора.

Вид солнечных модулей и инвертора приведен на рисунке 1. Снижение установленной мощности фотоэлектрических модулей GWS не превышает 10 % за первые 12 лет и 20 % за 25 лет интенсивной эксплуатации [4].



а) б)
Рисунок 1 – а) солнечные панели, б) инвертор

Описание твердотельного трансформатора. Твердотельный трансформатор (ТТТ) – это преобразователь переменного тока с звеном постоянного тока и высокочастотной гальванической развязкой. Применение такого устройства для интеграции альтернативных источников электроэнергии целесообразно и удобно ввиду возможности быстрого управления выходным напряжением при изменении параметров как источника, так и потребителя. Используемый для сравнения бестрансформаторный солнечный инвертор представляет собой силовое электронное устройство, в котором сочетаются функции инвертора контроллера заряда аккумуляторов от солнечных батарей и зарядного устройства аккумуляторов от внешней сети для обеспечения бесперебойной подачи питания, с возможностью выбора приоритетов зарядки и нагрузки. В рассматриваемой установке нет необходимости использовать вход переменного тока и выпрямитель ТТТ, так как солнечные панели вырабатывают постоянный ток, подводимый к звену постоянного тока ТТТ. Вид разработанного твердотельного трансформатора приведен на рисунке 2. Проведенные ранее исследования [5] функциональных частей ТТТ (выпрямителя, импульсного трансформатора, инвертора) позволили подобрать оптимальную конфигурацию для обеспечения точности преобразования электрического тока.



Рисунок 2 – Твердотельный трансформатор

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Функциональная схема реализованной лабораторной установки солнечной электростанции приведена на рисунке 3. Согласно технической документации, рабочее напряжения постоянного тока входа от солнечных панелей составляет 30-115 В. Вырабатываемое напряжение одной панелью в пике нагрузки составляет 36 В. Таким образом, при подключении панелей параллельно группами по 3, напряжение составит 72 В, что допустимо по параметрам инвертора.

Первичное звено постоянного тока ТТТ (выход выпрямителя от сети) получает питание от линии 72 В постоянного тока солнечных панелей. Вторичное звено постоянного тока (выход выпрямителя от вторичной обмотки силового импульсного трансформатора) соединено с аккумуляторными батареями, что позволяет заряжать их от питания солнечных панелей, а в случае отсутствия этого питания продолжать подавать напряжение 24 В на инвертор ТТТ. В качестве нагрузки выступают нагревательные приборы, не требующие высоких показателей качества электроэнергии. Ток, мощность, показатели качества электроэнергии и др. параметры электросети регистрируются измерительными приборами.

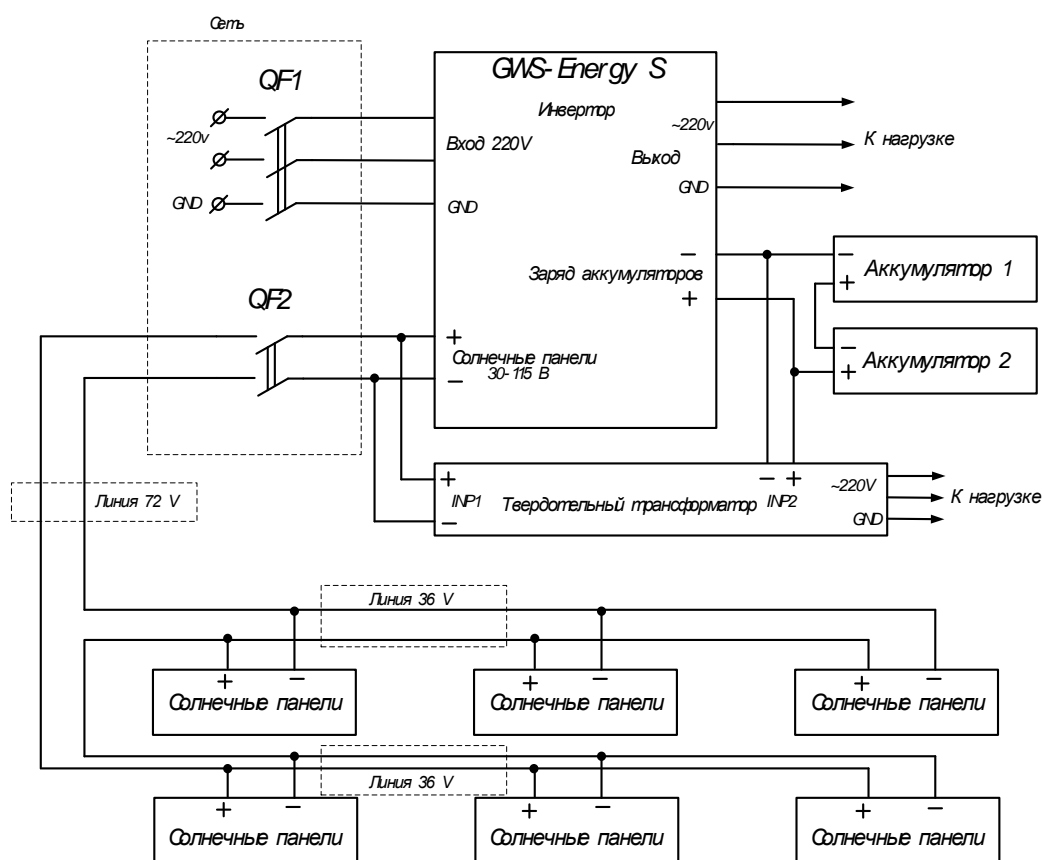


Рисунок 3 – Функциональная схема лабораторной установки

Исследование на рассмотренной установке позволит проанализировать характеристики, режимы работы, эффективность и показатели качества электроэнергии, вырабатываемой солнечными панелями и преобразуемой с помощью импортного инвертора и ТТТ.

Эксперимент проводился отдельно с применением инвертора зарубежного производителя и с твердотельным трансформатором. При исследовании особое внимание уделялось следующим параметрам:

1) коэффициент полезного действия инвертора и ТТТ при питании от солнечных панелей:

$$\eta = \frac{U_H I_H}{U_{СП} I_{СП}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где U_H, I_H – действующее значение напряжения и тока нагрузки соответственно;

$U_{СП}, I_{СП}$ – напряжение и ток, выдаваемые солнечными панелями.

2) коэффициент полезного действия инвертора и ТТТ при питании от аккумуляторных батарей:

$$\eta = \frac{U_H I_H}{U_{АКБ} I_{АКБ}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $U_{АКБ}, I_{АКБ}$ – напряжение и ток, выдаваемые аккумулятором.

3) отклонение выходного напряжения на холостом ходу и при номинальной нагрузке для каждого из преобразователей (На основании ГОСТ 321440-2013 допустимые отклонения напряжения в точках электросети на границе с потребителями нормируются в пределах 10 % от номинального напряжения системы в течение 100-процентного временного интервала в 1 неделю):

$$\Delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где U и $U_{ном}$ – напряжение в рассматриваемом режиме и номинальное значение напряжения, В.

4) суммарный коэффициент гармонических составляющих выходного напряжения инвертора и ТТТ:

СКГС для СЭЭС определяется по формуле:

$$k_{U_{мод}} = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} \left(\frac{U_{p,k}}{U_{p,1}} \right)^2} \cdot 100\%; \quad (4)$$

где $U_{p,k}$ – среднеквадратичное значение напряжения подгруппы k -ой гармоники;
 k – порядок гармоники.

$$U_{p,k} = \sqrt{U_k^2 + \sum_{h=-1}^{h=k-1} U_{c,k+h}^2}, \text{ В} \quad (5)$$

где U_k – среднеквадратичное значение напряжения k -ой гармоники;

$U_{c,k}$ – среднеквадратичное значение спектральной составляющей, непосредственно прилегающей к k -ой гармоник;

h – порядок спектральной составляющей.

5) провал выходного напряжения инвертора и ТТТ при набросе мощной нагрузки (80 % от номинальной);

6) провал напряжения при кратковременном превышении нагрузки в два раза больше номинальной;

Численные результаты эксперимента по рассмотренным параметрам приведены в таблице 1.

При проведении исследований были приняты следующие допущения:

– потребитель считается идеально равномерной нагрузкой с прямолинейной ВАХ, не влияющий на источник напряжения;

– не учитывается погрешность измерительных приборов;

– принято, что солнечные панели вырабатывают в момент эксперимента для инвертора и ТТТ одинаковые значения мощности.

Таблица 1 – Результаты исследования

Параметр	Значения при работе ТТТ	Значения при работе инвертора GWS-Energy
ТНД выходного напряжения	7 %	6,7 %
Отклонение напряжения:		
- без нагрузки	1 %	0,5 %
- с номинальной нагрузкой	1 %	1,2 %
Провал напряжения		
- при изменении нагрузки от 0 до 80 % номинальной	6 %	8 %
- при изменении нагрузки от 100 до 200 % номинальной	25 %	18 %

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты эксперимента показывают схожесть значений исследуемых параметров. График зависимости коэффициента полезного действия от потребляемой нагрузкой мощности приведен на рисунке 4. На графике видно, что КПД заводского оборудования незначительно превышает КПД лабораторного образца ТТТ. Это обусловлено качеством сборки, а также наличием дополнительного звена высокочастотного преобразования. При незначительном снижении КПД передачи энергии ТТТ позволяет более гибко распределять энергию, а также имеет возможность подмешивания электроэнергии в сеть.

При изменении нагрузки от 0 до 80 % (скачкообразное подключение номинальной нагрузки) ТТТ более эффективно справляется с изменением напряжения ввиду наличия конденсаторов высокой ёмкости в звеньях постоянного тока.

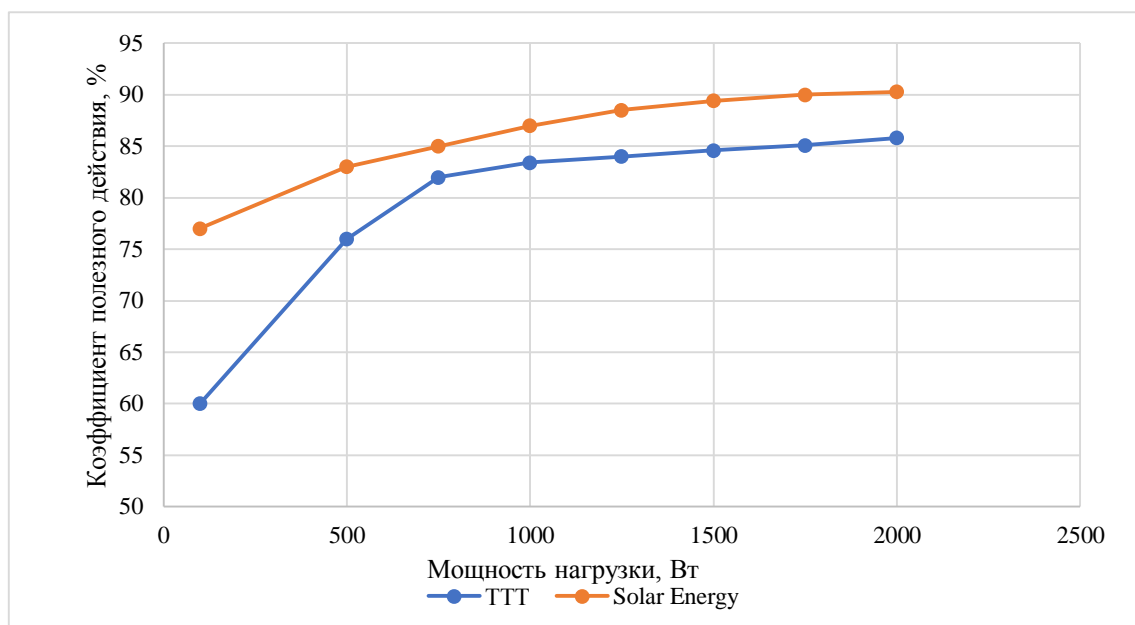


Рисунок 4 – КПД твердотельного трансформатора и типового инвертора Solar Energy при работе от солнечных панелей

Однако, в похожем случае наброса нагрузки выше номинальной провал напряжения ТТТ больше, чем у инвертора. В этом случае, из-за высоких токов, провал напряжения обратно пропорционален КПД исследуемого устройства. Отклонение напряжения, наблюдаемое при работе устройства значительно ниже предельно допустимого отклонения, регламентируемого ГОСТ. Остальные исследуемые параметры идентичны для обоих устройств, что показывает возможность применения ТТТ для интеграции альтернативных источников электроэнергии в сети электроснабжения.

Выводы. Установленное оборудование позволило произвести сравнительный анализ характеристик, режимов работы, эффективности и показателей качества электроэнергии рассматриваемых элементов интеграции электростанций в сеть. Приведены осциллограммы напряжений и токов при работе как солнечного инвертора, так и ТТТ. В результате проведенных исследований заключено, что предлагаемый ТТТ, используемый как компонент интеграции электроэнергии солнечных панелей в сеть электроснабжения, не уступает импортным инверторам по параметрам качества электроэнергии, превосходит их по параметрам количества режимов работы и гибкости. Также определено, что ТТТ незначительно уступает инверторам в части эффективности и коэффициента полезного действия, ввиду наличия в нем дополнительного высокочастотного звена. Последующие исследования будут посвящены дальнейшему совершенствованию конструкции с целью повышения надёжности, эффективности и функциональности ТТТ в распределённых интеллектуальных сетях электроснабжения.

Список использованной литературы:

1. *Singh P.K., Deo R.N., Vajpayee V., Verma V., Bajpai V.* Case Study of Synchronization of Solar Power Converter. In: Iqbal, A., Malik, H., Riyaz, A., Abdellah, K., Bayhan, S. (eds) Renewable Power for Sustainable Growth. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, Singapore. 2021. Vol. 723. DOI: 10.1007/978-981-33-4080-0_47.
2. *Бутузов В.А.* Солнечные инверторы с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками // Точки научного роста: на старте десятилетия науки и технологии: материалы ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2022 г. Краснодар. 2023. С. 832–833.
3. *Давидян Ж.Д., Тамразян М.Г., Арутюнян Л.А.* Анализ и выбор типа инверторов солнечных электростанций по критерию формы кривой напряжения // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2022. № 1. С. 49-66.
4. *Вынгра А.В., Авдеев Б.А.* Анализ годового использования солнечных панелей в на базе «КГМТУ» // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. 2024. № 3. С. 16–26.
5. *Авдеев Б.А., Вынгра А.В.* Экспериментальное исследование жёсткости выходной характеристики мостового преобразователя постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 4. С. 92–97.
6. *Авдеев Б.А., Вынгра А.В.* Анализ валового потенциала солнечной энергетики Керченского полуострова для интеграции в интеллектуальных сетях электроснабжения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 1. С. 5–12.
7. *Вынгра А.Н.* Перспективы развития альтернативной энергетики в Республике Крым // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: сборник трудов по материалам III Национальной научно-практической конференции. Керчь, 2022. С. 122–127.
8. *Гришина Е.А., Корчагина П.А.* Использование солнечных панелей при проектировании объектов среды // Оригинальные исследования. 2019. Т. 9. № 6. С. 34–48.
9. *Каримов Н.А.* Анализ эффективности контроллера отслеживания точки максимальной мощности на выходе солнечных панелей // Наукосфера. 2023. № 3-1. С. 130–134.
10. *Ершов С.В., Алтунин М.Э.* Методика определения нагрузок систем управления поворотом солнечных панелей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 197–202.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022617260. Расчет эколого-экономической эффективности внедрения солнечных электростанций А.Н. Вынгра, А.В. Вынгра, Б.А. Авдеев. 2022. Бюл. № 4.
12. *Вынгра А.В.* Разработка алгоритмов и программного обеспечения для силовых активных

фильтров судовых электроэнергетических систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 73–79.

13. Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Совершенствование системы регулирования напряжения твердотельного трансформатора в интеллектуальных сетях электроснабжения // Известия вузов. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 3. С. 64–69.
14. Cervero D., Fotopoulou M., Muñoz-Cruzado Alba J., Rakopoulos D. et al. Solid State Transformers: A Critical Review of Projects with Relevant Prototypes and Demonstrators // Electronics. 2023. Vol. 12. P. 931.
15. Huber J., Kolar J. Volume / Weight / Cost Comparison of a 1 MVA 10 kV / 400 V Solid-State against a Conventional Low-Frequency Distribution Transformer // Proc. Energy Conversion Congr. and Expo (ECCE). 2014. Vol. 10. P. 4545-4552.
16. Бурков А.Ф., Миханюшин В.В., Нгуен В.Х. Развитие прибрежного морского транспорта с гибридными энергоустановками на примере Дальневосточного региона // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 1. С. 102-114.
17. Кононенко С.В., Головки С.В., Надеев М.А., Павленко В.А. Применение солнечных батарей на объектах морской инфраструктуры // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. № 3. С. 101–106.
18. Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2016. 476 с.

References:

1. Singh P.K., Deo R.N., Vajpayee V., Verma V., Bajpai V. Case Study of Synchronization of Solar Power Converter. In: Iqbal, A., Malik, H., Riyaz, A., Abdellah, K., Bayhan, S. (eds) Renewable Power for Sustainable Growth. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, Singapore, 2021, vol. 723. (In English). DOI: 10.1007/978-981-33-4080-0_47.
2. Butuzov V.A. Solnechnyye invertory s uluchshennymi ekspluatatsionno-tekhnicheskimi kharakteristikami [Solar inverters with improved performance characteristics]. *Materialy yezhegodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley po itogam NIR za 2022 g «Tochki nauchnogo rosta: na starte desyatiletiya nauki i tekhnologii»* [Materials of the annual scientific and practical conference of teachers on the results of R&D for 2022 “Points of Scientific Growth: at the Start of the Decade of Science and Technology”]. Krasnodar, 2023, pp. 832–833. (In Russian).
3. Davidyan ZH.D., Tamrazyan M.G., Arutunyan L.A. Analiz i vybor tipa inverterov solnechnykh elektrostantsiy po kriteriyu formy krivoy napryazheniya [Analysis and selection of the type of inverters for solar power plants based on the criterion of the voltage curve shape]. *Vestnik Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Elektrotekhnika, energetika* [Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical Engineering, Power Engineering], 2022, no. 1, pp. 49-66. (In Russian).
4. Vyngra A.V., Avdeev B.A. Analiz godichnogo ispol'zovaniya solnechnykh panelej v na baze «KGMTU» [Analysis of annual use of solar panels at the KGMTU base] *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Morskie tekhnologii* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Series: Marine Technologies], 2024, no. 3, pp. 16-26. (In Russian).
5. Avdeev B.A., Vyngra A.V. Eksperimental'noe issledovanie zhyostkosti vyhodnoj harakteristiki mostovogo preobrazovatelya postoyannogo toka [Experimental study of the rigidity of the output characteristic of a DC bridge converter]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2023, vol. 66, no. 4, pp. 92–97. (In Russian).
6. Avdeev B.A., Vyngra A.V. Analiz valovogo potenciala solnechnoj energetiki Kerchenskogo

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

poluostrova dlya integracii v intellektual'nyh setyah elektrosnabzheniya [Analysis of the gross potential of solar energy of the Kerch Peninsula for integration into smart power grids]. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and Information Complexes and Systems], 2021, vol. 17, no. 1, pp. 5-12. (In Russian).

7. Vyngra A.N. Perspektivy razvitiya al'ternativnoy energetiki v Respublike Krym [Prospects for the Development of Alternative Energy in the Republic of Crimea]. *Sbornik trudov po materialam III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Obshchestvo, obrazovaniye, nauka v sovremennykh paradigmakh razvitiya»* [Collection of Papers Based on the Materials of the III National Scientific and Practical Conference “Society, Education, Science in Modern Development Paradigms”], Kerch, 2022, pp. 122–127. (In Russian).
8. Grishina E.A., Korchagina P.A. Ispol'zovanie solnechnykh panelej pri proektirovanii ob'ektov sredey [Use of solar panels in the design of environmental objects.] *Original'nye issledovaniya* [Original Research], 2019, vol. 9, no. 6, pp. 34–48. (In Russian).
9. Karimov N.A. Analiz effektivnosti kontrollera otslezhivaniya tochki maksimal'noj moshchnosti na vyhode solnechnykh panelej [Analysis of the efficiency of the controller for tracking the maximum power point at the output of solar panels]. *Naukosfera* [Naukosphere], 2023, no. 3-1, pp. 130–134. (In Russian).
10. Ershov S.V., Altunin M.E. Metodika opredeleniya nagruzok sistem upravleniya povorotom solnechnykh panelej [Methodology for Determining the Loads of Solar Panel Rotation Control Systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical Sciences], 2018, no. 12, pp. 197–202. (In Russian).
11. Vyngra A.N., Vyngra A.V., Avdeev B.A. *Raschet ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti vnedreniya solnechnykh elektrostanciy* [Calculation of the ecological and economic efficiency of the implementation of solar power plants]. Certificate of registration of the computer program no. 2022617260, 2022. (In Russian).
12. Vyngra A.V. Razrabotka algoritmov i programmogo obespecheniya dlya silovykh aktivnykh fil'trov sudovykh elektroenergeticheskikh sistem [Development of algorithms and software for power active filters of ship electrical power systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology], 2022, no. 2, pp. 73–79. (In Russian).
13. Avdeyev B.A., Vyngra A.V. Sovershenstvovaniye sistemy regulirovaniya napryazheniya tverdotel'nogo transformatora v intellektual'nykh setyakh elektrosnabzheniya [Improving the voltage regulation system of a solid-state transformer in intelligent power supply networks]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [News of Universities. Electromechanics], 2022, vol. 65, no. 3, pp. 64–69. (In Russian).
14. Cervero D., Fotopoulou M., Muñoz-Cruzado Alba J., Rakopoulos D. and ets. Solid State Transformers: A Critical Review of Projects with Relevant Prototypes and Demonstrators. *Electronics*, 2023, vol. 12, pp. 931. (In English).
15. Huber J., Kolar J. Volume / Weight / Cost Comparison of a 1 MVA 10 kV / 400 V Solid-State against a Conventional Low-Frequency Distribution Transformer. *Proc. Energy Conversion Congr. and Expo (ECCE)*, 2014, vol. 10, pp. 4545-4552. (In English).
16. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Nguyen V.H. Razvitiye pribreznogo morskogo transporta s gibridnymi energoustanovkami na primere Dal'nevostochnogo regiona [Development of coastal maritime transport with hybrid power plants using the example of the Far Eastern region]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov], 2021, vol. 13, no. 1, pp. 102-114. (In Russian).
17. Kononenko S.V., Golovko S.V., Nadeev M.A., Pavlenko V.A. Primeneniye solnechnykh batarey na ob'yektakh morskoy infrastruktury [Application of solar panels on marine infrastructure]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series:

18. Makliman V. *Proyektirovaniye transformatorov i drossseley. Spravochnik* [Design of transformers and chokes. Handbook]. Moscow, DMK Press Publ., 2016, 476 p. (In Russian).

Сведения об авторе / Information about author

Вынгра Алексей Викторович	канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 avyngra@mail.ru
Vyngra Aleksei Viktorovich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of Ship's Electrical Equipment and Automatization Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 avyngra@mail.ru

УДК 681.5

Кошевой Д.О., Бордюг А.С., Пласта О.А.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Аннотация. В последнее время эффективность судов является предметом обсуждения, при этом основное внимание уделяется повышению топливной эффективности, снижению вредного воздействия на окружающую среду из-за выбросов, а также сокращению времени работы и затрат на техническое обслуживание. В данной работе представлен анализ электрической нагрузки, снятой с судна типа Ro/Ro. Анализ полученных данных показывает, что нагрузка на дизельные двигатели, как правило, довольно низкая и не попадает в оптимальный диапазон нагрузки кривых удельного расхода топлива (УРТ) дизельных двигателей. Кроме того, предлагаются и сравниваются три различные конфигурации электростанции, включающие генераторы с фиксированной частотой вращения (дизельные двигатели), генераторные установки с переменной частотой и внедрение система аккумулирования энергии (САЭ). В системе управления энергией используются алгоритмы для оптимизации потребления ресурсов (СУЭ), основанные на использовании комбинированных целочисленных линейных программных (ЦЛП) решений. ЦЛП предлагают использовать алгоритмы для оптимального распределения энергии. ЦЛП сравниваются с алгоритмами СУЭ, при этом необходимо использовать логические операторы для построения аргументов и/или. По результатам исследования были выявлены наилучшие алгоритмы. СУЭ измененная конфигурация судна способствует увеличению его эффективности с точки зрения экономии экономия топлива и увеличение эффективности работы генератора.

Ключевые слова: судно, электростанция, алгоритм, энергопотребление.

Koshevoy D.O., Bordyug A.S., Plasta O.A.

DEVELOPMENT OF SHIP POWER PLANT CONTROL ALGORITHMS FOR EFFECTIVE ENERGY CONSUMPTION MANAGEMENT

Abstract. Ship efficiency has been a topic of discussion lately, with the main focus being on improving fuel efficiency, reducing the environmental impact due to emissions, and reducing operating time and maintenance costs. In this paper, an analysis of the electrical load taken from a Ro/Ro vessel is presented. The analysis of the obtained data shows that the load on the diesel engines is generally quite low and does not fall within the optimal load range of the specific fuel consumption (SFC) curves of the diesel engines. Furthermore, three different power plant configurations are proposed and compared, including fixed-speed generators (diesel engines), variable-frequency generator sets, and the introduction of an energy storage system (ESS). The energy management system uses algorithms for resource consumption optimization (RCO), based on the use of combined integer linear program (ILP) solutions. ILP proposes to use algorithms for optimal energy allocation. ILP are compared with the RCO algorithms, while it is necessary to use logical operators to construct the and/or arguments. The results of the study revealed the best algorithms. The modified configuration of the vessel contributes to increasing its efficiency in terms of fuel economy and increasing the efficiency of the generator.

Keywords: ship, power plant, algorithm, energy consumption.

Введение. Морские перевозки являются одним из наиболее эффективных способов перевозки сырой нефти, контейнерных грузов и сыпучих материалов. Это приводит к увеличению выбросов с судов как части глобального объема парниковых газов. Если рассматривать их с этой точки зрения, то правила Международной морской организации (ИМО) и Европейского союза (ЕС), касающиеся морского транспорта, очевидно, направлены на сокращение глобальных выбросов в результате судоходства и повышение энергоэффективности судовых механизмов (ИМО 2016; ИМО, МЕРС 63/23 2012; ИМО,

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

MEPC.1/Circ.684 2009; Регламент (ЕС) 2015/757, 2015). Оптимизация работы генераторов для экономии электроэнергии и топлива, удельного расхода топлива сокращение потребления топлива помогает снизить выбросы парниковых газов и соответствует глобальным целям по охране окружающей среды. ИМО созданы ограниченные зоны выбросов, где действуют строгие правила по допустимым выбросам. NOx, SOx в перспективе суда будут обязаны заходить в порт без выбросов, требуя накопления энергии и улучшенных алгоритмов управления, что способствует развитию полностью электрических судов.

Энергетической установкой современного судна управляют с помощью специальных систем и технологий – эта сложная задача охватывает различные области, включая двигатели, электроэнергию, аккумуляторы, управление техникой, морские операции и безопасность [1-3].

Данные, полученные с судна, находящегося в эксплуатации.

Объектом исследования являлся паром проекта «Победа» (ИМО: 9657222, MMSI: 273373370).

В таблице 1 представлена конфигурация силовой установки.

Таблица 1 – Данные о настройках парома и информация о наборе данных

Параметр/Компоненты	Значение
2* Дизельный двигатель	1200 кВт
2* Дизельный двигатель	640 кВт
Силовая установка: 2* Гребные установки на корме и носу парома	1200 кВт
Набор данных: Время Частота выборки	≈ 24 часа 1 Гц

Как видно из таблицы, судно имеет два малых генератора (G2 и G3) и два больших генератора (G1 и G4), а также две гребные установки два датчика на судне – на корме и на носу. Сбор данных начался в 13:00 и закончился к следующему дню в то же время с частотой 1 Гц. Был охвачен 24-часовой период. На графике показаны профили нагрузки и мощности генераторов.

Паром проводит 40 переправ в течение 24 часов, каждая занимает около 25 минут. Это показывает два различных режима работы – транзит и швартовка. На рис. 1а, изображающем профиль нагрузки за сутки, судно загружалось различными грузами, поэтому лучше выбирать этот период для переправы. При задержке, во время морского перехода, паром не снижает скорость перед приближением к причалу, а меняет направление движения силовых установок для замедления. Для этого запускается дополнительная генераторная установка. На рис. 1б, где генераторная установка 3G через 1 час и через 2,5 часа после начала работы включается генераторная установка для сбора данных. Этот процесс неэкономичен из-за дополнительных расходов на энергию. Перед ночными переходами паром делает перерыв, во время которого происходит смена экипажа, а между 7 и 9 утра запланированы ночные переходы с большим временем между ними, что замедлит скорость парома. Это можно увидеть на рис. 1а, в период с 9 до 15 часов происходит снижение общей нагрузки, что отражается на мощности каждой генераторной установки на рис. 1 б. Утренний пик начинается около 17 часов после ночи, что приводит к увеличению темпа переправ парома в течение дня.

На рис. 1б отмечается, что у каждой генераторной установки, работающей в сети, различная нагрузка. Наименьшая из них – младшая генераторная установка. Генератор, работающий на протяжении рабочего дня, использует 263 кВт энергии, что составляет 42 % от общей мощности генератора.

Во время перерыва в работе энергия не расходуется. Генератор работает с низкой мощностью в порту – всего 21 кВт (3,3 %), что ниже обычного уровня в 60 кВт (9,4 %).

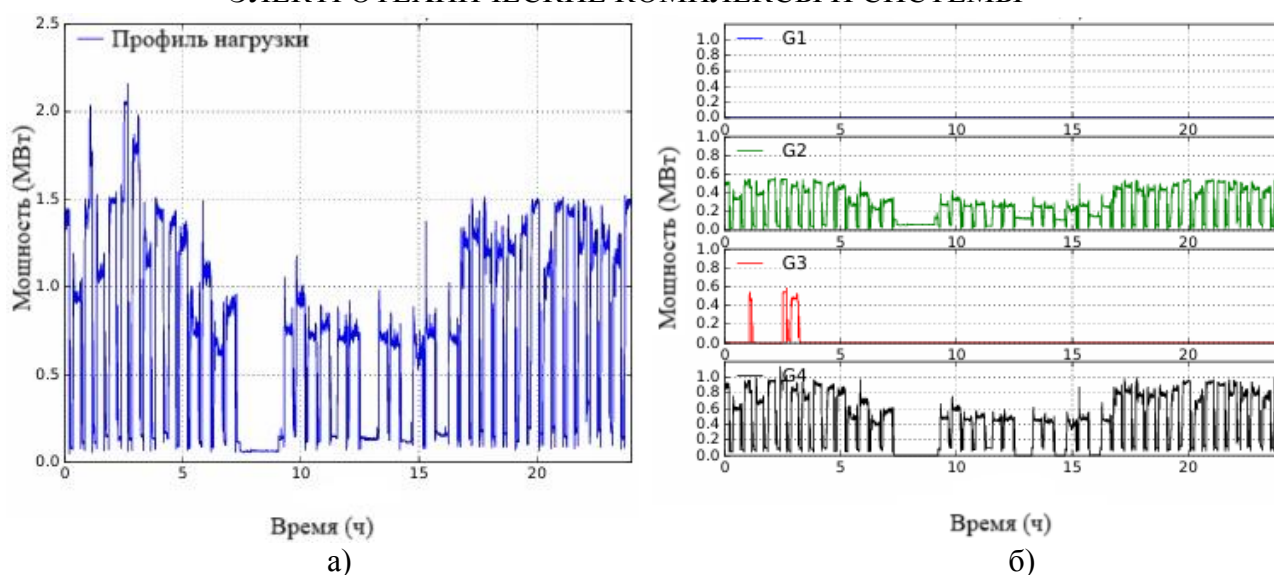


Рисунок 1 – Измеренные данные с парома (продолжительность каждого перехода – около 25 минут): (а) показывает профиль нагрузки судна, а (б) показывает мощность, выработанную (и полученную) каждой генераторной установкой

Таблица 2 содержит данные, взятые во время исследования на судне о минимальной, максимальной и средней нагрузке генераторных установок. Рейтинг генераторных установок низкий из-за плохих результатов. УРТ повышение нагарообразования в первичных преобразователях может привести к более частым обслуживаниям двигателей. Во время швартовки необходимо контролировать работу генераторов, обеспечивая оптимальную загрузку и координируя запуск и остановку в соответствии с циклами зарядки и разрядки АКБ.

Таблица 2 – Максимальная, минимальная и средняя загрузка генераторной установки

Генераторная установка	Минимальная мощность	Максимальная мощность	Средняя мощность
G1	0 кВт (0,0 %)	0 кВт (0,0 %)	0 кВт (0,0 %)
G2	21 кВт (3,3 %)	567 кВт (88,6 %)	263 кВт (41,1 %)
G3	40 кВт (6,3 %)	587 кВт (91,7 %)	355 кВт (55,5 %)
G4	37 кВт (3,1 %)	1136 кВт (94,7 %)	517 кВт (43,1 %)

Алгоритмы системы управления энергопотреблением (СУЭ). Общая задача системы управления энергией – распределять нагрузку [1-5] и обеспечить непрерывное и надежное электроснабжение всех потребителей, включая тех, для которых это критически важно. САЭ необходимо контролировать емкость и циклы заряда/разряда, для повышения топливной экономичности и снижения выбросов выпускных газов. Важно защищать окружающую среду и соблюдать установленные нормы по выбросам, введенных ИМО. Для поддержания работы судов необходимо проводить техническое обслуживание дизельных двигателей каждые 1000 часов, включая замену масла. Дополнительные цели – сокращение времени работы каждой генераторной установки и согласование часов работы для планирования обслуживания нескольких двигателей. Разработка СУЭ включает в себя определение требований, проектирование архитектуры, создание прототипа и тестирование функционала, модельного прогнозирования. Анализ динамических состояний позволяет предсказывать поведение системы при запуске и остановке генераторов, что помогает оптимизировать ее работу. Хотя такой подход интересен в управлении, многие факторы неизвестны или представлены в виде стохастических распределений, что затрудняет их практическую реализацию. Речь идет о комбинированном целочисленном нелинейном программировании (СЦНП), необходимом для исследования оптимизации линейных алгебраических моделей, основанных на балансах мощности и энергии. Баланс мощности учитывает соотношение генерируемой мощности и

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

запроса мощности на нагрузку, а энергетический баланс позволяет прогнозировать состояние заряда. САЭ. Предложены три алгоритма СЦНП для эффективного управления энергопотреблением судна, оснащенного 4 генераторами.

1) 4 энергетические установки с постоянной частотой вращения.

2) в установке есть три генератора с постоянной скоростью и один генератор с изменяемой скоростью.

3) 4 генераторные установки работают на постоянной частоте вращения САЭ.

Предполагается, что оптимальный режим работы генераторных установок достигается при постоянной частоте вращения. Удельный расход топлива при работе на 80% нагрузки, генератор с изменяемой скоростью вращения может работать в диапазоне от 10% до 90% от номинала. САЭ у батареи есть установленные значения максимальной и минимальной мощности (кВт/ч), а также ограничения на скорость заряда и разряда (кВт).

Алгоритм смешанного целочисленного линейного программирования. В таблице 3. Далее обсуждаются алгоритмы СЦНП, рассматриваемые в данной работе, а также логические алгоритмы.

Таблица 3 – Математические обозначения и описание

Условные обозначения	Описание
k	Шаг дискретного времени
$P_L(k)$	Потребность в мощности нагрузки в момент времени k
$p_{g,i}^{max}$	Максимальная мощность генератора i (кВт)
$p_{g,i}^{min}$	Минимальная мощность генератора i (кВт)
$p_{g,i}^{opt}$	Оптимальная загрузка генератора i по УРТ(кВт)
$P_{g,i}(k)$	Мощность генератора i в момент времени k (кВт)
$E_{g,i}^{opt}(k)$	Энергетическая мощность генератора i в реальном времени в момент времени k , при оптимальной загрузке
E_{ess}^{max}	Максимальная энергетическая мощность СНЭ (кВт-ч)
E_{ess}^{min}	Минимальная энергоемкость СНЭ (кВтч)
$E_{ess}(k)$	Энергоемкость СНЭ в момент времени (k)
p_{ess}^{max}	Максимальная мощность (> 0) СНЭ (кВт)(Максимальная мощность разряда)
p_{ess}^{min}	Минимальная номинальная мощность (< 0) СНЭ(кВт)(Максимальная мощность заряда)
$P_{ess}(k)$	Мощность СНЭ в момент времени k (кВт)
$Q_{fuel,i}(k)$	Расход топлива для генератора i в момент времени k (кг)
$T_{g,i}(k)$	Количество часов работы генератора i
$S_{g,i}(k)$	Количество пусков/остановок генератора i
Δt	Максимальное время между каждым запуском алгоритма (с)
y_i	Целочисленная переменная принятия решения для планирования генератора i
q_p, q_s, q_t	веса для баланса мощности, количества пусков/остановок и часов работы, соответственно
$J(k)$	Целевая функция для времени k

Алгоритм СЦНП – это алгоритм линейного программирования с функцией ограничения равенства и неравенства, где некоторые переменные решения (управляющие переменные) являются целыми числами. В формулировках СЦНП используется минимальное число пусков/остановок и часов работы, учитывая все генераторы, т.е.

$$T_g^{min}(k) = \min\{T_{g,i}(k)\}, \quad (1)$$

$$S_g^{min}(k) = \min\{S_{g,i}(k)\}, \quad (2)$$

где $T_g^{min}(k)$ – минимальное количество часов работы, ч;
 $S_g^{min}(k)$ – минимальное количество пусков/остановок, циклы;
 $T_{g,i}(k)$ – количество часов работы генератора;
 $S_{g,i}(k)$ – количество часов работы генератора.
 Далее представлены формулы линейного программирования.
 1) 4 генератора с фиксированной скоростью вращения:
 min_{y_i} :

$$J(k) = q_p \sum_i (P_{g,i}(k)), \quad (3)$$

$$+ q_t \sum_i (T_{g,i}(k) - T_g^{min}(k)) * y_i, \quad (4)$$

$$+ q_s \sum_i (S_{g,i}(k) - S_g^{min}(k)) * y_i, \quad (5)$$

где $J(k)$ – целевая функция для времени k ;
 q_t – баланс часов работы;
 q_s – баланс количества пусков/остановок;
 y_i – переменные решения, $\{0,1\}$.

При условии

$$\begin{aligned} P_{g,i}(k) &= y_i * P_{g,i}^{opt}, \\ \sum_i (P_{g,i}(k)) &\geq P_L(k), \\ y_i &\in \{0,1\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_{g,i}(k)$ – мощность генератора в момент времени k (кВт);
 $P_L(k)$ – потребность в мощности нагрузки в момент времени k ;
 $P_{g,i}^{opt}$ – оптимальная загрузка генератора по УРТ (кВт);
 i – уставка генератора.

Причина, по которой $T_g^{min}(k)$ и $S_g^{min}(k)$ вычитаются из времени работы генераторов и количества пусков/остановок, соответственно, заключается в том, что минимизация выработки электроэнергии является основной целью и не должна отходить на второй план по сравнению с накопленным временем работы и количеством пусков/остановок. Кроме того, вычитания уравнивают время работы и количество пусков/остановок. $P_{g,i}^{opt}$ используется в первом наборе ограничений равенства (2), чтобы обязать все работающие генераторы с фиксированной скоростью в расчете мощности иметь приблизительно оптимальные условия загрузки в качестве приближения к графику работы генераторов.

2) 3 генератора с фиксированной скоростью и 1 генератор с изменяемой скоростью:

$min_{y_i, P_{g,i}(k)}$:

$$J(k) = q_p \sum_i (P_{g,i}(k)), \quad (7)$$

$$+ q_t \sum_j (T_{g,j}(k) - T_g^{min}(k)) * y_j, \quad (8)$$

$$+ q_s \sum_j (S_{g,j}(k) - S_g^{min}(k)) * y_j, \quad (9)$$

При условии:

$$\begin{aligned} P_{g,j}(k) &= y_i * P_{g,j}^{opt}, \\ P_{g,l}(k) &\leq T_{g,l}^{max}, \\ P_{g,l}(k) &\geq P_L(k), \end{aligned} \quad (10)$$

где j – фиксированная скорость генератора;

l – регулируемая скорость генератора.

Для достижения топливно-эффективной работы, при которой расход топлива и выбросы парниковых газов соответствуют потребностям нагрузки, генераторы должны работать с оптимальной нагрузкой

Для оптимальной нагрузки генераторов необходимо, чтобы работало не больше генераторных установок, чем требуется для удовлетворения потребностей нагрузки, что означает минимальный резерв мощности. Кроме того, при использовании генераторов с фиксированной частотой вращения применение генератора с регулируемой частотой вращения или СХЭ принесет дополнительную пользу, обеспечив гибкость выработки электроэнергии, и, таким образом, позволит еще больше сместить нагрузку генераторов с фиксированной частотой вращения в сторону оптимальной нагрузки [8-10].

Выводы. Исследование показывает, что улучшение работы энергоблоков возможно через изменение структуры электростанции и применение более эффективных алгоритмов системы управления энергией. Дальнейшие исследования будут включать в себя необходимость изучения изменения в работе генераторной установки и оценка затрат на инвестиции. Системы аккумулирования энергии нуждаются в дальнейшем исследовании из-за увеличившейся сложности. Возможности оптимизации морских операций ограничены жесткими требованиями классификационных организаций и работодателей судов

Список использованной литературы:

1. *Бордюг А.С.* Повышение надежности судового малооборотного дизеля в условиях дестабилизирующих воздействий: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / Александр Сергеевич Бордюг. СПб., 2018. 148 с.
2. *Абрамов О.В., Дмитриев В.И.* Диагностика и надежность морских технических систем. СПб.: Элмор, 2008. 320 с.
3. *Селезнев К.П., Савин Б.Н.* Основы применения САПР в компрессоростроении. Л., 1986. 81 с.
4. *Бордюг А.С.* Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16. № 3. С. 77–82.
5. *Никитенко Я.А., Железняк А.А.* Методы повышения достоверности контроля диагностических характеристик оборудования // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли: материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием. М., 2019. С. 210–214.
6. *Бордюг А.С.* Моделирование интегрированных преобразователей энергии в судовых многогенераторных системах // Морские технологии: проблемы и решения – 2020: сборник трудов по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов. Керчь, 2020. С. 47–51.
7. *Sokolov S., Nyrkov A., Chernyi S., Nazarov N.* Use of social engineering methods in transport: methods, protection, facts, consequences // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. Commemorating the 90th anniversary of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. Series “Lecture Notes in Civil Engineering”. 2021. P. 57–66.
8. *Bordug A., Smetuch N., Antipenko I., Yashin A.* Analysis of dynamic processes in maritime engines of ships // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. P. 816–824.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

9. Бордюг А.С. идеология формирования типоразмерных рядов центробежных компрессоров судовой энергетической установки на базе автоматизированного проектирования // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 4. С. 126–138.
10. Вынгра А.Н. Перспективы развития альтернативной энергетики в Республике Крым // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: сборник трудов по материалам III Национальной научно-практической конференции. Керчь, 2022. С. 122–127.

References:

1. Bordyug A.S. *Povishenie nadezhnosti sudovogo malooborotnogo dizela v usloviyach destabiliziruyushish vozdeistviyu. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the reliability of a marine low-speed diesel engine in conditions of destabilizing influences. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2018, 148 p. (In Russian).
2. Abramov O.V., Dmitriyev V.I. *Diagnostika i nadezhnost' morskikh tekhnicheskikh sistem* [Diagnostics and reliability of marine technical systems]. St. Petersburg, Elmore Publ., 2008, 320 p. (In Russian).
3. Seleznev K.P., Savin B.N. *Osnovi primeneniya SARP v kompressorostoenii* [Fundamentals of CAD application in compressor engineering]. Leningrad, 1986, 81 p. (In Russian).
4. Bordyug A.S. *Primeneniye tsiklicheskogo testirovaniya apparatnogo obespecheniya morskikh sistem upravleniya* [Application of cyclic testing of marine control system hardware]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy* [Electrical and Information Complexes and Systems], 2020, vol. 16, no. 3, pp. 77–82. (In Russian).
5. Nikitenko Y.A., Zheleznyak A.A. *Metody povysheniya dostovernosti kontrolya diagnosticheskikh kharakteristik oborudovaniya* [Methods for increasing the reliability of monitoring the diagnostic characteristics of equipment]. *Materialy molodezhnogo nauchnogo foruma studentov i aspirantov transportnykh vuzov s mezhdunarodnym uchastiyem «Aktualnyye aspekty i prioritetye napravleniya razvitiya transportnoy otrasli»* [Materials of the youth scientific forum of students and graduate students of transport universities with international participation “Actual aspects and priority directions of development of the transport industry”], Moscow, 2019, pp. 210–214. (In Russian).
6. Bordyug A.S. *Modelirovaniye integrirovannykh preobrazovateley energii v sudovykh mnogogeneratornykh sistemakh* [Modeling of integrated power converters in ship multi-generator systems. In the collection]. *Sbornik trudov po materialam 2 Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley i aspirantov «Morskiye tekhnologii: problemy i resheniya – 2020»* [Collection of works based on the materials of the 2nd National scientific and practical conference of teachers and graduate students “Marine technologies: problems and solutions – 2020”]. Kerch, 2020, pp. 47–51. (In Russian).
7. Sokolov S., Nyrkov A., Chernyi S., Nazarov N. *Use of social engineering methods in transport: methods, protection, facts, consequences. Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. Commemorating the 90th anniversary of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. Series “Lecture Notes in Civil Engineering”*, 2021, pp. 57–66. (In English).
8. Bordug A., Smetuch N., Antipenko I., Yashin A. *Analysis of dynamic processes in maritime engines of ships. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, pp. 816–824. (In English).
9. Bordyug A.S. *Ideologiya formirovaniya tiporazmernykh ryadov centrobezhnykh kompressorov sudovoy energeticheskoy ustanovki na baze avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Ideology of formation of standard-size series of centrifugal compressors of a ship power plant based on computer-aided design]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], 2021, no. 4, pp. 126–138. (In Russian).

10. Vyngra A.N. Perspektivy razvitiya al'ternativnoy energetiki v Respublike Krym [Prospects for the Development of Alternative Energy in the Republic of Crimea]. *Sbornik trudov po materialam III Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Obshchestvo, obrazovaniye, nauka v sovremennykh paradigmatkh razvitiya»* [Collection of Papers Based on the Materials of the III National Scientific and Practical Conference “Society, Education, Science in Modern Development Paradigms”], Kerch, 2022, pp. 122–127. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Кошевой Дмитрий Олегович	аспирант Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 oldman1998dima@gmail.com
Koshevoy Dmitry Olegovich	postgraduate student Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 oldman1998dima@gmail.com.
Бордюг Александр Сергеевич	канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 alexander.bordyug@mail.ru
Bordyug Alexander Sergeyevich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of Ship's Electrical Equipment and Automatization Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 alexander.bordyug@mail.ru.
Пласта Ольга Алексеевна	ассистент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
Plasta Olga Alekseevna	Assistant of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

Ениватов В.В., Сапожников Ф.В., Ухин В.И., Полянский Ю.В.
**БИООБРАСТАНИЕ И БИОКОРРОЗИЯ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ
И ПУТИ РЕШЕНИЯ**

Аннотация. В данной статье представлен обзор современных представлений о биокоррозии и биообрастании – процессах, вызываемых микроорганизмами, которые приводят к разрушению материалов и формированию нежелательных биологических отложений на поверхностях объектов морской инфраструктуры. Рассмотрены специфические факторы морской среды, способствующие развитию этих процессов, основные группы морских организмов-обрастателей и механизмы их воздействия на различные материалы. Проанализированы экономические и экологические последствия биообрастания для морского судоходства, портовых сооружений, нефтегазовых платформ и других объектов морской инфраструктуры. Представлен обзор традиционных и инновационных методов защиты от биообрастания и биокоррозии, включая противообрастающие покрытия, системы катодной защиты и биоцидные технологии. Особое внимание уделено экологически безопасным стратегиям контроля биообрастания и современным тенденциям исследований в этой области.
Ключевые слова: биообрастание, биокоррозия, противообрастающие покрытия, морские организмы-обрастатели, экологическая безопасность.

Enivatov V.V., Sapozhnikov F.V., Ukhin V.I., Polyansky Yu.V.

**BIOFOULING AND BIOCORROSION OF MARINE INFRASTRUCTURE FACILITIES:
CURRENT STATE OF THE PROBLEM AND SOLUTIONS**

Abstract. This article provides an overview of modern concepts of biocorrosion and biofouling, processes caused by microorganisms that lead to the destruction of materials and the formation of undesirable biological deposits on the surfaces of marine infrastructure facilities. The specific factors of the marine environment contributing to the development of these processes, the main groups of marine fouling organisms and the mechanisms of their effect on various materials are considered. The economic and environmental consequences of biofouling for marine navigation, port facilities, oil and gas platforms and other marine infrastructure facilities are analyzed. An overview of traditional and innovative methods of protection against biofouling and biocorrosion, including antifouling coatings, cathodic protection systems and biocidal technologies, is presented. Special attention is paid to environmentally sound biofouling control strategies and current research trends in this area.

Keywords: biofouling, biocorrosion, antifouling coatings, marine fouling organisms, environmental safety.

Введение. Море представляет собой агрессивную коррозионную среду для любых искусственных конструкций, где химические, физические и биологические факторы действуют синергетически, ускоряя процессы деградации материалов. Биообрастание и биокоррозия являются одними из наиболее значимых проблем для объектов морской инфраструктуры, включая суда, нефтегазовые платформы, портовые сооружения, системы аквакультуры, подводные трубопроводы и кабели, волногасящие конструкции и другие гидротехнические сооружения.

Биокоррозия, или микробиологически индуцированная коррозия (МИК), представляет собой процесс разрушения материалов, вызванный или ускоренный деятельностью микроорганизмов. В отличие от химической коррозии, биокоррозия имеет биологическую составляющую, которая значительно усложняет понимание механизмов процесса и

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

разработку эффективных методов защиты.

Экономические потери от биообрастания и биокоррозии морской инфраструктуры оцениваются в десятки миллиардов рублей ежегодно. Только в сфере морского судоходства дополнительное гидродинамическое сопротивление, вызванное биообрастанием корпусов судов, приводит к увеличению расхода топлива на 40% и более, что эквивалентно дополнительным выбросам парниковых газов в размере 60 миллионов тонн CO₂ в год.

Несмотря на многолетнюю историю исследований в этой области, проблема биообрастания и биокоррозии остается актуальной из-за ужесточения экологических требований к методам защиты, развития резистентности организмов-обрастателей к традиционным биоцидам и появления новых материалов и конструкций в морской инженерии [1-4].

Целью исследований является комплексный анализ современного состояния проблемы биообрастания и биокоррозии объектов морской инфраструктуры и перспективных подходов к ее решению с учетом технологических, экономических и экологических аспектов.

Материалы и методы исследования. Морская среда создает уникальные условия для развития процессов биообрастания и биокоррозии, что обусловлено рядом специфических характеристик:

- высокая электропроводность – значительная электропроводность (3.0-5.0 См/м) возникает из-за высокой концентрации растворенных солей, что способствует протеканию электрохимических коррозионных процессов;

- солевой состав – соленость океанической воды составляет от 15 до 35 г/л, причем основными ионами являются Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺ и K⁺, хлорид-ионы особенно агрессивны по отношению к металлам, способствуя разрушению защитных оксидных пленок и развитию питтинговой коррозии;

- буферная емкость появляется благодаря карбонатной системе, что поддерживает относительно стабильный pH (около 8.2) и благоприятствует жизнедеятельности многих морских организмов;

- содержание растворенного кислорода в поверхностных морских водах обычно составляет 5-8 мг/л, что достаточно для развития аэробных микроорганизмов и протекания катодных реакций при коррозии металлов;

- гидродинамический режим, включая скорость течений, волновое воздействие и турбулентность, играют важную роль в процессах биообрастания, влияя на адгезию организмов, формирование биопленок и доставку питательных веществ к поверхности.

Корпуса морских судов особенно подвержены биообрастанию из-за постоянного контакта с морской водой и перемещения между различными акваториями, что способствует распространению организмов-обрастателей. Биообрастание увеличивает гидродинамическое сопротивление судна, что приводит к:

- увеличению расхода топлива (на 40% и более);

- снижению максимальной скорости (до 10%);

- ухудшению маневренности;

- необходимости более частого докования для очистки корпуса.

Помимо корпуса, биообрастанию подвержены системы охлаждения двигателей, кингстонные ящики, балластные танки и другие системы судна, контактирующие с морской водой.

Морские нефтегазовые платформы, подводные добычные комплексы и трубопроводы подвержены как биообрастанию, так и биокоррозии, что создает серьезные проблемы для их эксплуатации:

- увеличение веса конструкций из-за обрастания, что повышает нагрузку на элементы платформы;

- затруднение доступа для инспекции и обслуживания;

- ускоренная коррозия опорных элементов;

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

- локальная коррозия трубопроводов, особенно в местах сварных швов.

Особой проблемой для морских трубопроводов является микробиологически индуцированная коррозия, вызываемая сульфатредуцирующими бактериями (СРБ), которые в анаэробных условиях внутренней поверхности трубопроводов могут вызывать питтинговую коррозию со скоростью до 5 мм/год.

Причалы, пирсы, доки, волноломы, шлюзы и другие портовые сооружения постоянно подвергаются воздействию биообрастания и биокоррозии, что приводит к:

- снижению несущей способности конструкций;
- разрушению бетона из-за активности сульфатокисляющих бактерий;
- коррозии стальных элементов, особенно в зоне переменного смачивания;
- ухудшению эстетического вида сооружений.

Садки, платформы, поплавки и другие элементы систем аквакультуры также страдают от интенсивного биообрастания, что приводит к:

- уменьшению проточности садков и ухудшению качества воды;
- увеличению веса конструкций;
- повреждению сетных материалов;
- конкуренции организмов-образователей с культивируемыми видами за пищу и кислород.

Морские ветроэнергетические установки, приливные электростанции и другие системы получения возобновляемой энергии в море также подвержены биообрастанию и биокоррозии, что влияет на:

- гидродинамические характеристики турбин;
- коррозионную стойкость опорных конструкций;
- эффективность работы систем преобразования энергии;
- стоимость обслуживания.

Подводные датчики, кабели, акустические системы, навигационные буи и другие элементы морских систем мониторинга и связи могут страдать от биообрастания, что приводит к:

- искажению сигналов;
- снижению чувствительности датчиков;
- повышенному дрейфу буев;
- повреждению изоляции кабелей.

Среди морских организмов-образователей выделяют микро- и макрообразователи.

Бактерии являются первичными колонизаторами искусственных поверхностей в морской среде. В течение первых часов после погружения объекта в морскую воду на его поверхности формируется первичная бактериальная пленка. Особую роль в процессах биокоррозии играют:

- сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) – анаэробные бактерии родов *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfotomaculum*, способные восстанавливать сульфаты до сероводорода, который является сильным коррозионным агентом. СРБ часто обнаруживаются в анаэробных микроразделах биопленок на металлических поверхностях и в морских отложениях;

- железоокисляющие бактерии – бактерии родов *Gallionella*, *Leptothrix*, *Mariprofundus*, *Jaienema*, *Nitzschia*, *Vorticella*, *Diatomeae* (рис. 1) окисляющие Fe(II) до Fe(III) и способствующие образованию ржавчины на стальных конструкциях;

- марганцеокисляющие бактерии – бактерии, окисляющие Mn(II) до Mn(IV) и формирующие марганцевые отложения, которые могут действовать как сильные катодные участки при коррозии;

- тионовые бактерии – бактерии родов *Thiobacillus*, *Acidithiobacillus*, окисляющие соединения серы до серной кислоты, что приводит к локальному закислению среды и ускорению коррозии;

- метанотрофные и метаногенные микроорганизмы – бактерии и археи, участвующие в

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

цикле метана, который может влиять на электрохимические процессы при коррозии.

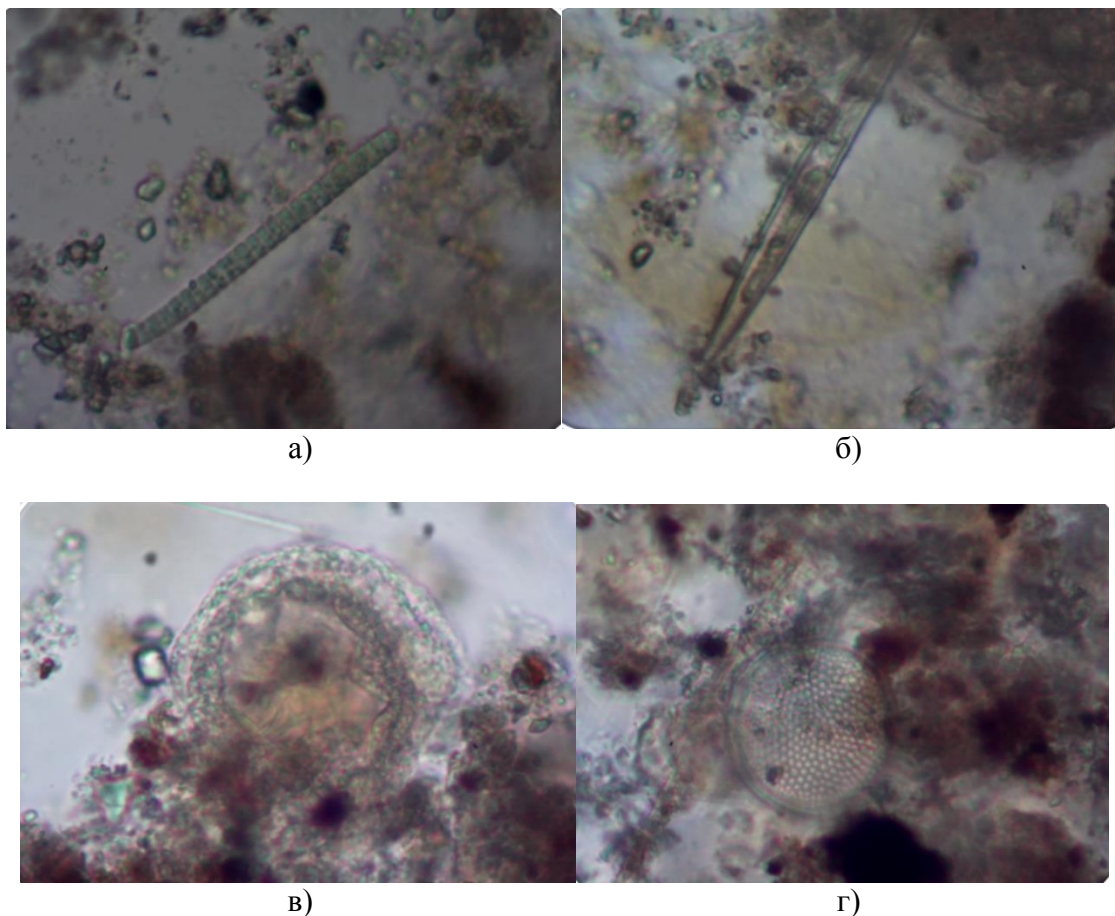


Рисунок 1 – Бактерии родов *Jaienema* (а), *Nitzschia* (б), *Vorticella* (в), *Diatomeae* (г)

Диатомовые водоросли, динофлагелляты и другие микроводоросли формируют второй слой обрастания после бактерий. Они производят значительное количество внеклеточных полимерных веществ (ВПВ), которые усиливают адгезию и создают благоприятные условия для развития других организмов. Простейшие (инфузории, амёбы, жгутиконосцы) питаются бактериями и микроводорослями, регулируя тем самым структуру микробного сообщества биопленки.

К макрообрастателям относятся:

1. Усоногие раки (Cirripedia), представителями которых являются *Balanus improvisus*, *Amphibalanus amphitrite*, *Balanus crenatus*, *Semibalanus balanoides*, *Megabalanus tintinnabulum*. Усоногие раки, известные как морские желуди (баляны), являются одними из наиболее распространенных и проблемных обрастателей морской инфраструктуры. Формирование плотных колоний с твердыми известковыми раковинами значительно увеличивает шероховатость поверхности и гидродинамическое сопротивление судов. Прочное прикрепление к поверхности затрудняет механическую очистку и может повреждать защитные покрытия во время удаления. Известковые основания могут оставаться на поверхности даже после удаления организмов.

2. Двустворчатые моллюски (Bivalvia): *Mytilus edulis* (обыкновенная мидия), *Mytilus galloprovincialis* (средиземноморская мидия), *Perna viridis* (зеленая мидия), *Dreissena polymorpha* (дрейссена) – образуют массивные многослойные обрастания, значительно увеличивающие вес конструкций. Мидии особенно проблематичны для систем водозабора, трубопроводов и теплообменников, которые они могут полностью закупоривать. Биссусные нити содержат коррозионно-активные соединения, способствующие развитию локализованной коррозии под колониями.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

3. Гидроиды (Hydrozoa): *Tubularia spp.*, *Obelia spp.*, *Ectopleura crocea*, *Hydractinia echinate* – образуют рыхлые, но объемные обрастания, увеличивающаи гидродинамическое сопротивление, создают благоприятные условия для последующей колонизации другими обрастателями, особенно проблематичны для датчиков, морских буев и подводного оборудования с чувствительными элементами.

4. Мшанки (Bryozoa): *Bugula neritina*, *Watersipora subatra*, *Membranipora membranacea*, *Electra pilosa* – образуют плотные карбонатные или хитиновые корки на поверхностях, увеличивают шероховатость поверхности и создают условия для поселения более крупных обрастателей, могут проявлять устойчивость к различным антифоулинговым покрытиям.

5. Асцидии (Ascidiacea): *Ciona intestinalis*, *Styela clava*, *Asciidiella aspersa*, *Botryllus schlosseri*, *Didemnum vexillum* – формируют объемные обрастания со значительной биомассой. Колониальные виды могут образовывать толстые коврообразные покрытия, обладают высокой устойчивостью к различным антифоулинговым стратегиям. Тяжелые обрастания асцидиями могут сокращать плавучесть небольших плавсредств.

6. Многощетинковые черви (Polychaeta): *Hydroides elegans*, *Hydroides dianthus*, *Ficopomatus enigmaticus*, *Serpula vermicularis*, *Spirorbis spirorbis* – образуют твердые известковые трубки, трудно поддающиеся механическому удалению, формируют рифообразные структуры, значительно увеличивающие шероховатость поверхности, могут создавать очаги локализованной коррозии под трубками.

7. Макроводоросли:

- зеленые водоросли: *Ulva spp.* (морской салат), *Enteromorpha spp.*, *Cladophora spp.*;

- бурые водоросли: *Ectocarpus spp.*, *Laminaria spp.*, *Sargassum muticum*;

- красные водоросли: *Ceramium spp.*, *Polysiphonia spp.*

Макроводоросли образуют объемные обрастания, значительно увеличивающие гидродинамическое сопротивление, наиболее проблематичны в фотической зоне (до глубины проникновения света), способствуют удержанию влаги на периодически осушаемых участках, ускоряя коррозию, создают среду обитания для мобильных организмов (амфиподы, изоподы и др.).

Воздействие макрообрастателей на объекты морской инфраструктуры имеет следующие последствия:

- увеличение веса конструкций – обрастание макроорганизмами может значительно увеличивать вес морских конструкций: колонии мидий плотностью 25,000 особей/м² увеличивают вес конструкции на 35-40 кг/м²; на морских платформах зафиксированы случаи обрастания с биомассой до 150 кг/м²; увеличение веса плавучих конструкций снижает их запас плавучести;

- увеличение гидродинамического сопротивления: обрастание корпуса судна макроорганизмами может увеличивать расход топлива на 30-50 %; тяжелое обрастание сокращает максимальную скорость судна на 8-10 %; для морских платформ и опор ветрогенераторов обрастание увеличивает нагрузки от течений и волн на 15-25 %;

- ускорение коррозионных процессов: под колониями обрастателей формируются застойные зоны с пониженным содержанием кислорода, что способствует развитию дифференциальной аэрации и связанной с ней коррозии; макрообрастатели создают среду для развития сульфатредуцирующих и других коррозионно-активных бактерий; жизнедеятельность макрообрастателей приводит к локальным изменениям pH, ускоряющим коррозионные процессы;

- блокирование систем и оборудования: закупоривание водозаборных систем и трубопроводов (особенно критично для систем охлаждения); блокирование клапанов и насосов; нарушение работы датчиков и контрольно-измерительных приборов; снижение эффективности теплообменников; затруднение открытия и закрытия шлюзов, затворов и других подвижных элементов;

- повреждение защитных покрытий: проникновение ризоидов водорослей в

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

микротрещины покрытий; подкисление среды под колониями обрастателей, приводящее к деградации покрытий; механическое повреждение покрытий при удалении прочно прикрепленных организмов (морских желудей, трубчатых полихет).

Результаты исследования и их обсуждение. В настоящее время применяют следующие методы предотвращения и контроля биокоррозии и биообрастания, которые можно разделить на химические, физические, материаловедческие и биологические [5-10].

Химические методы:

- биоциды – химические вещества, убивающие микроорганизмы или предотвращающие их рост, в промышленности используются окислительные (хлор, озон, перекись водорода) и неокислительные (четвертичные аммониевые соединения, изотиазолон, глутаральдегид) биоциды. Ограничения применения связаны с экологическими проблемами и развитием устойчивости микроорганизмов;

- ингибиторы коррозии – вещества, замедляющие коррозионные процессы: анодные, катодные, смешанные ингибиторы;

- поверхностно-активные вещества – нарушают целостность клеточных мембран микроорганизмов и способствуют отрыву биопленок от поверхности.

Физические методы:

- механическая очистка – удаление биопленок и продуктов коррозии механическими средствами: скребками, щетками, гидроструйной очисткой;

- ультразвуковая обработка – разрушение биопленок и предотвращения адгезии микроорганизмов;

- электрические и магнитные поля – воздействие электрическими и магнитными полями для предотвращения формирования биопленок;

- термическая обработка – кратковременный нагрев системы для уничтожения микроорганизмов;

- УФ-излучение – дезинфекция воды и поверхностей.

Материаловедческие методы:

- антимикробные покрытия – покрытия, содержащие антимикробные компоненты: ионы серебра, меди, цинка; наночастицы металлов; антибиотики; ферменты;

- противообрастающие покрытия – покрытия, предотвращающие адгезию микроорганизмов: гидрофобные, гидрофильные, с контролируемым высвобождением биоцидов;

- разработка коррозионно-стойких материалов – создание новых сплавов и композитов с повышенной устойчивостью к биокоррозии.

Биологические методы:

- ферментные препараты – ферменты, разрушающие компоненты биопленок: ДНКазы, протеазы, гликозидазы;

- бактериофаги – вирусы, специфично инфицирующие и убивающие бактерии;

- естественные антимикробные пептиды – пептиды растительного и животного происхождения с антимикробной активностью;

- конкурентное ингибирование – использование непатогенных микроорганизмов для вытеснения коррозионно-активных видов.

Наиболее эффективным является комплексный подход к предотвращению биокоррозии и биообрастания, включающий правильный выбор материалов, оптимизацию конструкции и рабочих параметров системы, применение защитных покрытий, регулярный мониторинг и обслуживание. Однако, перспективными являются исследование и применение новых технологий.

В настоящее время проводятся исследования по применению технологии биопленок:

- омиксные технологии – метагеномика, метатранскриптомика, метапротеомика и метаболомика, которые позволяют получить комплексное представление о микробных сообществах в биопленках, их функциональной активности и взаимодействии с материалами;

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

- микрофлюидные системы – использование микрофлюидных систем для моделирования биопленок в контролируемых условиях;

- визуализация биопленок *in situ* – разработка методов визуализации биопленок в реальных промышленных системах без их нарушения.

Ряд исследований направлен на создание новых антикоррозионных и противообрастающих материалов:

- биомиметические поверхности – создание поверхностей, имитирующих природные антиобрастающие структуры (кожа акул, листья лотоса);

- самовосстанавливающиеся материалы – разработка материалов, способных к самовосстановлению при повреждении;

- умные материалы – создание материалов, способных изменять свои свойства в ответ на внешние воздействия или формирование биопленок;

- наноструктурированные поверхности – разработка наноструктурированных поверхностей с антимикробными свойствами.

К новым подходам к борьбе с биопленками можно отнести:

- ингибирование кворум-сенсинга – разработка веществ, блокирующих межклеточную коммуникацию бактерий и предотвращающих формирование биопленок;

- разрушение матрикса биопленок – создание препаратов, специфически разрушающих компоненты матрикса биопленок;

- комбинированные подходы – сочетание различных методов борьбы с биопленками для достижения синергетического эффекта.

Вводимые новые методы профилактики и борьбы с биообрастанием и биокоррозией должны также быть экологически безопасными:

- природные биоциды – исследование и применение биоцидов природного происхождения: эфирных масел, экстрактов растений, антимикробных пептидов;

- фоторегулируемые биоциды – создание биоцидов, активирующихся под действием света;

- целевая доставка антимикробных агентов – разработка систем доставки антимикробных веществ непосредственно к биопленкам с помощью наночастиц, липосом и других носителей.

Выводы. Биокоррозия и биообрастание представляют собой сложные и многофакторные процессы, оказывающие значительное негативное влияние на различные отрасли промышленности. Понимание механизмов этих процессов и разработка эффективных методов их предотвращения и контроля требуют междисциплинарного подхода, объединяющего микробиологию, материаловедение, химию, инженерию и другие науки.

Современные исследования в области биокоррозии и биообрастания направлены на создание новых методов диагностики, позволяющих выявлять проблему на ранних стадиях, разработку экологически безопасных способов борьбы с микроорганизмами и создание новых материалов с повышенной устойчивостью к биологическому воздействию.

Особенно перспективными представляются подходы, основанные на понимании молекулярных механизмов формирования биопленок и их взаимодействия с материалами, что открывает возможности для разработки целенаправленных методов воздействия на ключевые процессы.

В ближайшем будущем можно ожидать развития интегрированных систем мониторинга и контроля биокоррозии и биообрастания, основанных на современных достижениях в области сенсорных технологий, материаловедения и микробиологии, что позволит существенно снизить экономические потери и повысить безопасность промышленных объектов.

Список использованной литературы:

1. Ковальчук Ю.Л., Ильин И.Н., Полтаруха О.П. О некоторых особенностях распределения

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

организмов обрастания на судах и буйковых станциях в морской среде // Вода: химия и экология. 2012. № 3 (45). С. 59-64.

2. *Нефортунов Г.А., Петров С.К., Патрушева Т.Н.* Влияние микроструктуры поверхности на биообрастание // Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности: материалы V Международной научно-практической конференции. СПб., 2022. С. 117-120.
3. *Орлова М.И.* Водный транспорт как объект защиты от биопомех и фактор расселения живых организмов // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2022: материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022. Т. 1. С. 105–111.
4. *Запевалов Д.Н., Ибатуллин К.А., Ваганов Р.К.* Анализ биообрастания лакокрасочного покрытия по результатам натурных испытаний в Черном море // Вести газовой науки. 2023. № 3 (55). С. 82–93.
5. *Раилкин А.И., Отвалко Ж.А., Коротков С.И.* Концепция экологически безопасной защиты от морского обрастания и ее разработка с использованием каучук-эпоксидных покрытий // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2. № 3. С. 40–52.
6. *Васильев Н.В., Сапожников Ф.В., Торопов М.Н., Матвеев Ю.И.* О применимости энергента для увеличения ресурса оборудования и снижении обрастаемости судовых трубопроводов, балластных танков // Морские технологии: проблемы и решения – 2023: сборник трудов по материалам научно-практических конференций преподавателей, аспирантов и сотрудников ФГБОУ ВО «КГМТУ». Керчь, 2023. С. 103-106.
7. *Мельник В.Д., Ухин В.И., Ивановская А.В.* Эксперимент по исследованию применения энергента для защиты судовых систем от биокоррозии // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли: материалы Национальной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Владивосток, 2025. С. 371–376.
8. *Кочина Т.А., Кондратенко Ю.А., Шилова О.А., Власов Д.Ю.* Биокоррозия, биообрастание и современные методы борьбы с ними // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2022. Т. 58. № 1. С. 86–112.
9. *Суханова Т.Е., Косовских А.И., Вылегжанина М.Э.* Наноструктурированные композиции на основе полимерных лакокрасочных материалов и экологически безопасных биоцидов // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 7. С. 913–923.
10. *Уколов А.И., Попова Т.Н.* Эффективность применения коммерческих супергидрофобных покрытий в приложениях морской индустрии // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84. № 4. С. 475–487.

References:

1. Koval`chuk Yu.L., Il`in I.N., Poltaruxa O.P. O nekotory`x osobennostyax raspredeleniya organizmov obrastaniya na sudax i bujkovy`x stanciyax v morskoj srede [On some features of the distribution of fouling organisms on ships and buoy stations in the marine environment]. *Voda: ximiya i e`kologiya* [Water: Chemistry and Ecology], 2012, no. 3 (45), pp. 59-64. (In Russian).
2. Nefortunov G.A., Petrov S.K., Patrusheva T.N. Vliyanie mikrostruktury` poverxnosti na bioobrastanie [The influence of surface microstructure on biofouling]. *Materialy` 5 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Teoreticheskie i prikladny`e voprosy` kompleksnoj bezopasnosti»* [Materials of the 5 International scientific and practical conference “Theoretical and applied issues of integrated security”], St. Petersburg, 2022, pp. 117-120. (In Russian).
3. Orlova M.I. Vodny`j transport kak ob`ekt zashhity` ot biopomex i faktor rasseleniya zhivy`x organizmov [Water transport as an object of protection from biological interference and a factor of settlement of living organisms]. *Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno–prakticheskoy konferencii «Transport Rossii: problemy` i perspektivy` - 2022»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Transport of Russia: Problems and Prospects – 2022”]. St-

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Peterburg, Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN Publ., 2022, vol. 1, pp. 105–111. (In Russian).

4. Zapevalov D.N., Ibatullin K.A., Vagapov R.K. Analiz bioobrastaniya lakokrasochnogo pokry`tiya po rezul`tatam naturny`x ispy`tanij v Chernom more [Analysis of biofouling of paintwork based on the results of field tests in the Black Sea]. *Vesti gazovoj nauki* [News of gas science], 2023, no. 3(55), pp. 82-93. (In Russian).
5. Railkin A.I., Otvalko Zh.A., Korotkov S.I. Konceptiya e`kologicheski bezopasnoj zashhity` ot morskogo obrastaniya i ee razrabotka s ispol`zovaniem kauchuk-e`poksidny`x pokry`tij [The concept of environmentally safe protection against marine fouling and its development using rubber-epoxy coatings]. *Morskoj biologicheskij zhurnal* [Marine Biological Journal], 2017, vol. 2, no. 3, pp. 40–52. (In Russian).
6. Vasil`ev N.V., Sapozhnikov F.V., Toropov M.N., Matveev Yu.I. O primenimosti e`nergenta dlya uvelicheniya resursa oborudovaniya i snizhenii obrastaemosti sudovy`x truboprovodov, ballastny`x tankov [On the applicability of energent to increase the life of equipment and reduce fouling of ship pipelines, ballast tanks]. *Sbornik trudov po materialam nauchno-prakticheskix konferencij prepodavatelej, aspirantov i sotrudnikov FGBOU VO "KGMTU" «Morskie texnologii: problemy` i resheniya – 2023»* [Collection of papers based on the materials of scientific and practical conferences of teachers, graduate students and employees of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “KSMTU” “Marine technologies: problems and solutions – 2023”]. Kerch, 2023. pp. 103–106. (In Russian).
7. Mel`nik V.D., Uxin V.I., Ivanovskaya A.V. E`ksperiment po issledovaniyu primeneniya e`nergenta dlya zashhity` sudovy`x sistem ot biokorrozii [Experiment on the study of the use of energent to protect ship systems from biocorrosion]. *Materialy` Nacional`noj nauchno-texnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molody`x ucheny`x «Kompleksny`e issledovaniya v ry`boxozyajstvennoj otrasli»* [Materials of the National scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists “Comprehensive research in the fisheries industry”], Vladivostok, 2025, pp. 371–376. (In Russian).
8. Kochina T.A., Kondratenko Yu.A., Shilova O.A., Vlasov D.Yu. Biokorroziya, bioobrastanie i sovremenny`e metody` bor`by` s nimi [Biocorrosion, biofouling and modern methods of combating them]. *Fizikoximiya poverxnosti i zashhita materialov* [Physicochemistry of the Surface and Protection of Materials], 2022, vol. 58, no 1, pp. 86–112. (In Russian).
9. Suxanova T.E., Kosovskix A.I., Vy`legzhanina M.E`. Nanostrukturirovanny`e kompozicii na osnove polimerny`x lakokrasochny`x materialov i e`kologicheski bezopasny`x biocidov [Nanostructured compositions based on polymer paint and varnish materials and environmentally safe biocides]. *Zhurnal texnicheskoj fiziki* [Journal of Technical Physics], 2022, vol. 92, no. 7, pp. 913–923. (In Russian).
10. Ukolov A.I., Popova T.N. E`ffektivnost` primeneniya kommercheskix supergidrofobny`x pokry`tij v prilozheniyax morskoy industrii [The effectiveness of commercial superhydrophobic coatings in marine industry applications]. *Kolloidny`j zhurnal* [Colloid Journal], 2022, vol. 84, no. 4, pp. 475–487. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Ениватов Валерий Владимирович	канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 valeriy.enivatov@gmail.com
Enivatov Valerii Vladimirovic	PhD in Engineering Science, Head of the Department of the Department of marine power plants Kerch State Maritime Technological University

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

valeriy.enivatov@gmail.com

**Сапожников
Филипп
Вячеславович**

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник

Институт Океанологии имени П.П. Ширшова РАН

117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36

fil_aralsky@mail.ru

Sapozhnikov
Filipp
Viacheslavovich

Ph.D. (Biol.), Leading Researcher

P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences

117997, Moscow, Nakhimovsky prospekt, 36

fil_aralsky@mail.ru

**Ухин
Владимир
Иванович**

курсант 4-го курса направления подготовки «Эксплуатация судовых энергетических установок»

Керченский государственный морской технологический университет

298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

invkerch@yandex.ru

Ukhin
Vladimir
Ivanovich

cadet of the 4nd year of the training direction «Operation of marine power plants»

Kerch State Maritime Technological University

298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

invkerch@yandex.ru

**Полянский
Юрий
Витальевич**

курсант 2-го курса направления подготовки «Эксплуатация судовых энергетических установок»

Керченский государственный морской технологический университет

298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

invkerch@yandex.ru

Polianskii
Yurii
Vitalevich

cadet of the 2nd year of the training direction «Operation of marine power plants»

Kerch State Maritime Technological University

298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

invkerch@yandex.ru

Жуков В.А., Кротовская Е.А.

ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Аннотация. Системы газотурбинного наддува в настоящее время являются одними из важнейших систем ДВС, совершенство которых определяет экономические и экологические показатели работы судовых дизелей. В статье представлен анализ возможных направлений совершенствования систем газотурбинного наддува. Показана перспективность совершенствования способов охлаждения надувочного воздуха за счет использования систем испарительного охлаждения и модернизации систем автоматического регулирования температуры надувочного воздуха судовых дизелей.

Ключевые слова: судовые дизели, модернизация системы наддува, температура надувочного воздуха, способы охлаждения надувочного воздуха, испарительное охлаждение, автоматическое регулирования температуры надувочного воздуха.

Zhukov V.A., Krotovskaja E.A.

PROSPECTS FOR MODERNIZATION OF THE GAS TURBINE SUPERCHARGING SYSTEM FOR MARINE DIESEL ENGINES

Abstract. Gas turbine supercharging systems are currently one of the most important internal combustion engine systems, the perfection of which determines the economic and environmental performance of marine diesel engines. The article presents an analysis of possible ways to improve gas turbine boost systems. The prospects of improving the methods of charge air cooling through the use of evaporative cooling systems and the modernization of automatic temperature control systems for the inflating air of marine diesel engines are shown.

Keywords: marine diesels, modernization of the boost system, charge air temperature, charge air cooling methods, evaporative cooling, automatic control of the inflating air temperature.

Введение. Современный этап дизелестроения характеризуется неуклонным ростом показателей удельной, литровой и поршневой мощности двигателей [1, 2]. Наиболее рациональным способом форсирования дизельных двигателей является повышение среднего эффективного давления, значение которого у форсированных судовых дизелей достигает 2,0 МПа [3]. Указанные значения достигаются за счет увеличения цикловой подачи топлива, которое невозможно без соответствующего увеличения подачи воздуха в цилиндры двигателя [4]. Именно поэтому практически все современные дизели оснащаются системами наддува. Наиболее широкое распространение получили системы газотурбинного наддува, в которых для привода компрессора, обеспечивающего подачу воздуха в цилиндры с заданным давлением p_k , служит турбина, использующая энергию отработавших газов [5].

Целью исследования является анализ перспектив модернизации системы газотурбинного наддува судовых дизелей.

Основной характеристикой компрессора является степень повышения давления

$$\pi_k = p_k/p_0, \quad (1)$$

где p_0 – атмосферное давление.

Давление наддува является определяющим для давления начала сжатия и поэтому существенно влияет на показатели рабочего цикла ДВС. В современных судовых дизелях давление, обеспечиваемое одноступенчатыми компрессорами, достигает 0,40...0,45 МПа, т.е. степень повышения давления π_k современных компрессоров составляет 4...4,5, а

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

турбокомпрессоры Schwitter имеют π_k одной ступени равное 6 [6].

Действительный процесс сжатия воздуха в компрессоре неизбежно сопровождается повышением его температуры.

Материалы и методы исследования. Температура воздуха после сжатия в компрессоре рассчитывается по формуле [7]:

$$T_k = T_0 \cdot p_k^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \cdot \pi_k^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающего воздуха (принимается равной 293 К);

π_k – показатель политропы сжатия в компрессоре (для центробежных компрессоров с неохлаждаемыми корпусами, наиболее распространенных в системах наддува $\pi_k > k$ [8]). Температура воздуха после сжатия в компрессоре агрегата наддува достигает 400...450 К.

Охлаждение наддувочного воздуха, повышая его плотность, улучшает наполнение цилиндров. В ряде теоретических и экспериментальных исследований установлено, что понижение температуры наддувочного воздуха на 10 К обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива на 4...6 г/(кВт·ч) при неизменной мощности двигателя, или повышение эффективной мощности двигателя на 2...4 % [9, 10]. Именно по этой причине в современных системах наддува присутствуют устройства, предназначенные для понижения температуры воздуха после компрессора.

Традиционно такое охлаждение осуществляется в охладителях наддувочного воздуха (ОНВ), представляющих собой рекуперативный теплообменный аппарат типа воздух-воздух или воздух-вода. Схема типичной системы газотурбинного наддува с ОНВ представлена на рисунке 1 [11].

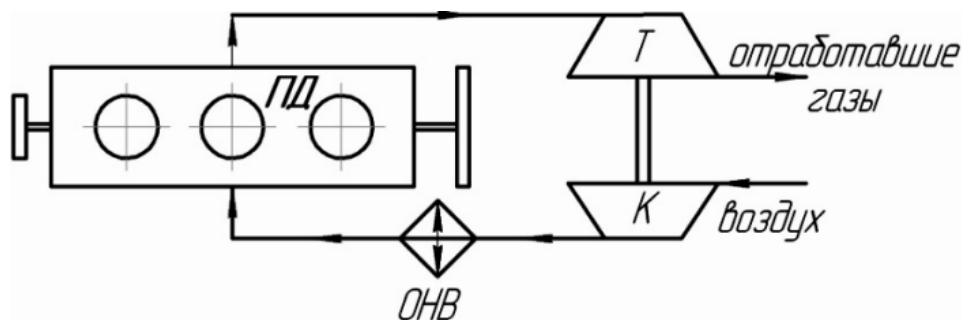


Рисунок 1 – Схема системы одноступенчатого газотурбинного наддува ДВС с ОНВ

Очевидно, что для судовых двигателей в качестве холодного теплоносителя наиболее целесообразно использовать забортную воду, учитывая ее высокую теплоемкость и значительный температурный перепад между наддувочным воздухом и забортной водой. Однако использование рекуперативных теплообменных аппаратов в системах газотурбинного наддува имеет и ряд недостатков, к которым следует отнести увеличение массы и габаритов двигателя, усложнение технического обслуживания, сложность автоматизации регулирования температуры воздуха, подаваемого в цилиндры на различных режимах работы двигателя. Именно поэтому научные исследования, направленные на поиски и совершенствование альтернативных способов охлаждения наддувочного воздуха сохраняют свою актуальность. В качестве альтернативных способов охлаждения наддувочного воздуха можно рассматривать эжекционное [12], турбодетандерное [13], а также расширительное охлаждение в цикле Миллера [14] испарительное [15] охлаждение.

При турбодетандерном охлаждении (рис. 2), предложенном фирмой «Купер-Бессемер» атмосферный воздух поступает в компрессор K , приводимый турбиной T , использующей энергию отработавших газов поршневого двигателя. После сжатия воздух направляется в компрессор детандера $КД$, где сжимается вторично. Для привода $КД$ используется турбина детандера $ТД$, в которую воздух поступает после охладителя наддувочного воздуха $ОНВ$. В

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

результате адиабатного расширения в турбине *ТД* достигается дополнительное понижение температуры воздуха, поступающего в цилиндры. Недостатком системы является сложность конструкции и увеличенные массо-габаритные показатели.

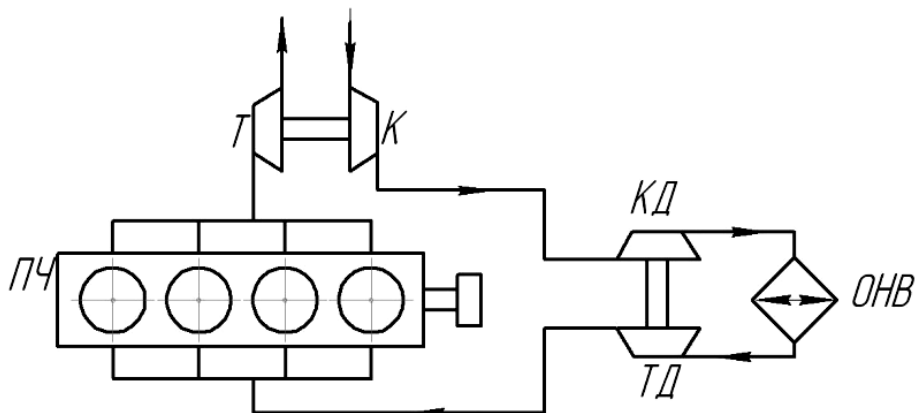


Рисунок 2 – Турбодетандерное охлаждение наддувочного воздуха

При охлаждении по методу Миллера в компрессоре системы наддува атмосферный воздух сжимается до высокого давления, затем, после прохождения охладителя наддувочного воздуха, он поступает в цилиндры. Особенность заключается в том, что впускной клапан открыт не на всем протяжении хода поршня. Клапан закрывается и процесс наполнения прекращается примерно за 45 ПКВ до прихода поршня в НМТ. При дальнейшем перемещении поршня происходит расширение воздуха с понижением его давления и температуры (рис. 3). В данном случае роль детандера выполняет цилиндр двигателя. Основными недостатками метода являются сложность системы газораспределения и необходимость создавать компрессором повышенное давление воздуха с учетом его последующего снижения в цилиндре.

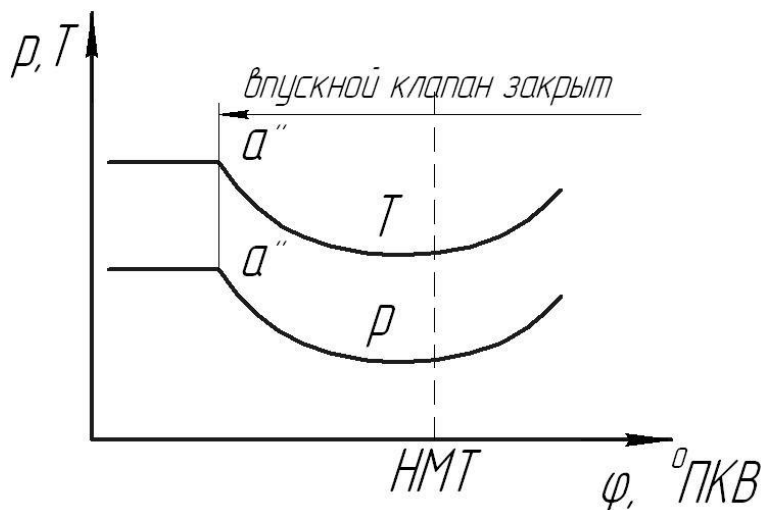


Рисунок 3 – Изменение температуры и давления воздуха при использовании метода Миллера

Анализ существующих систем газотурбинного наддува судовых дизелей, современных и перспективных требований, предъявляемых к ним, позволил выделить три основных направления модернизации систем:

- 1) совершенствование конструкции турбокомпрессоров с целью улучшения их газодинамических характеристик и повышения η_k ;
- 2) повышение эффективности охлаждения наддувочного воздуха с целью обеспечения требуемой температуры на впуске в цилиндр;

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

3) создание систем гибкого регулирования параметров наддува в зависимости от эксплуатационных режимов двигателя.

Результаты исследования и их обсуждение. Совершенствование конструкции агрегатов наддува в настоящее время обеспечивается, главным образом, за счет оптимизации проточных частей турбины и компрессора и выбора наилучших, с точки зрения, газодинамики, профилей рабочих лопаток, лопаток сопловых и направляющих аппаратов [16]. Особое значение при решении данных задач приобретают методы численного моделирования [17]. Необходимо отметить, что к настоящему времени конструкции турбин и компрессоров, входящих в агрегаты наддува имеют достаточно высокую степень совершенства и дальнейшая их модернизация требует не только проведения теоретических исследований, но и изменение технологических процессов производства основных элементов агрегатов турбонаддува.

Проведенное сопоставление указанных способов охлаждения наддувочного воздуха по ряду критериев, таких как простота конструкции, надежность работы, энергоэффективность, массо-габаритные показатели, глубина охлаждения, возможность автоматизации показали, что каждый из методов обладает определенными достоинствами и недостатками. Среди альтернативных способов охлаждения наибольшим спектром положительных качеств обладает испарительное охлаждение с впрыском жидкости. Впрыск может осуществляться как перед компрессором (рис. 4) [11], так и после компрессора непосредственно во впускной коллектор двигателя.

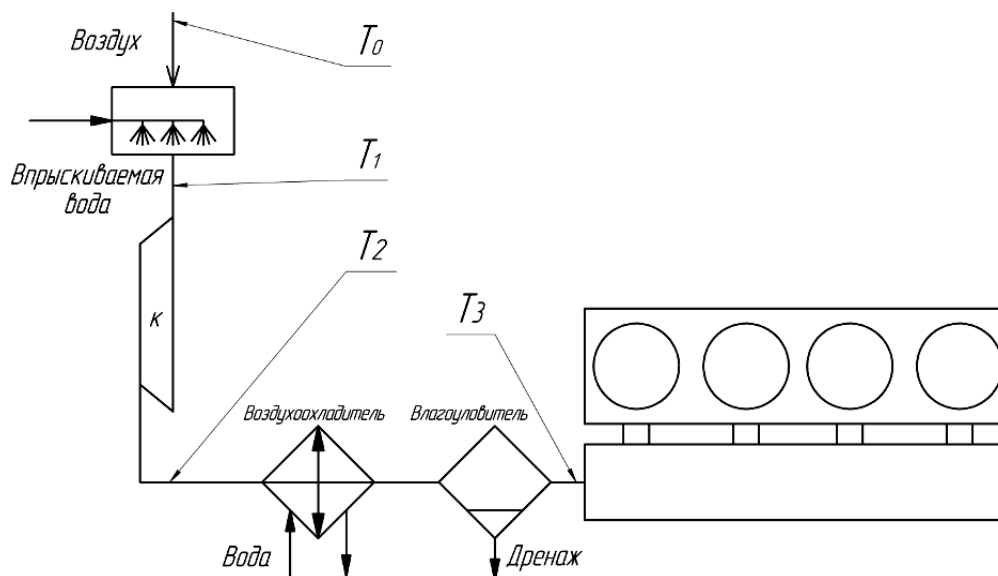


Рисунок 4 – Схема испарительного охлаждения наддувочного воздуха

Подача воды равная 2...4 % от удельного расхода воздуха обеспечивает увеличение мощности двигателя на 1...2 % при уменьшении мощности на привод компрессора агрегата наддува до 12 %. Глубина испарительного охлаждения может достигать 60...80 К. В системах испарительного охлаждения возможно применение жидкостей с повышенной теплотой парообразования, что способно увеличить эффективность охлаждения воздуха, а также жидкостей. Которые могут влиять на процессы воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси в цилиндрах судовых дизелей.

Дополнительные преимущества испарительного охлаждения наддувочного воздуха обеспечиваются возможностью гибкого регулирования глубины охлаждения воздуха, подаваемого в цилиндры ДВС, при использовании данного метода. Количество теплоты, отводимой от воздуха, может изменяться как за счет регулирования количества подаваемой во впускной коллектор жидкости, так и за счет изменения температуры впрыскиваемой жидкости. Для реализации указанных способов регулирования необходимо принять автоматизированные системы управления, основным элементом которых должен являться

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

электронный блок управления, вырабатывающий управляющие импульсы на основе входных сигналов по аналогии с системами электронного управления системами топливоподачи.

Система испарительного охлаждения имеет наименьшие массогабаритные характеристики по сравнению с другими системами охлаждения наддувочного воздуха, что также относится к ее достоинствам.

Выводы. Проведенный анализ возможных направлений совершенствования систем газотурбинного наддува судовых ДВС позволяет сделать вывод о перспективности разработок, обеспечивающих повышение эффективности систем газотурбинного наддува за счет увеличения глубины охлаждения наддувочного воздуха. Требуемая глубина охлаждения может быть обеспечена за счет применения систем испарительного охлаждения наддувочного воздуха.

Расширение возможностей испарительного охлаждения требуют дополнительных исследований, направленных, прежде всего на обеспечение ресурса судовых дизелей. Основным условием надежной работы двигателя является исключение попадания капельной жидкости в цилиндры, что может привести к разрушению масляной пленки на зеркале цилиндра и интенсивному изнашиванию деталей цилиндропоршневой группы. Для этого необходимо определить дисперсность распыливания воды, обеспечивающую ее полное испарение до поступления в цилиндр. Другим перспективным направлением исследований является изучение влияния различных жидкостей, используемых при испарительном охлаждении наддувочного воздуха на протекание рабочего цикла и его эффективность.

Перспективным направлением исследований представляется совершенствование автоматического регулирования испарительного охлаждения. Для решения этой задачи необходимо разработать систему автоматического управления подачей хладагента в системе испарительного охлаждения и алгоритм управления, учитывающий режим работы двигателя и его состояние в процессе эксплуатации.

Решению поставленных вопросов планируется посвятить дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

Список использованной литературы:

1. Конкс Г.А., Лашко В.А. Современные подходы к конструированию поршневых двигателей. М.: МОРКНИГА, 2009. 388 с.
2. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 2008. 496 с.
3. Безюков О.К., Жуков В.А. Теория и конструкция судовых турбомашин: учебное пособие. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2022. 100 с.
4. Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом. М.: Легион-Автодата, 2004. 176 с.
5. Безюков О.К., Жуков В.А. Судовые турбомшины: учебное пособие. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2021. 100 с.
6. Хак Г., Лангкабель. Турбодвигатели и компрессоры: справочное пособие: [пер. с нем.]. М.: АСТ Астрель. 2003. 350 с.
7. Ерофеев В.Л., Пряхин А.С., Семенов П.Д. Теплотехника в 2 т. Том 1 Термодинамика и теория теплообмена. М.: Юрайт, 2020. 308 с.
8. Овсянников М.К., Петухов В.А. Дизели в пропульсивном комплексе морских судов: справочник. Л.: Судостроение, 1987. 256 с.
9. Kuiken K. Diesel engines for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW. Onnen, Netherlands: Target Global Energy Training, 2008. 363 p.
10. Безюков О.К., Жуков В.А. Теория и конструкция судовых турбомашин: учебное пособие. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2022. 100 с.
11. Лазарев Е.А., Помаз А.Н. Эффективность эжекционного охлаждения наддувочного воздуха и особенности ее экспериментальной оценки // Вестник Южно-Уральского

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

государственного университета. Серия: Машиностроение. 2016. Т. 16. № 3. С. 21-28.

12. Калекин В.С., Гранкин М.А. Охлаждение потока наддувочного воздуха диспергированной жидкостью // Динамика развития системы военного образования: материалы Международной научно-практической конференции. Омск, 2019. С. 221–226.
13. Соболенко А.Н. Расчет температуры и давления начала сжатия в рабочем цикле при охлаждении наддувочного воздуха по способу Миллера // Научные труды Дальрыбвтуза. 2016. Т. 37. С. 79-82.
14. Горбенко А.Н., Кукушкин М.Ю. Влияние атмосферных условий на эффективность испарительного охлаждения наддувочного воздуха судового дизеля // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 2. С. 72–81.
15. Radchenko A., Mikielwicz D., Forduy S., Radchenko M., Zubarev A. Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. P. 361-370. DOI:10.1007/978-3-030-37618-5_31.
16. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю., Акуленко В.М. Перспективность исследований и области применения малорасходных турбин // Вологодские чтения. 2010. № 78. С. 159–164.
17. Иванов И.Е., Алексеев И.В., Богданов С.Н. Подобие процессов и математическая аппроксимация характеристик турбин агрегатов наддува ДВС // СТИН. 2017. № 7. С. 10–13.

References:

1. Konks G.A., Lashko V.A. *Sovremennyye podxody k konstruirovaniyu porshnevnyx dvigatelej* [Modern approaches to the design of reciprocating engines]. Moscow, MORKNIGA Publ., 2009, 388 p. (In Russian).
2. Chajnov N.D., Ivashhenko N.A., Krasnokutskij A.N., Myagkov L.L. *Konstruirovaniye dvigatelej vnutrennego sgoraniya* [Designing internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 496 p. (In Russian).
3. Bezyukov O.K., Zhukov V.A. *Teoriya i konstrukciya sudovyx turbomashin* [Theory and design of marine turbomachines]. St. Petersburg, Adm. S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Waters Publ., 2022, 100 p. (In Russian).
4. Patral'cev N.N., Savastenko A.A. *Forsirovaniye dvigatelej vnutrennego sgoraniya nadduvom* [Supercharging internal combustion engines]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2004, 176 p. (In Russian).
5. Bezyukov O.K., Zhukov V.A. *Sudovy'e turbomashiny* [Marine turbomachines]. St. Petersburg, Adm. S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Waters Publ., 2021, 100 p. (In Russian).
6. Gert Xak, Langkabel` *Turbodvigateli i kompressory* [Turbo engines and compressors]. Moscow, AST: Astrel Publ., 2003, 350 p. (In Russian).
7. Erofeev V.L., Pryaxin A.S., Semenov P.D. *Teplotexnika v 2 t. Tom 1 Termodinamika i teoriya teploobmena* [Heat engineering in 2 volumes. Volume 1 Thermodynamics and theory of heat transfer], Moscow, Yurajt Publ., 2020, 308 p. (In Russian).
8. Ovsyannikov M.K., Petuxov V.A. *Dizeli v propul'sivnom komplekse morskix sudov* [Diesels in the propulsion system of marine vessels]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987, 256 p. (In Russian).
9. Kuiken K. *Diesel engines for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW*. Onnen, Netherlands: Target Global Energy Training, 2008, 363 p. (In English).
10. Bezyukov O.K., Zhukov V.A. *Teoriya i konstrukciya sudovyx turbomashin* [Theory and design of marine turbomachines]. St. Petersburg, Adm. S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Waters Publ., 2022, 100 p. (In Russian).
11. Lazarev E.A., Pomaz A.N. *E'ffektivnost' e`zhekcionnogo oxlazhdeniya nadduvochnogo*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

vozduxa i osobennosti ee eksperimental'noj ocenki [Efficiency of ejection cooling of charge air and features of its experimental evaluation]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering], 2016, vol. 16, no. 3, pp. 21-28. (In Russian).

12. Kalekin V.S., Grankin M.A. Oxlazhdenie potoka nadduvochnogo vozduxa dispergirovannoj zhidkost'yu [Cooling of the charge air flow with a dispersed liquid]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Dinamika razvitiya sistemy voyennogo obrazovaniya»* [Materials of the International scientific and practical conference “Dynamics of the development of the military education system”], Omsk, 2019, pp. 221–226. (In Russian).
13. Sobolenko A.N. Raschet temperatury i davleniya nachala szhatiya v rabochem cikle pri oxlazhdenii nadduvochnogo vozduxa po sposobu Millera [Calculation of the temperature and pressure of the beginning of compression in the working cycle during cooling of the charge air according to the Miller method]. *Nauchny'e trudy Dal'ry'bvtuza* [Scientific Works of Dalrybvtuz], 2016, vol. 37, pp. 79-82. (In Russian).
14. Gorbenko A.N., Kukushkin M.Yu. Vliyanie atmosfery'x uslovij na effektivnost' isparitel'nogo oxlazhdeniya nadduvochnogo vozduxa sudovogo dizelya [The influence of atmospheric conditions on the efficiency of evaporative cooling of the charge air of a marine diesel engine]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo texnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], 2020, no. 2, pp. 72–81. (In Russian).
15. Radchenko A., Mikielwicz D., Forduy S., Radchenko M., Zubarev A. Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, pp. 361–370. (In English). DOI:10.1007/978-3-030-37618-5_31.
16. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A. Yu., Akulenko V. M. Perspektivnost' issledovaniy i oblasti primeneniya malorasходny'x turbin [The prospects of research and applications of low-flow turbines]. *Vologdinskije chteniya* [Vologda Readings], 2010, no. 78, pp. 159–164. (In Russian).
17. Ivanov I.E., Alekseev I.V., Bogdanov S.N. Podobie processov i matematicheskaya approksimaciya xarakteristik turbin agregatov nadduva DVS [Similarity of processes and mathematical approximation of turbine characteristics of internal combustion engine boost units]. *STIN* [STIN], 2017, no. 7, pp. 10–13. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Жуков

**Владимир
Анатольевич**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой судостроения и энергетических установок

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
zhukovva@gumrf.ru

Zhukov
Vladimir
Anatolievich

Dr. Sci. (Techn.), Professor, Head of the Department of Shipbuilding and Power Plants
State University of Maritime and Inland Shipping named after Admiral S. O. Makarov
198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7
zhukovva@gumrf.ru

**Кротовская
Екатерина
Андреевна**

магистрант 2-го курса направления подготовки «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры»
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Вестник Керченского государственного морского технологического университета.

Серия: Морские технологии. 2025. № 1

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

kaf_sdvs@gumrf.ru

Krotovskaja
Ekaterina
Andreevna

2nd year Master's student in the field of study "Shipbuilding, Ocean
Engineering and Systems Engineering of Marine Infrastructure Facilities"
State University of Maritime and Inland Shipping named after Admiral S. O.
Makarov

198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7

kaf_sdvs@gumrf.ru

УДК 629.1

Ивановская А.В., Ивановский А.Н., Афанасьев В.В., Мельник В.Д.

**СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА НА РЫБОПРОМЫСЛОВОМ СУДНЕ:
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ методов и технологий оптимизации расхода топлива на морских судах, рассмотрены современные подходы к повышению энергетической эффективности морского транспорта. Исследованы технические, эксплуатационные и экономические аспекты снижения топливопотребления. В работе проведен анализ международных нормативных требований к энергетической эффективности применительно к рыбопромысловым судам. Рассмотрены основные международные конвенции, регламентирующие энергетические и экологические стандарты на морском транспорте, проанализированы ключевые методики оценки энергоэффективности и перспективы развития рыболовной отрасли. Проведена оценка экономического и экологического эффекта от внедрения предложенных мероприятий. Результаты исследования демонстрируют, что комплексный подход к оптимизации энергопотребления позволяет достичь снижения расхода топлива на 15-30% в зависимости от типа судна и условий эксплуатации.

Ключевые слова: рыбопромысловые суда, энергоэффективность, расход топлива, главная энергетическая установка.

Ivanovskaya A.V., Ivanovsky A.N., Afanasyev V.V., Melnik V.D.

**REDUCTION OF FUEL CONSUMPTION ON A FISHING VESSEL: AN INTEGRATED
APPROACH TO IMPROVING ENERGY EFFICIENCY**

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of methods and technologies for optimizing fuel consumption on marine vessels, and considers modern approaches to improving the energy efficiency of marine transport. The technical, operational and economic aspects of reducing fuel consumption are investigated. The paper analyzes international regulatory requirements for energy efficiency in relation to fishing vessels. The main international conventions regulating energy and environmental standards in maritime transport are considered, key methods for assessing energy efficiency and prospects for the development of the fishing industry are analyzed. An assessment of the economic and environmental impact of the implementation of the proposed measures has been carried out. The results of the study demonstrate that an integrated approach to optimizing energy consumption makes it possible to achieve a 15-30% reduction in fuel consumption, depending on the type of vessel and operating conditions.

Keywords: fishing vessels, energy efficiency, fuel consumption, main power plant.

Введение. Морской транспорт является одним из ключевых звеньев глобальной системы, обеспечивающих международную торговлю и экономическое взаимодействие. Вместе с тем, суда традиционно характеризуются высоким уровнем энергопотребления и значительными выбросами углекислого газа. Современное международное морское сообщество уделяет значительное внимание вопросам энергетической эффективности и экологичности судов, в том числе в такой специфической отрасли как рыбопромысловый флот. Необходимость снижения углеродного следа и повышения энергоэффективности рыбопромысловых судов обусловлена глобальными экологическими вызовами и экономическими факторами. Мероприятия по регулированию выбросов с судов закреплены в Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78, разработанной Международной морской организацией. В соответствии с Приложением VI Конвенции основные нормативные

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

требования касаются сокращения выбросов CO₂ на 40 % к 2030 году и контроля выбросов парниковых газов. В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения экологических требований повышение энергетической эффективности рыбопромысловых судов становится приоритетной задачей для судовладельцев и проектировщиков. Комплексный подход к решению данной проблемы требует учета множества факторов, включая конструктивные особенности судна, характеристики энергетической установки, режимы эксплуатации и применяемые технологии промысла.

Целью исследований является систематизация и анализ перспективных путей повышения энергоэффективности рыбопромыслового судна, учитывающих специфику эксплуатационных режимов судовой энергетической установки.

Материалы и методы исследования. В основу исследования положен системный анализ факторов, влияющих на энергопотребление рыбопромысловых судов. Для оценки эффективности предлагаемых мероприятий целесообразно использовать следующие показатели:

- удельный расход топлива (г/кВт·ч);
- коэффициент пропульсивной эффективности;
- индекс энергетической эффективности судна (EEDI);
- операционный индекс энергетической эффективности (EEOI);
- срок окупаемости инвестиций.

Основные направления снижения расхода топлива современного морского судна представлены на рисунке 1.

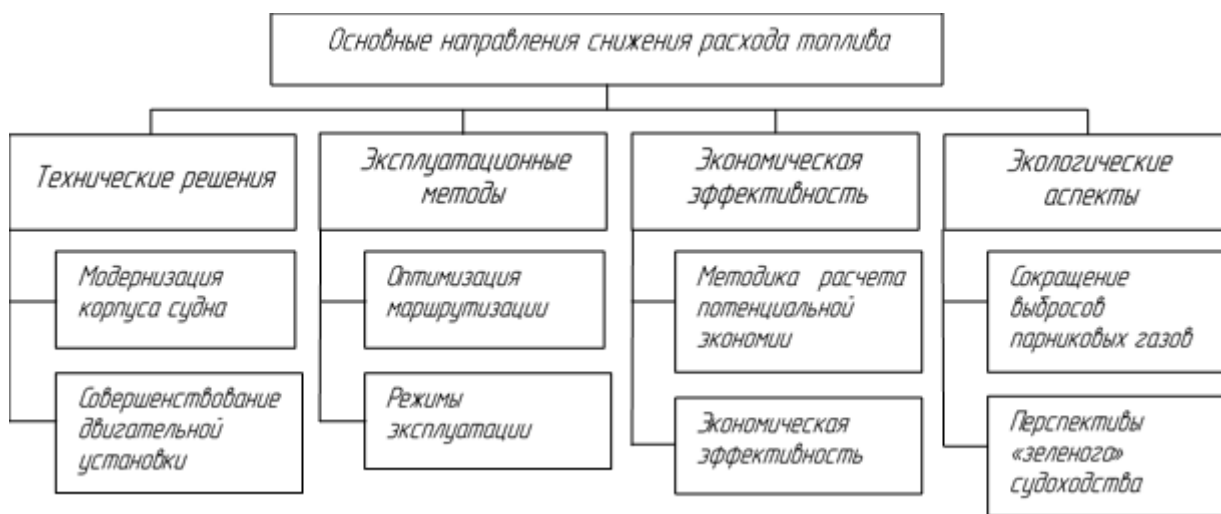


Рисунок 1 – Классификация основных направлений снижения расхода топлива

К техническим решениям относятся:

- модернизация корпуса судна: применение специальных покрытий, уменьшающих гидродинамическое сопротивление, оптимизация формы корпуса для снижения сопротивления воды и использование инновационных материалов с низким коэффициентом трения;

- совершенствование двигательных установок: внедрение высокоэффективных судовых дизельных двигателей, использование систем утилизации тепловой энергии, применение электронных систем управления двигателем.

Исследования показывают, что оптимизация обводов корпуса рыбопромысловых судов может обеспечить снижение сопротивления на 8-15%. Для достижения максимального эффекта необходимо учитывать специфику эксплуатации промысловых судов, включая работу на различных скоростях и в различных режимах загрузки.

Компьютерное моделирование с использованием методов вычислительной

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

гидродинамики (CFD) позволяет оценить эффективность предлагаемых изменений формы корпуса до начала модернизации. Натурные испытания модернизированных судов показывают, что оптимизация обводов позволяет снизить потребление топлива на 5-10 %.

Современные противообрастающие и низкофрикционные покрытия позволяют существенно снизить гидродинамическое сопротивление корпуса. Наиболее эффективными являются:

- самополирующиеся противообрастающие покрытия (SPC);
- силиконовые покрытия с гидрофобными свойствами;
- фторполимерные покрытия с низким коэффициентом трения.

Исследования, проведенные на промысловых судах различных типов, демонстрируют, что применение современных покрытий позволяет снизить сопротивление корпуса на 6-12 %, что эквивалентно экономии топлива на 3-8%.

Эффективность пропульсивной установки рыбопромысловых судов может быть повышена за счет:

- установки винтов с оптимизированным профилем;
- применения насадок различного типа;
- использования энергосберегающих устройств (предкрыльевые устройства, направляющие насадки и т.д.).

Особое внимание следует уделить оптимизации движителей для работы в буксировочном режиме, характерном для траловых операций [1-4]. Модернизация движительного комплекса позволяет повысить пропульсивный коэффициент на 7-15 %, что соответствует снижению расхода топлива на 5-10%.

Замена устаревших главных двигателей на современные модели с высоким КПД является одним из наиболее эффективных способов снижения расхода топлива. Современные судовые дизели имеют удельный расход топлива на 10-15% ниже по сравнению с установками, спроектированными 20-30 лет назад [5-7].

При выборе новой энергетической установки необходимо учитывать:

- характеристики двигателя во всем диапазоне нагрузок;
- соответствие мощности двигателя режимам эксплуатации судна;
- возможность работы на различных видах топлива.

На рисунке 2 представлены технические решения и мероприятия, которые целесообразно применять как при эксплуатации судовой энергетической установки, так и при ее проектировании и модернизации.

Эксплуатационные методы следует разделить на:

- оптимизацию маршрутизации: выбор оптимальных океанических маршрутов, учет метеорологических условий, использование систем прогнозирования погоды;
- режимы эксплуатации: контроль скорости судна, регулярное техническое обслуживание, подготовка экипажа в области энергоэффективности.

Одним из наиболее действенных методов снижения расхода топлива является оптимизация скоростного режима судна. Расход топлива приблизительно пропорционален кубу скорости, поэтому даже небольшое снижение скорости может дать значительную экономию.

Для рыбопромысловых судов особенно важна оптимизация скорости при переходах между районами промысла. Анализ данных эксплуатации показывает, что снижение скорости перехода на 10 % может обеспечить экономию топлива до 25-30 %.

Использование систем оптимизации маршрутов с учетом погодных условий, течений и характеристик судна позволяет существенно сократить потребление топлива. Современные системы маршрутизации учитывают:

- прогноз погоды и состояния моря;
- данные о течениях;
- оптимальную загрузку судна;

- временные ограничения.

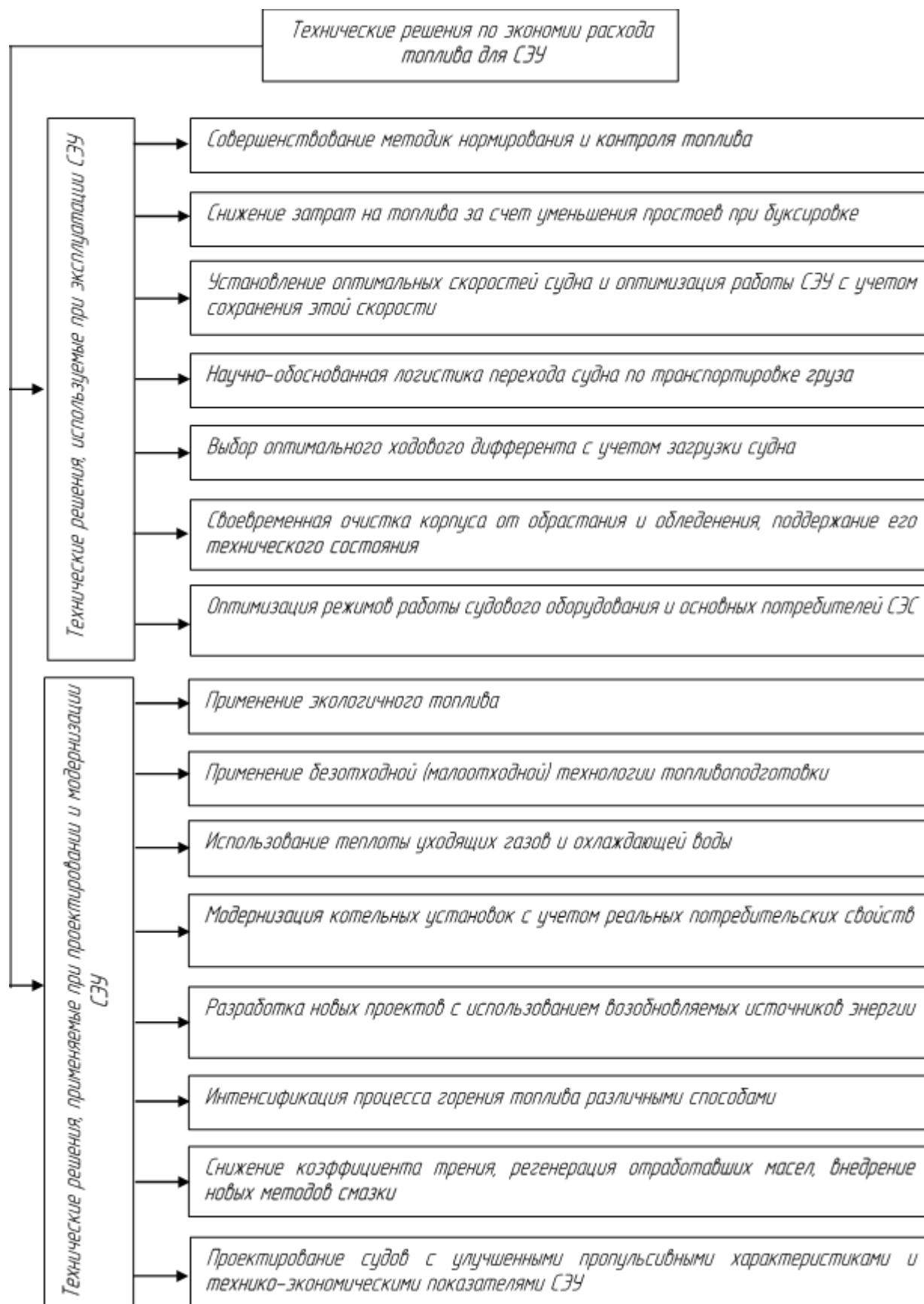


Рисунок 2 – Классификационная схема способов и технических решений повышения эффективного использования судового топлива

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Практика показывает, что применение систем оптимизации маршрутов обеспечивает экономию топлива на 4-8 %.

Регулярное техническое обслуживание является необходимым условием поддержания высокой энергетической эффективности судна. Особое внимание следует уделять:

- очистке корпуса от обрастаний;
- обслуживанию движителей;
- регулировке и настройке главных и вспомогательных двигателей;
- обслуживанию систем охлаждения и смазки.

По данным исследований, регулярная очистка корпуса может обеспечить снижение сопротивления на 8-12 %, а настройка двигателей – уменьшение расхода топлива на 3-5 %.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим подробнее особенности эксплуатации энергетической установки рыбопромыслового судна [8]. Основными компонентами ЭУ траулера являются:

- главный двигатель – в основном это среднеоборотные дизельные двигатели мощностью от 1500 до 6000 кВт типовых производителей MAN, Wartsila, Caterpillar;
- 2-3 вспомогательных дизель-генераторов мощностью 250-800 кВт, обеспечивающие электроэнергией судовых потребителей;
- валогенераторы, выполняющие функции преобразования механической энергии в электрическую и повышения общей энергоэффективности установки.

К специализированным энергетическим системам относятся:

- гидравлические системы траловых лебедок;
- системы охлаждения и заморозки улова;
- насосные агрегаты рыбообработывающего комплекса;
- системы обогрева и кондиционирования.

Работа палубного оборудования осуществляется за счет электро- и гидроэнергии, предопределяя структурную компоновку СЭУ (рис. 3-6).

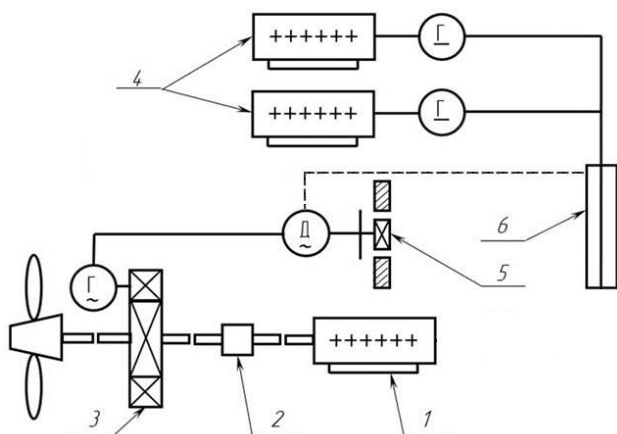


Рисунок 3 – Структурная схема СЭУ с электроприводом грузоподъемного устройства (с отбором мощности от валогенератора):

- 1 – главный двигатель;
- 2 – гидравлическая муфта; 3 – редуктор;
- 4 – вспомогательный дизель-генератор;
- 5 – промысловая лебедка; 6 – ГРЩ

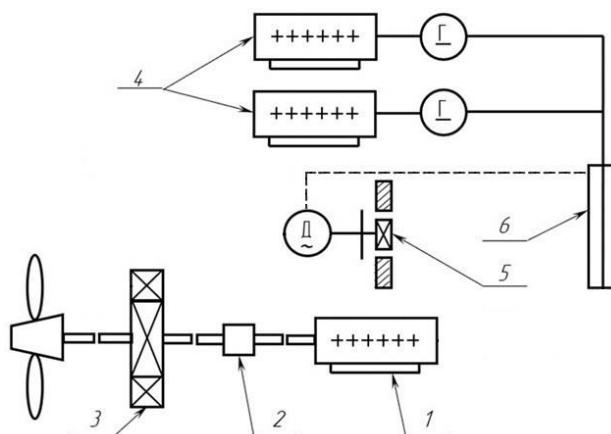


Рисунок 4 – Структурная схема СЭУ с электроприводом грузоподъемного устройства (с отбором мощности от ГРЩ):

- 1 – главный двигатель;
- 2 – гидравлическая муфта; 3 – редуктор;
- 4 – вспомогательный дизель-генератор;
- 5 – промысловая лебедка; 6 – ГРЩ

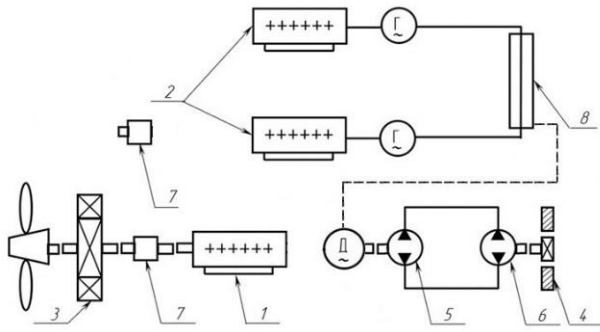


Рисунок 5 – Структурная схема СЭУ с гидроприводом грузоподъемного устройства (с отбором мощности от ГРЦ):

- 1 – главный двигатель;
- 2 – вспомогательный дизель-генератор;
- 3 – редуктор; 4 – промышленная лебедка;
- 5 – насос гидропередачи;
- 6 – гидродвигатель;
- 7 – разобщительная муфта; 8 – ГРЦ

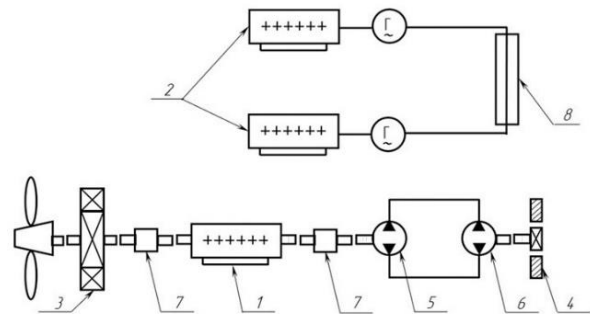


Рисунок 6 – Структурная схема СЭУ с гидроприводом грузоподъемного устройства (с отбором мощности от ГД):

- 1 – главный двигатель;
- 2 – вспомогательный дизель-генератор; 3 – редуктор; 4 – промышленная лебедка; 5 – насос гидропередачи;
- 6 – гидродвигатель; 7 – разобщительная муфта; 8 – ГРЦ

Режимы энергопотребления делятся на переходный, траловый и стояночный. На переходном режиме осуществляется перемещение между районами лова, при котором главный двигатель максимально загружен на 85-95 %, обеспечивая скорость в 10-14 узлов, расход топлива составляет 80-120 тонн в сутки. При траловом режиме скорость движения снижена до 3-5 узлов, основная нагрузка на вспомогательные системы, обеспечивающие работу палубного оборудования, главный двигатель загружен на 30-50 %, расход топлива достигает 40-60 тонн в сутки. При стояночном режиме осуществляется работа дежурных систем за счет работы одного вспомогательного дизель-генератора, расход топлива при этом 5-10 тонн в сутки. Энергетическая нагрузка распределяется следующим образом: главный двигатель – 50-60 %, палубное оборудование – 20-25 %, системы охлаждения и заморозки – 10-15 % и вспомогательные системы – 5-10 %.

Для оценки энергетической эффективности СЭУ следует решить задачу R обеспечения максимального пропульсивного КПД на определенных участках измерения скорости хода судна, а также необходимо одновременное управление W частотой вращения и шагом винта, в случае применения винта фиксированного шага. Такую задачу запишем в виде:

$$R: V(N_{eГД}, N_{eДГ}, H, n, g_{eГД}, g_{eДГ}) \rightarrow \max \eta_{ПК} \Rightarrow W, \quad (1)$$

где $g_{eГД}, g_{eДГ}$ – удельный расход топлива главных и вспомогательных двигателей.

Если для каждой заданной скорости траулера $v_i \in V, i=1, \dots, m$ и $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ существует такая некоторая точка a_i , что существует оптимальное решение, которое, исходя

из условия минимума расхода топлива $\int_{t_j}^{t_{j+1}} (g_{ei} - a_i) dt \rightarrow 0$, позволяет найти условия, которые

оказывают влияние на H и n . Нахождение значений этих условий и поддержание их при любых режимах работы, обеспечит функционирование энергетической установки рыбопромыслового судна в режиме минимального расхода топлива.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Спецификой энергетического комплекса рыболовецких судов является:

- высокая динамичность энергетических нагрузок;
- необходимость обеспечения силовых установок для движения судна, работы промыслового оборудования и вспомогательных судовых систем, цикличность режимов работы двигателей.

Оптимизировать режимы работы главного двигателя целесообразно за счет варьирования скорости при поиске и лове рыбы, маневрирования в период траления, а также выбора экономичных режимов перехода между районами промысла. К методам снижения топливопотребления главным двигателем относят точную настройку топливной аппаратуры, оптимизацию угла опережения впрыска, балансировку нагрузки цилиндров и использование систем электронного управления двигателем. Кроме этого, для оптимизации энергопотребления следует рассчитать оптимальную скорость траления, адаптировать мощность двигателя под тип трала, ввести систему автоматического контроля нагрузки, обеспечить снижение сопротивления при буксировке орудий лова.

Высокую эффективность при повышении энергоэффективности судна показала утилизация вторичных энергетических ресурсов, реализуемая за счет системы рекуперации тепла, которая обеспечивает утилизацию тепла выхлопных газов, использование теплоты охлаждающих систем, применения органического цикла Ренкина и генерации дополнительной электроэнергии.

В настоящее время идеи эксергетического подхода получили определенное развитие в инженеринговой практике. На базе теплового и эксергетического анализа разработаны методики, основанные на определении энергии или эксергии потоков в исследуемой тепловой системе. Они используются также для построения энергетического или эксергетического баланса объектов, соединяемых этими потоками и позволяющих производить мониторинг этих объектов с точки зрения энергоэффективности, выявлять участки технологических процессов, где имеется потенциал энергосбережения. Эксергетический анализ позволит получить ценную информацию и выработать стратегию по повышению экономической, энергетической и экологической эффективности рыбопромыслового флота. При определении энергетического баланса траулера выполняется расчет потенциала утилизации энергии, интеграция систем утилизации с холодильным оборудованием, снижение безвозвратных потерь энергии.

Еще одним направлением повышения энергетической эффективности рыбопромыслового судна следует выделить внедрение специализированных систем управления: цифровой мониторинг энергоустановки за счет системы непрерывного контроля параметров, прогнозирования расхода топлива и диагностики технического состояния механизмов. При этом интеллектуальные системы оптимизации подразумевают адаптивное управление режимами работы, корреляцию энергетических режимов с промысловой обстановкой, машинное обучение для прогнозирования нагрузок.

Для траулеров значительную часть энергопотребления составляет буксировка трала. Современные разработки в области промыслового оборудования направлены на снижение гидродинамического сопротивления траловых систем:

- применение сетей из высокопрочных материалов с уменьшенным диаметром нитей;
- использование гидродинамически оптимизированных траловых досок;
- внедрение систем контроля геометрии трала.

Исследования показывают, что модернизация траловой системы может снизить сопротивление на 15-25 %, что эквивалентно экономии топлива на 10-15 %.

Современные электрические и гидравлические лебедки с регулируемым приводом позволяют существенно снизить энергопотребление при выполнении промысловых операций [9-10]. Внедрение систем рекуперации энергии при спуске трала или ярусов обеспечивает дополнительную экономию. По оценкам экспертов, использование энергоэффективных лебедок позволяет снизить расход топлива на 3-7 %.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Внедрение систем мониторинга энергопотребления позволяет оперативно выявлять неэффективные режимы работы и принимать меры по их оптимизации. Современные системы энергетического мониторинга включают:

- датчики расхода топлива;
- системы контроля параметров двигателей;
- анализаторы качества электроэнергии;
- интегрированные информационные системы.

Опыт эксплуатации показывает, что внедрение систем энергетического мониторинга позволяет снизить расход топлива на 5-10 % за счет оптимизации режимов работы оборудования.

Современные автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками позволяют оптимизировать работу всех элементов энергетической системы:

- главных и вспомогательных двигателей;
- генераторов электроэнергии;
- систем охлаждения и кондиционирования;
- осветительного и технологического оборудования.

Внедрение интегрированных систем управления обеспечивает экономию топлива до 8-12 %.

К экологическим аспектам относятся:

- сокращение выбросов парниковых газов: количественная оценка снижения углеродного следа, соответствие международным экологическим стандартам;
- перспективы «зеленого» судоходства: альтернативные виды топлива, электрические и гибридные силовые установки;
- системы утилизации теплоты.

Рекуперация тепловой энергии от выхлопных газов, охлаждающей воды и смазочного масла позволяет существенно повысить общий КПД энергетической установки. Для рыбопромысловых судов особенно эффективны:

- утилизационные котлы, использующие энергию выхлопных газов;
- теплообменники для подогрева технологической воды;
- системы когенерации электроэнергии.

Внедрение комплексной системы утилизации теплоты может обеспечить экономию топлива до 5-8 %.

Переход на альтернативные виды топлива является перспективным направлением повышения энергетической эффективности и экологичности рыбопромыслового флота. Наиболее перспективными для промысловых судов являются:

- сжиженный природный газ (СПГ);
- биотопливо;
- гибридные силовые установки.

Исследования показывают, что использование СПГ позволяет снизить выбросы CO₂ на 20-25 %, а эксплуатационные расходы – на 15-20 %. Однако внедрение альтернативных видов топлива требует значительных инвестиций в модернизацию судовых систем и инфраструктуры.

Снижение расхода топлива непосредственно связано с уменьшением выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. По оценкам экспертов, каждая тонна сэкономленного судового топлива позволяет снизить выбросы:

- CO₂ на 3,1-3,2 тонны;
- NO_x на 45-60 кг;
- SO_x на 20-40 кг (в зависимости от содержания серы в топливе);
- твердых частиц на 4-7 кг.

Экономическая эффективность подразумевает:

- методику расчета потенциальной экономии: анализ базовых показателей расхода

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

топлива, оценка капитальных затрат на модернизацию, расчет срока окупаемости мероприятий;

- экономический эффект: снижение операционных расходов, уменьшение экологического сбора, повышение конкурентоспособности судоходной компании.

Экономическая оценка предлагаемых мероприятий проводилась на основе данных эксплуатации рыбопромысловых судов различных типов. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Экономическая эффективность мероприятий по снижению расхода топлива

Мероприятие	Снижение расхода топлива, %	Инвестиции, млн. руб.	Срок окупаемости, лет
Оптимизация обводов корпуса	5 – 10	12,5 – 25	2,5 – 4,0
Применение специальных покрытий	3 – 8	4 – 8	1,0 – 2,0
Модернизация движительного комплекса	5 – 10	8 – 16	1,5 – 3,0
Модернизация главных двигателей	10 – 15	33,5 – 70	3,0 – 5,0
Системы утилизации теплоты	5 – 8	6,5 – 12,5	1,5 – 2,5
Альтернативные виды топлива	15 – 20	67 – 125,5	4,0 – 7,0
Оптимизация скоростного режима	10 – 30	0,8 – 1,6	0,2 – 0,5
Оптимизация маршрутов	4 – 8	1,25 – 2,5	0,3 – 0,7
Техническое обслуживание	5 – 10	2,5 – 4	0,5 – 1,0
Модернизация траловых систем	10 – 15	8 – 16	1,5 – 2,5
Энергоэффективные лебедки	3 – 7	4 – 8	1,0 – 2,0
Системы энергетического мониторинга	5 – 10	3,3 – 6,6	0,8 – 1,5
Автоматизированные системы управления	8 – 12	5,8 – 12,5	1,0 – 2,0

Как видно из таблицы, наиболее экономически эффективными являются мероприятия эксплуатационного характера, не требующие значительных инвестиций. Однако для достижения максимального эффекта необходим комплексный подход, включающий как конструктивные, так и эксплуатационные меры.

Таким образом, внедрение комплекса мероприятий по повышению энергетической эффективности рыбопромысловых судов не только снижает эксплуатационные расходы, но и вносит значительный вклад в улучшение экологической ситуации.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Комплексный подход к повышению энергетической эффективности рыбопромысловых судов позволяет достичь снижения расхода топлива на 15-30 % в зависимости от типа судна и условий эксплуатации.

2. Наибольший эффект достигается при сочетании конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий, адаптированных к конкретным условиям работы судна.

3. Экономическая эффективность мероприятий по снижению расхода топлива определяется не только прямой экономией затрат на энергоносители, но и косвенными

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

факторами, такими как увеличение промыслового времени, снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также повышение экологичности промысла.

4. Для максимальной эффективности программ по снижению расхода топлива необходимо внедрение систем мониторинга энергопотребления и обучение экипажей методам энергоэффективной эксплуатации судов.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке программ модернизации существующего рыбопромыслового флота и проектировании новых судов с учетом современных требований к энергетической эффективности и экологичности.

Список использованной литературы:

1. *Тё А.М.* Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств: учебное пособие. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2014. 178 с.
2. *Башуров Б.П., Скиба А.Н., Чебанов В.С.* Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учебное пособие. Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2009. 192 с.
3. *Ивановская А.В.* Формализация движения буксируемого объекта по поверхности, как часть системного подхода при моделировании судовой лебедки // Вестник КГМТУ. Серия: Морские технологии. 2023. № 2. С. 57–65.
4. *Ивановская А.В., Ивановский А.Н., Черный С.Г.* Постановка задачи автоматизации выборки трала в процессе промысла // Судостроение. 2023. № 1. С. 38–42.
5. *Ивановская А.В., Богатырева Е.В., Ивановский А.Н.* Создание конкурентоспособного рыбопромыслового флота Республики Крым: проблема и пути решения // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий: сборник материалов I Всероссийской конференции. Астрахань, 2023. С. 84–88.
6. *Нино В.П.* Диагностика технических средств на рыбопромысловых судах в процессе их эксплуатации // Рыбное хозяйство. 2014. № 4. С. 113–115.
7. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
8. *Carral J., Carral L., Lamas M., Rodríguez M.J.* Fishing grounds' influence on trawler winch design // Ocean Engineering. 2015. Vol. 102. P. 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
9. *Ivanovskaya A., Popov V., Bogatyreva E., Bidenko S.* Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations // Vibroengineering Procedia. 2019. Vol. 25. P. 171–176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
10. *Ивановская А.В., Жуков В.А., Попов В.В.* Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 6. С. 875–886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.

References:

1. *Tyo A.M.* *Ekspluataciya sudovyh vspomogatel'nyh mekhanizmov, sistem i ustrojstv* [Operation of ship auxiliary mechanisms, systems and devices]. Vladivostok, MGU im. adm. G.I. Nevel'skogo Publ., 2014, 178 p. (In Russian).
2. *Bashurov B.P., Skiba A.N., Chebanov V.S.* *Funkcional'naya nadezhnost' i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovyh vspomogatel'nyh mekhanizmov* [Functional reliability and control of the technical condition of ship's auxiliary mechanisms]. Novorossiysk, MGA named after Admiral F.F. Ushakov Publ., 2009, 192 p. (In Russian).
3. *Ivanovskaya, A.V.* *Formalizaciya dvizheniya buksiruemogo ob`ekta po poverxnosti, kak chast` sistemnogo podxoda pri modelirovanii sudovoj lebedki* [Formalization of the movement of a towed object on the surface, as part of a systematic approach to modeling a ship's winch]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo texnologicheskogo universiteta. Seriya: Morskie texnologii.* [Bulletin of KSMTU. Series: Marine Technologies], 2023, no. 2, pp. 57–65. (In

Russian).

4. Ivanovskaya A.V., Ivanovskiy A.N., Chernyy S.G. Postanovka zadachi avtomatizacii vy`borki trala v processe promy`sla [Setting the task of automating trawl sampling in the fishing process]. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2023, no. 1, pp. 38–42. (In Russian).
5. Ivanovskaya A.V., Bogaty`reva E.V., Ivanovskij A.N. Sozdanie konkurentosposobnogo ry`bopromy`slovogo flota Respubliki Kry`m: problema i puti resheniya [Creation of a competitive fishing fleet of the Republic of Crimea: the problem and solutions]. *Sbornik materialov 1 Vserossijskoj konferencii «Razvitie e`nergetiki vodnogo transporta, informacionny`x i e`nergoberegayushhix texnologij»* [Proceedings of the 1th All-Russian Conference “Development of water transport energy, information and energy-saving technologies”], 2023, pp. 84–88. (In Russian).
6. Nino V.P. Diagnostika tekhnicheskikh sredstv na rybopromyslovykh sudakh v protsesse ikh ekspluatatsii [Diagnostics of technical means on fishing vessels during their operation]. *Rybnoe khoziaistvo* [Fisheries], 2014, no. 4, pp. 113–115. (In Russian).
7. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006, 704 p. (In Russian).
8. Carral J., Carral L., Lamas M., Rodríguez M.J. Fishing grounds’ influence on trawler winch design. *Ocean Engineering*, 2015, vol. 102, pp. 136–145. (In English). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
9. Ivanovskaya A., Popov V., Bogatyreva E., Bidenko S. Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations. *Vibroengineering Procedia*, 2019, vol. 25, pp. 171–176. (In English). DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
10. Ivanovskaia A.V., Zhukov V.A., Popov V.V. Issledovanie dinamiki privodov gruzopod`emnykh ustroystv rybopromyslovogo sudna [Studying dynamics of drives of load-lifting devices of fishing vessel]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the State University of Maritime and Inland Shipping Named After Admiral S.O. Makarov], 2021, vol. 13, no. 6, pp. 875–886. (In Russian). DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.

Сведения об авторах / Information about authors

Ивановская Александра Витальевна	канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 invkerh@yandex.ru
Ivanovskaya Aleksandra Vital’evna	Ph.D (Engin.), Associate Professor at the Department of marine power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 invkerh@yandex.ru
Ивановский Алексей Николаевич	канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения и промышленного рыболовства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 aleksei.ivanovskii@yandex.ru
Ivanovskii Aleksai Nikolaevich	Ph.D. (Engin.), Professor Assistant at the Department of Navigation and Fishery Kerch State Maritime Technological University

Вестник Керченского государственного морского технологического университета.

Серия: Морские технологии. 2025. № 1

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)**

298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
aleksei.ivanovskii@yandex.ru

**Афанасьев
Виталий
Витальевич**

аспирант кафедры судовых энергетических установок
Керченский государственный морской технологический
университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
seykgmtu@gmail.com

Afanasev
Vitalii
Vitalevich

post-graduate at the Department of marine power plants
Kerch State Maritime Technological University
28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
seykgmtu@gmail.com

**Мельник
Владислав
Дмитриевич**

курсант 4-го курса направления подготовки «Эксплуатация судовых
энергетических установок»
Керченский государственный морской технологический
университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
invkerch@yandex.ru

Melnik
Vladislav
Dmitrievich

cadet of the 4nd year of the training direction «Operation of marine power
plants»
Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
invkerch@yandex.ru

Конюков В.Л., Богатырева Е.В.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Аннотация. В работе проводится анализ функциональных связей утилизационной абсорбционной холодильной машины (УАБХМ), на основании чего определяется количество уравнений в системе для проведения оптимизационных исследований. При решении задач, связанных с оптимизацией утилизационных абсорбционных холодильных машин, используется системный подход, принцип которого рассматривается в данной работе. Приведены примеры разделения АБХМ на подсистемы. Представлен граф упрощенной тепловой схемы АБХМ. Определяется полное число связей, которые являются ребрами графа, число однопараметрических связей, число трехпараметрических теплоносителей, число фиксированных внешних связей, и, наконец, число зависимых параметров, т.е. число балансовых уравнений. Полученные результаты позволят решать дальнейшие задачи комплексной оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, системный подход, теория графов, утилизация теплоты, абсорбционная холодильная машина.

Konyukov V.L., Bogatyreva E.V.

ANALYSIS OF FUNCTIONAL RELATIONSHIPS OF A RECYCLING ABSORPTION REFRIGERATING MACHINE

Abstract. The paper analyzes the functional relationships of a recycling absorption refrigerating machine (ABRM), on the basis of which the number of equations in the system for optimization studies is determined. When solving problems related to the optimization of recycling absorption refrigerating machines, a systematic approach is used, the principle of which is considered in this paper. An example of the division of ABCM into subsystems is given. The graph of the simplified ABHM thermal scheme is presented. The total number of connections that are edges of the graph is determined, the number of one-parameter connections, the number of three-parameter heat carriers, the number of fixed external connections, and, finally, the number of dependent parameters, i.e. the number of balance equations. The results obtained will allow us to solve further complex optimization problems.

Keywords: optimization, system approach, graph theory, heat recovery, absorption refrigeration machine.

Введение. В ранее опубликованных работах [1-6] было дано обоснование использования утилизационных абсорбционных холодильных машин на малых судах промыслового флота, определены задачи оптимизации рабочих параметров, установлено влияние внешних параметров на работу установки. В данной работе исследуемым объектом является УАБХМ, которая выделена как подсистема судовой энергетической установки (СЭУ). Судовая энергетическая установка является подсистемой судна.

При оптимизации основных параметров теплоэнергетических установок на основе термодинамического анализа не учитываются технические ограничения. При этом рассматривается ограниченное число возможных параметров установки и узкий диапазон изменения ее параметров. Метод математического моделирования позволяет описать все основные связи, характеризующие изучаемый объект и раскрыть внутреннюю логику изучаемых явлений, позволяет найти качественно новые связи и закономерности. Процесс построения математической модели происходит в условиях удовлетворения противоречивых требований. Необходимо наиболее полно учесть все связи в объекте, при этом нужно довести

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

исследование до численного решения, свести задачу к известной математической задаче, для решения которой есть разработанные методы [7-10].

Целью исследования является определение количества независимых параметров, и, как следствие, количества уравнений системы для оптимизации параметров работы АБХМ.

Материалы и методы исследования. В настоящей работе на основании системного подхода используется теория графов.

Исследуемым объектом является судовая утилизационная абсорбционная аммиачная холодильная установка

Результаты исследования и их обсуждение. На основании принципиальной схемы представим энергосберегающую систему УАБХМ в форме графа (рис.1), что позволит выполнить математически строгое и наглядное ее рассмотрение.

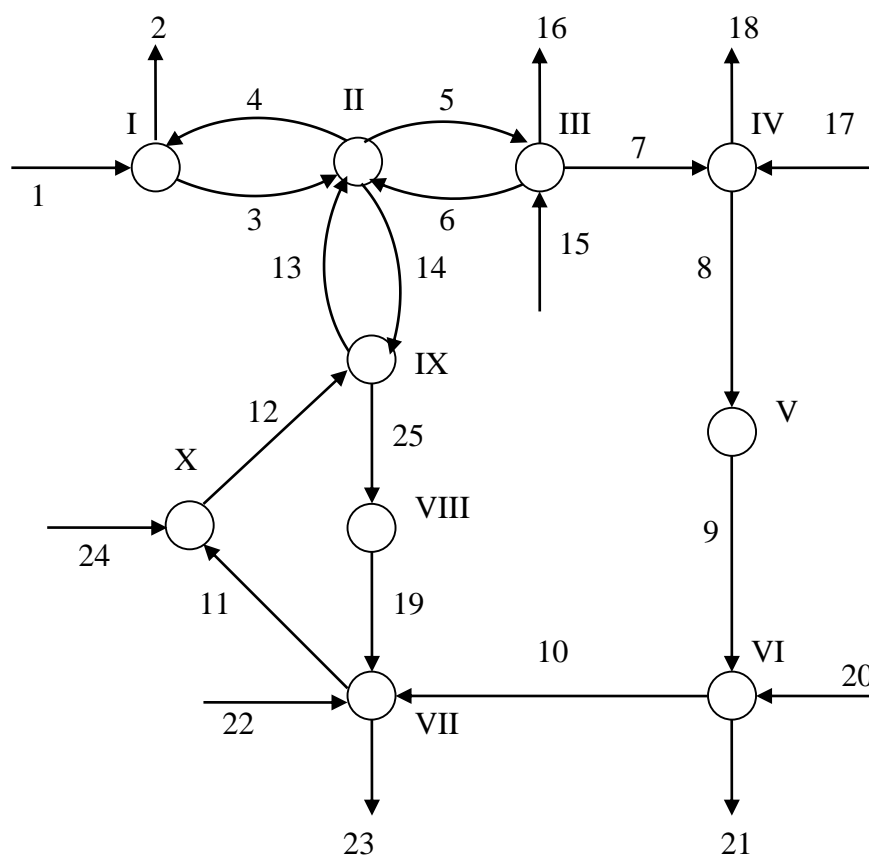


Рисунок 1 – Граф тепловой схемы УАБХМ

I – утилизационный котел; II – генератор с ректификатором;
III – дефлегматор; IV – конденсатор; V – дроссельный вентиль хладагента; VI – испаритель;
VII – абсорбер; VIII – дроссельный вентиль раствора; IX – теплообменник растворов;
X – насос крепкого раствора.

Для решения поставленной задачи произведен анализ функциональных связей графов. При исследовании приняты обозначения, приведенные ниже.

- V – число (полное) термодинамических и расходных параметров связей;
- V_z – число зависимых параметров, т. е. число балансовых уравнений системы;
- W_0 – число фиксированных параметров внешних связей;
- V_x – число независимых параметров;
- I – полное число связей системы (число ребер графа);
- N – число однопараметрических связей;

L_k – число трехпараметрических энергоносителей в k -ом элементе оборудования;

k – число элементов оборудования системы (вершин графа).

$$V = 3I - 2N;$$

$$V_z = 2 \sum_{k=1}^k L_k + k;$$

$$V_x = V - W_0 - V_z = (3I - 2N) - W_0 - \left(2 \sum_{k=1}^k L_k + k \right).$$

На основании приведенного уравнения выполним анализ параметров каждой функциональной связи элементов, входящих в состав тепловой схемы УАБХМ.

I – Утилизационный паровой котел

В качестве независимых параметров приняты температура газа за утилизационным котлом и температура конденсата на входе в него, т.к. последняя определяет количество подведенной теплоты в генераторе УАБХМ.

Граф утилизационного парового котла изображен на рисунке 2.

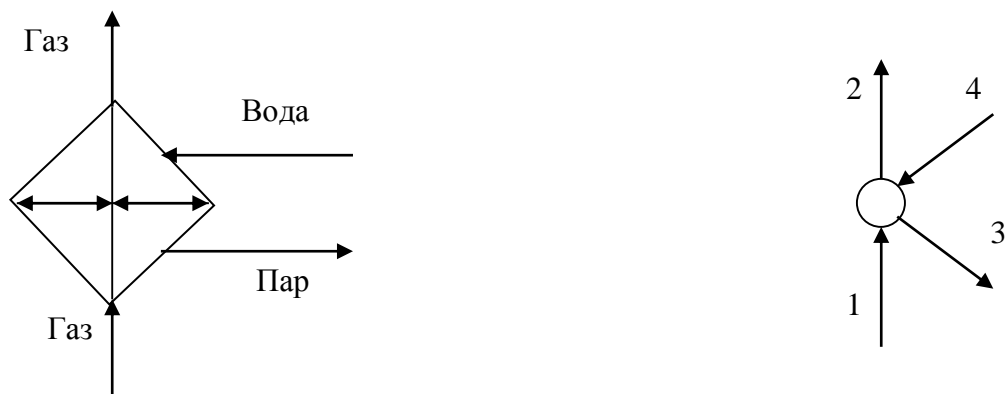


Рисунок 2 – Граф утилизационного парового котла

$I = 4$ – полное число связей (ребер графа);

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

W_0 – число фиксированных внешних связей;

V_z – число зависимых параметров, т.е. число балансовых уравнений:

$$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$V_x = (3I - 2N) - W_0 - (2L + 1) = (3 \cdot 4 - 2 \cdot 0) - 5 - 5 = 2;$$

V – полное число термодинамических параметров связей:

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 0 = 12.$$

V_x – число независимых параметров:

- температура газа за УК;
- температура конденсата на входе в УК.

Суммарное количество фиксированных параметров внешних связей $W_0 = 5$ и определялось из анализа параметров каждой связи (таблица 1).

Таблица 1 – Анализ связей графа УПК

Номер связи	1	2	3	4	Σ
W_0	3	0	2	0	5

Далее на рисунках 3 – 9 приведены графы элементов УАБХМ, а также анализ связей и параметров.

II – Генератор

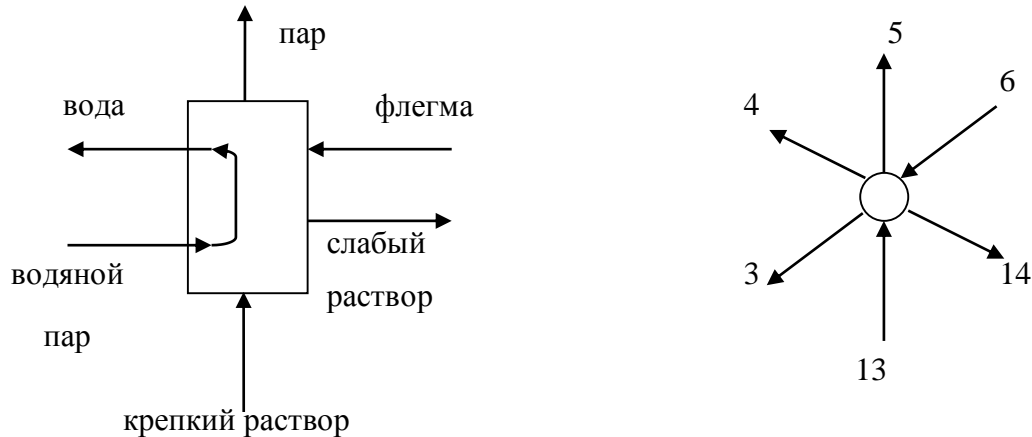


Рисунок 3 – Граф генератора

$I = 6$ – полное число связей (ребер графа);

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 6 - 2 \cdot 0 = 18;$$

$$V_x = (3I - 2N) - W_0 - (2L + 1) = V - W_0 - V_z = 18 - 9 - 5 = 4; W_0 = 9.$$

Независимые параметры:

- температура воды на выходе;
- расход флегмы;
- энтальпия слабого раствора;
- энтальпия крепкого раствора.

Таблица 2 – Анализ связей генератора

Номер связи	3	4	5	6	13	14	Σ
W_0	3	0	2	1	2	1	9

III – Дефлегматор

$I = 4$ – полное число связей (ребер графа);

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 0 = 12;$$

$$V_x = V - W_0 - V_z = 12 - 6 - 5 = 1;$$

$$W_0 = 6.$$

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

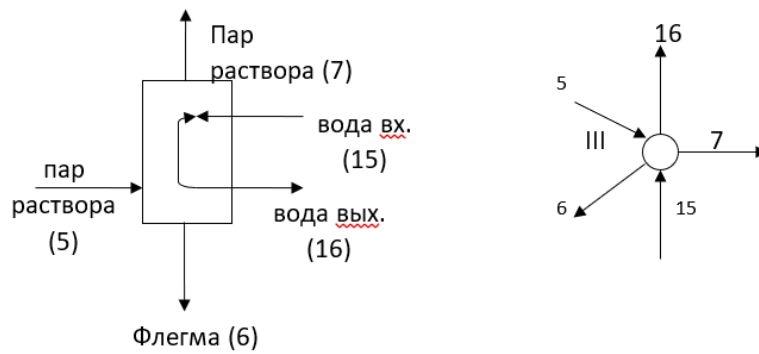


Рисунок 4 – Граф дефлегматора

Независимые параметры:

- энтальпия флегмы;
- температура воды на выходе;
- расход флегмы;
- энтальпия пара на выходе.

Таблица 3 – Анализ связей дефлегматора

Номер связи	5	6	7	15	16	Σ
W_0	2	1	1	2	0	6

IV – Конденсатор

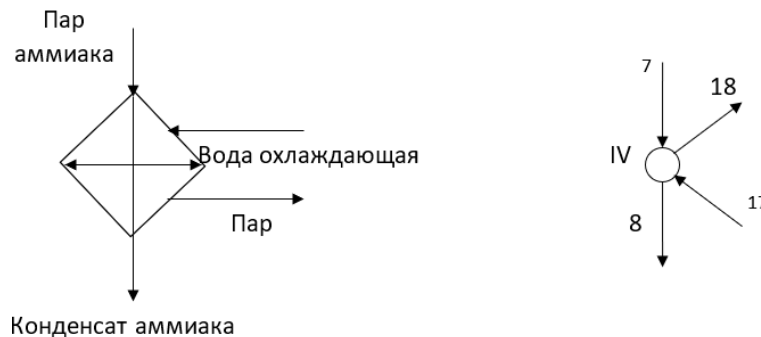


Рисунок 5 – Граф конденсатора

$I = 4$ – полное число связей (ребер графа);

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 0 = 12;$$

$$V_x = (3I - 2N) - W_0 - (2L + 1) = V - W_0 - V_z = 12 - 6 - 5 = 1;$$

$$W_0 = 6.$$

Независимый параметр:

- температура охлаждающей воды на выходе.

Таблица 4 – Анализ связей конденсатора

Номер связи	7	8	17	18	Σ
W_0	2	1	3	0	6

VI – Испаритель

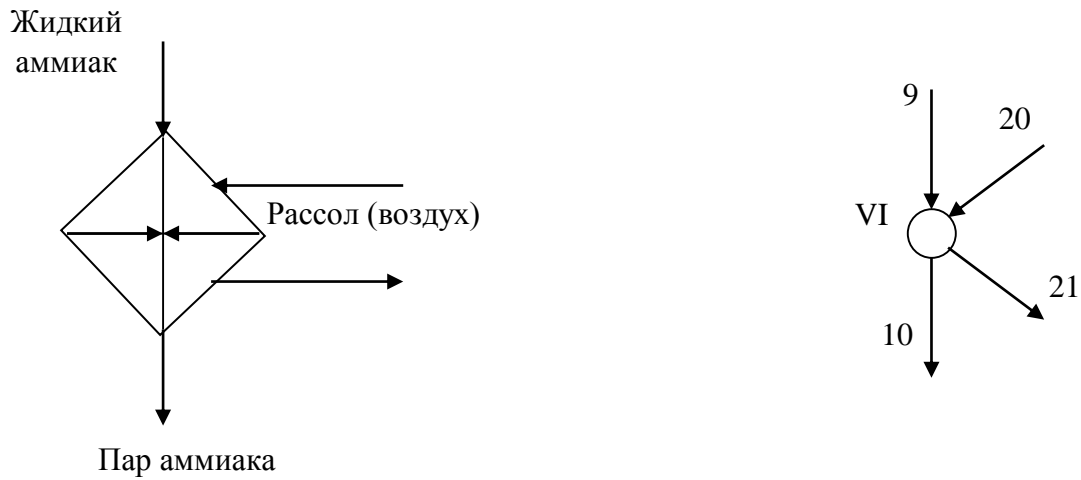


Рисунок 6 – Граф испарителя

$I = 4$ – полное число связей (ребер графа); $I = 4$

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5$;

$V = 3I - 2N = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 0 = 12$;

$V_x = (3I - 2N) - W_0 - (2L + 1) = V - W_0 - V_z = 12 - 6 - 5 = 1$

$W_0 = 6$.

Независимый параметр:

- температура рассола на выходе (возможно, и на входе).

Таблица 5 – Анализ связей испарителя

Номер связи	7	8	17	18	Σ
W_0	2	1	3	0	6

VII – Абсорбер

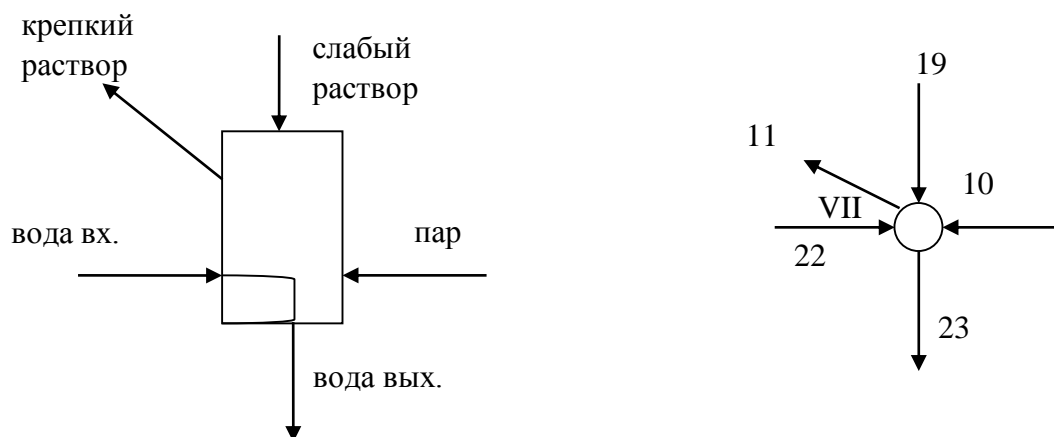


Рисунок 7 – Граф абсорбера

$I = 5$ – полное число связей (ребер графа); $I = 4$

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 0 = 15;$$

$$V_x = V - W_0 - V_z = 15 - 9 - 5 = 1;$$

$$W_0 = 9.$$

Независимый параметр:

- температура воды на выходе.

Таблица 6 – Анализ связей абсорбера

Номер связи	10	11	19	22	23	Σ
W_0	3	1	3	2	0	9

Х – Насос крепкого раствора

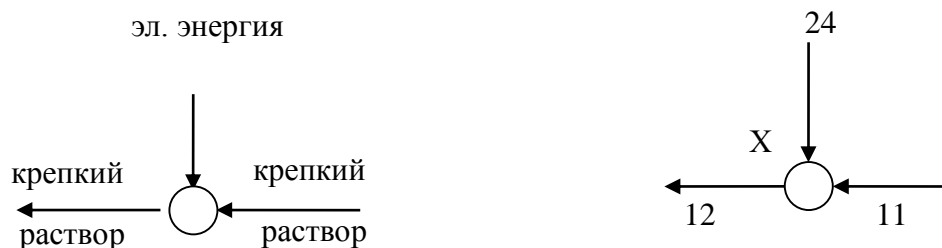


Рисунок 8 – Граф насоса крепкого раствора

$I = 3$ – полное число связей (ребер графа);

$N = 1$ – число однопараметрических связей;

$L = 1$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 1 = 7;$$

$$V_x = (3I - 2N) - W_0 - (2L + 1) = (9 - 2) - 4 - (2 + 1) = 0;$$

$$V_z = V - W_0 - V_x = 7 - 4 - 0 = 3;$$

Таблица 7 – Анализ связей насоса крепкого раствора

Номер связи	2	11	12	Σ
W_0	0	3	1	4

IX – Теплообменник растворов

$I = 4$ – полное число связей (ребер графа);

$N = 0$ – число однопараметрических связей;

$L = 2$ – число трехпараметрических теплоносителей.

$$V_z = 2L + 1 = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$V = 3I - 2N = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 0 = 12;$$

$$V_x = (3I - 2N) - W_0 - (2L + 1) = 12 - 6 - 5 = 1;$$

$$W_0 = 6.$$

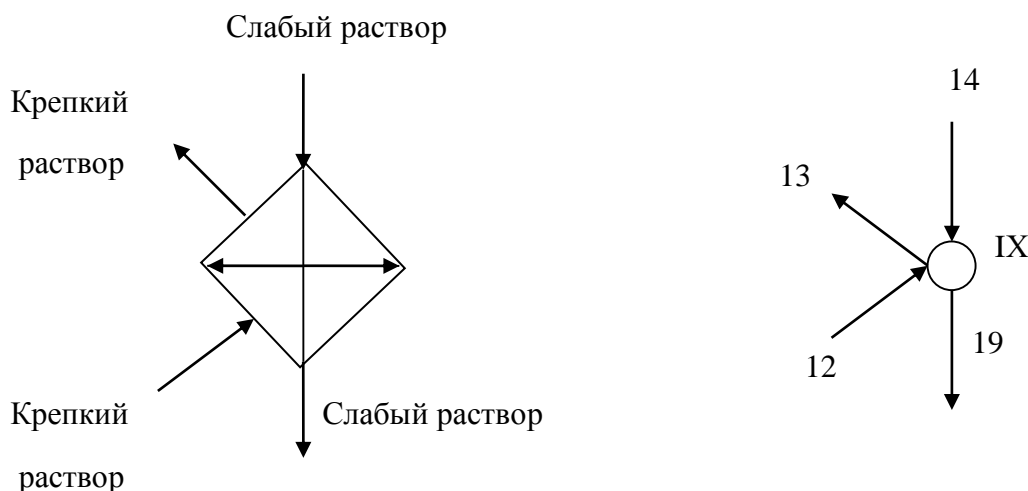


Рисунок 9 – Граф теплообменника растворов

Независимый параметр:

- температура крепкого раствора на выходе.

Таблица 8 – Анализ связей теплообменника растворов

Номер связи	12	13	14	19	Σ
W_0	3	0	2	1	6

Таблица 9 – Количество фиксируемых параметров внешних- связей

Номер связи	1	2	17	18	20	21	22	23	24	Σ
W_{0i}	3	0	3	0	3	0	2	0	0	9

Выводы. Результаты анализа функциональных связей АБХМ приведены в таблице 10. Таким образом, для решения задачи оптимизации система будет включать 14 уравнений по числу независимых параметров.

Таблица 10 – Результаты анализа функциональных связей УАБХМ

Номер элемента	I_k	N_k	L_k	W_{0k}	V_k	V_{zk}	V_{xk}
I	4	0	2	5	12	5	2
II	6	0	2	9	18	5	4
III	5	0	2	6	15	5	4
IV	4	0	2	6	12	5	1
VI	4	0	2	6	12	5	1
VII	5	0	2	9	15	5	1
X	3	1	1	4	7	3	0
IX	4	0	2	6	12	5	1
Σ	35	1	15	51	103	38	14

Список использованной литературы:

1. Конюков В.Л., Богатырева Е.В. Перспективы использования абсорбционных холодильных установок на малых судах рыболовного флота // Рыбное хозяйство Украины. 2005. Вып. 7. С. 39–41.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

2. *Конюков В.Л., Богатырева Е.В.* Особенности математического моделирования судовой утилизационной абсорбционной холодильной машины // Рыбное хозяйство Украины. 2009. № 6 (65). С. 17–20.
3. *Богатырева Е.В., Ивановская А.В.* Математическая формулировка задачи оптимизации судовых энергетических установок // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 4. С. 32–41.
4. *Богатырева Е.В., Ивановская А.В.* Поисковые методы оптимизации параметров судовых энергетических установок // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: сборник трудов по материалам Национальной научно-практической конференции. Керчь, 2020. Т.1. С. 7–11.
5. *Богатырева Е.В.* Влияние эксплуатационных параметров абсорбционной холодильной установки на зону дегазации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 6. С. 867–874.
6. *Богатырева Е.В.* Системный подход при моделировании утилизационных холодильных машин // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 1. 130–131.
7. *Букарос А.Ю., Онищенко О.А., Козьминых Н.А., Василец Д.И., Бухарос В.Н.* Структурная модель судовой холодильной установки // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-4(42). С. 229–235.
8. *Попырин А.С.* Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978. 416 с.
9. *Королюк В.С., Портенко Н.И., Суороход А.В., Турбин А.Ф.* Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 640 с.
10. *Пронникова Т.Ю.* Алгоритмы теории графов // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 36. С. 1536–1542.

References:

1. *Konykov V.L., Bogatyreva E.V.* Perspektivy ispolzovaniia absorbtionnykh kholodilnikh ustanovok na malikh sudakh rybolovnogo flota [Prospects for the use of absorption refrigeration units on small vessels of the fishing fleet]. *Rybnoe khoziaistvo Ukrainy* [Fisheries of Ukraine], 2005, no. 7, pp. 39–41. (In Russian).
2. *Konyukov V.L., Bogatyreva E.V.* Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya sudovoi utilizatsionnoi absorbtionnoi kholodilnoi mashiny [Features of mathematical modeling of ship recycling absorption refrigerating machine]. *Rybnoe khoziaistvo Ukrainy* [Fisheries of Ukraine], 2009, no. 6 (65), pp. 17–20. (In Russian).
3. *Bogatyreva E.V.* *Matematicheskaya formulirovka zadachi optimizacii sudovyh energeticheskikh ustanovok* [Mathematical statement of the problem of marine power plant optimization]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], 2020, no. 4, pp. 32–41. (In Russian).
4. *Bogatyreva E.V., Ivanovskaya A.V.* *Poiskovye metody optimizacii parametrov sudovyh energeticheskikh ustanovok* [Search methods for optimizing the parameters of marine power plants]. *Sbornik trudov po materialam Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kerch' «Obshchestvo, obrazovanie, nauka v sovremennykh paradigmakh razvitiya»* [Proceedings based on the materials of the National Scientific and Practical Conference “Society, education, and science in modern development paradigms”]. Kerch, 2020, vol. 1, pp. 7–11. (In Russian).
5. *Bogatyreva E.V.* *Vliyanie ehkspluatatsionnykh parametrov absorbtionnoj kholodil'noj ustanovki na zonu degazatsii* [Operating parameters of absorption refrigeration unit Influence on the zone of degassing]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the State University of Maritime and Inland Shipping Named After Admiral S.O. Makarov], 2021, vol. 13, no. 6, pp. 5–8. (In Russian).
6. *Bogatyreva E.V.* *Sistemnyy podkhod pri modelirovanii utilizatsionnykh kholodil'nykh mashin*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

[Systems approach to modeling recycling refrigeration machines]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2021, no. 1, pp. 130–131. (In Russian).

7. Bukaros A.YU., Onishchenko O.A., Koz'minyh N.A., Vasilec D.I., Buharos V.N. Strukturnaya model' sudovoj holodil'noj ustanovki [Structural model of a ship's refrigeration plant]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intelligent Technologies], 2018, no. 4-4(42), pp. 229–235. (In Russian).
8. Popyrin A.S. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya teploenergeticheskikh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of thermal power plants]. Moscow, Energy Publ., 1978, 416 p. (In Russian).
9. Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistike* [Handbook of probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Science. Main edition of physical and mathematical literature Publ., 1985, 640 p. (In Russian).
10. Pronnikova T.YU. Algoritmy teorii grafov [Algorithms of graph theory]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie* [Innovation. Science. Education], 2021, no. 36, pp. 1536–1542. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Конюков Вячеслав Леонтьевич	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@mail.ru
Konyukov Vyacheslav Leont'evich	Ph.D (Engin.), Associate Professor of the Department of marine power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@mail.ru
Богатырева Елена Владимировна	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 arev_66@mail.ru
Bogatyreva Elena Vladimirovna	Ph.D (Engin.), Associate Professor of the Department of marine power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 arev_66@mail.ru

Халявкин А.А., Ивановская А.В., Ениватов В.В.

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗИНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

Аннотация. В работе рассматриваются дейдвудные подшипники гребных валов, которые в зависимости от используемого антифрикционного материала делятся на два вида: металлические и неметаллические. Указывается, что гребной вал является частью судового валопровода. Отмечается, что в качестве антифрикционного материала для дейдвудных подшипников находит широкое применение резина. Приведены физико-механические показатели используемой резины. Представлен общий вид дейдвудного подшипника. Указана нормативно-техническая документация дейдвудных подшипников с антифрикционным материалом из резины. Использование новых композитных материалов, внедрение конструктивных особенностей и инновационных методов обработки, в рамках требований нормативной и регламентирующей документацией, позволяет создавать дейдвудные подшипники с антифрикционным материалом из резины с улучшенными характеристиками, такими как повышенная коррозионная стойкость и улучшенные смазочные свойства, что способствует увеличению срока службы самих подшипников и снижению частоты их замены, что является значительным преимуществом для судовладельцев.

Ключевые слова: судовой валопровод, гребной вал, дейдвудный подшипник, резина, опора.

Khalyavkin A.A., Ivanovskaya A.V., Enivatov V.V.

THE PROSPECTS OF USING RUBBER-METAL BEARINGS

Abstract. The paper considers deadwood propeller shaft bearings, which, depending on the antifriction material used, are divided into two types: metallic and non-metallic. It is indicated that the propeller shaft is part of the ship's shaft line. It is noted that rubber is widely used as an antifriction material for deadwood bearings. The physical and mechanical parameters of the rubber used are given. A general view of the deadwood bearing is presented. The normative and technical documentation of deadwood bearings with antifriction material made of rubber is indicated. The use of new composite materials, the introduction of design features and innovative processing methods, within the framework of the requirements of regulatory and regulatory documentation, allows the creation of deadwood bearings with antifriction material made of rubber with improved characteristics such as increased corrosion resistance and improved lubricating properties, which helps to increase the service life of the bearings themselves and reduce the frequency of their replacement, which is significant an advantage for shipowners.

Keywords: marine shaft line, propeller shaft, deadwood bearing, rubber, support.

Введение. Дейдвудные подшипники играют ключевую роль в обеспечении надежной работы гребных валов судового валопровода [1]. Эти вспомогательные устройства судового валопровода представляют собой протяженные и упругие опоры, которые прочно располагаются в самой дейдвудной трубе 2 судна (рис. 1). В дейдвудной трубе может быть расположено несколько дейдвудных подшипников [1]. Так гребной вал 3, который представлен на рисунке 1, расположен в кормовом 11 и носовом 10 дейдвудных подшипниках.

Все детали крепления дейдвудного подшипника должны быть надежно застопорены. Основная функция дейдвудных подшипников заключается в поддержании рабочего состояние всех валов (гребных, промежуточных, упорных), обеспечивая их стабильное вращение и минимизируя трение между самим гребным валов и самим дейдвудным подшипником.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

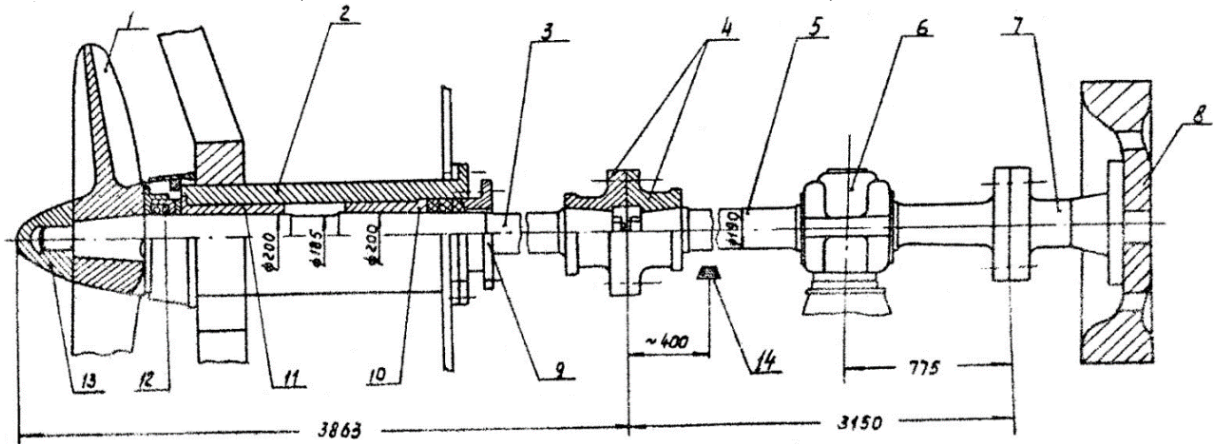


Рисунок 1 – Валопровод СРТ-Р 90-й серии

1 – гребной винт; 2 – дейдвудная труба; 3 – гребной вал; 4 – полумуфты; 5 – промежуточный вал; 6 – опорный подшипник; 7 – проставочный вал (коротыш); 8 – маховик двигателя; 9 – сальник дейдвуда; 10 – носовая дейдвудная втулка; 11 – кормовая дейдвудная втулка; 12 – сальник; 13 – гайка-обтекатель; 14 – монтажный подшипник.

Цель исследований проанализировать перспективность использования резино-металлических подшипников.

Материалы и методы исследования. Дейдвудные подшипники изготовлены металлической втулкой и антифрикционным материалом, обладающим высокой прочностью и износостойкостью, что позволяет им выдерживать значительные нагрузки. В зависимости от используемого антифрикционного материала они делятся на два вида: металлические и неметаллические. Металлические представляют собой подшипники с антифрикционным материалом из баббита и чугуна, неметаллические – с антифрикционным материалом из капрона, капролона, полиуретана, резины и пр. [2-11].

Резина в качестве антифрикционных материалов для дейдвудных подшипников стала применяться в качестве заменителя бакаута в двадцатых годах прошлого столетия фирмой «Goodrich Rubber Co» (США), которая разработала конструкцию резинового подшипника «Cutless» (бесшовный) двух основных типов [12]: со спиральной канавкой и продольными канавками.

Бакаут представляет собой название тропических твёрдых пород дерева с хорошими смазывающими свойствами и включает в себя несколько видов, среди которых Гваякумоффициале и Гваякумсанктум. Лучшим по механическим свойствам считается Гваякумсанктум. Бакаут обладает достаточной прочностью и жёсткостью [1, 9].

На рисунке 2 представлены конструкции зарубежных дейдвудных подшипников с антифрикционным материалом из резины, разработанные в начале прошлого столетия [12].

Составной дейдвудный подшипник (патент № 493304 (Германия)), представляет собой металлический корпус (рис. 2 а), внутри которого в пазы в виде «ласточкин хвост» устанавливаются вкладыши, облицованные резиной. Конструкция этого подшипника предусматривает возможную замену изношенных отдельных частей подшипника.

Автор патента № 1919375 (США) предложил конструкцию разъёмного резинового дейдвудного подшипника, состоящего из двух металлических полувтулок, внутри облицованных резиной (рис. 2 б). Как отмечается в самой работе благодаря разъёму подшипника, монтаж последнего значительно облегчается по сравнению с глухим подшипником.

Другим предлагаемым вариантом составного подшипника является патент № 431152 (Англия). Сам подшипник (рис. 2 в) состоит из бронзовой втулки, восьми резиновых сухарей и специальных скоб, посредством которых облицованные резиной сухари крепятся к бронзовой втулке.

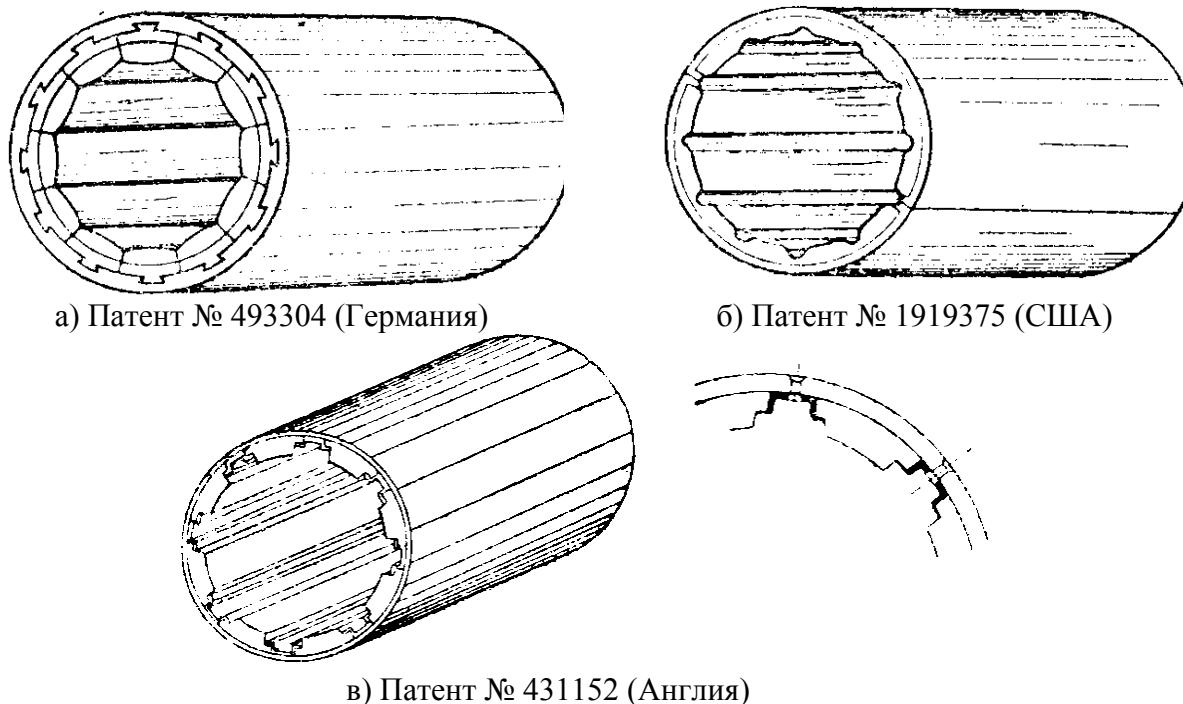


Рисунок 2 – Общий вид зарубежных резино-металлических подшипников

Отечественные дейдвудные подшипники с антифрикционным материалом из резины изготавливаются двух видов: цельно-прессованные на основании ГОСТ 7199-77 [2]; набор из резино-металлических планок для гребных валов диаметром более 250 мм на основании ОСТ 5.5154-74 [5]. Сама резина применяется в виде резинометаллических подшипников, планок, армированных металлической арматурой. Общий вид и расположение дейдвудного подшипника, выполненного в соответствии ОСТ 5.5154-74 представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Общий вид расположения дейдвудного подшипника

Резина резинометаллических планок для набора высоконагруженных дейдвудных подшипников должна иметь твердость 80-90 усл. ед [6]. Используемая арматура для резинометаллических планок должна храниться в таре в условиях, исключающих коррозию,

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

воздействие влаги, паров, кислот, щелочей и попадание смазочных материалов. В подшипниках планки могут быть набраны в один или несколько рядов. По длине планки должны быть одного размера для каждого ряда; ширина должна быть одинаковой для всех планок, устанавливаемых во втулку. Рабочие поверхности резинометаллических планок, а также окончательно изготовленных планок из других материалов, должны быть в подшипнике прямолинейными вдоль оси дейдвудной втулки. Контрольная линейка должна прилегать к поверхности подшипника по всей длине, в том числе к поверхности многорядного подшипника. Допускаются зазоры между линейкой и резинометаллическими планками подшипника в местах стыков рядов планок, а также установки болтов, если они предусмотрены конструкцией подшипника, не более 0,4 мм [6,7]. Расчетная удельная нагрузка, действующая на дейдвудные подшипники с резинометаллическими планками и на резинометаллические подшипники цельные, не должна превышать 0,25 МПа

Основным элементом для изготовления резино-металлических подшипников является синтетический каучук, получаемый путём химического синтеза. Физико-механические свойства резины колеблются в широких пределах в зависимости от свойств, количества составных частей смеси и режима вулканизации [7].

В соответствии с ГОСТ 7199-77 [2] в таблице 1 представлены физико-механические показатели резины, используемой при изготовлении резино-металлических подшипников.

Таблица 1 – Физико-механические показатели резины

Наименование показателя	Норма
1. Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	16,5
2. Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	300
3. Твердость в международных единицах или единицах Шора А	60-75
4. Сопротивление истиранию, Дж/мм ³ , не менее	11,5
5. Сопротивление раздиру, Н/мм, не менее	45
6. Прочность связи резины с металлом при отрыве, МПа, не менее	2,9

Дейдвудные подшипники с антифрикционным материалом из резины обладают значительной износостойкостью, особенно при наличии механических примесей в забортной воде, более низким коэффициентом трения, упрощенной конструкцией защиты вала от попадания морской или речной воды, способностью обходиться без смазки, так как омывается забортной водой [1,7,12].

Способность работать удовлетворительно в присутствии механических примесей в загрязненной воде объясняется тем, что частицы песка легко вдавливаются в резиновый слой и через промывочные канавки, уносятся по ней потоком воды (рис. 1). Дейдвудные подшипники с антифрикционным материалом из резины смазываются и охлаждаются забортной водой [1,6].

К основным достоинствам резины можно отнести: относительно малое объемное водопоглощение, что сказывается на сохранении своих геометрических размеров при эксплуатации; хорошая работа при действии абразивной среды. Благодаря именно своим эластичным свойствам, резина оставляет незначительные следы на облицовке гребного вала при попадании абразива (мелких частиц) в дейдвудный подшипник.

В таблице 2 представлены значения износа дейдвудного подшипника в зависимости от неметаллического антифрикционного материала [6].

Таблица 2 – Значение износов дейдвудных подшипников из неметаллических материалов, мм.

Наименование показателя	Материал подшипника		
	капролон	резина	бакаут
Износ на 1000 ходовых часов	0,05-0,08	0,07-0,10	0,10-0,12

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Выводы. Исходя из вышесказанного, дейдвудные подшипники, где рабочая трущаяся поверхность изготовлена из резины, нашли свое широкое применение для речных судов. Поэтому, использование новых композитных материалов, внедрение конструктивных особенностей и инновационных методов обработки, в рамках требований нормативной и регламентирующей документацией (в области эксплуатации и ремонта энергетической установки судна), позволяет создавать дейдвудные подшипники с антифрикционным материалом из резины с улучшенными характеристиками, такими как повышенная коррозионная стойкость и улучшенные смазочные свойства. Это, в свою очередь, способствует увеличению срока службы самих подшипников и снижению частоты их замены, что является значительным преимуществом для судовладельцев.

Список использованной литературы:

1. *Виноградов С.С., Гавриш П.П.* Износ и надёжность винто-рулевого комплекса судов. М.: Транспорт, 1970. 232 с.
2. ГОСТ 7199-77. Подшипники резино-металлические судовые. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1977. 15 с.
3. *Михайлова М.А.* Анализ изнашивания дейдвудных подшипников в зависимости физико-механических характеристик материала вкладышей и условий эксплуатации судна // Вестник АГТУ. 2005. № 2 (25). С. 135–140.
4. *Нугличек Ф.* Подшипники скольжения из пластмасс. М.: Машгиз, 1960. 72 с.
5. ОСТ 5.5154-74. Подшипники скольжения и сальники гребных валов. Типы, основные размеры и технические требования. М.: Издательство стандартов, 1974. 43 с.
6. РТМ 31.5004-75. Подшипники скольжения гребных валов из неметаллических материалов. Техничко-эксплуатационные требования к материалам, изготовлению и эксплуатации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200001411> (дата обращения: 23.02.2025).
7. *Рубин М.Б., Бахарева В.Е.* Подшипники в судовой технике: справочник. Л.: Судостроение, 1987. 344 с.
8. *Румб В.К.* Основы проектирования и расчета судового валопровода: учебное пособие. СПб.: Издательский центр СПбГМТУ, 1996. 106 с.
9. *Репешев И.В., Тяглый Г.В., Яковлев Ю.К.* Руководство по эксплуатации металлических корпусов, устройств и систем надводных кораблей ВМФ (РЭКУС-НК-2009). М.: Министерство обороны РФ, Военно-морской флот, 2009. 185 с.
10. *Халявкин А.А., Лошадкин Д.В., Старкова Н.П., Безруков Н.П., Яковлев Ю.Ю.* Разработка дейдвудного подшипника с эллиптическими вкладышами // Морской вестник. 2024. № 1. (89). С. 38–40.
11. *Халявкин А.А., Санжапов А.Р., Матвеев Ю.И., Ениватов В.В., Ивановская А.В.* Повышение надежности дейдвудных подшипников путем лазерной наплавки гребного вала. // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. 2024. № 3. С. 42–48.
12. *Халявкин А.А., Матвеев Ю.И., Али Саламех, Саусан Слиман.* Повышение надежности механизмов судовой энергетической установки // Судостроение. 2024. № 5. С. 62–65.

Refrences:

1. Vinogradov S.S., Gavrish P.P. *Iznos i nadezhnost vinto-rulevogo kompleksa sudov* [Wear and reliability of the screw steering system of vessels]. Moscow, Transport, 1970, 232 p. (In Russian).
2. *GOST 7199-77. Podshipniki rezino-metallicheskie sudovye. Tekhnicheskie usloviya.* [State Standards 7199-77. Rubber-metal ship bearings. Technical specifications]. Moscow, Standards Publ., 1977, 15 p. (In Russian).
3. Mihajlova M.A. Analiz iznashivaniya dejdvudnykh podshipnikov v zavisimosti fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik materiala vkladyshej i uslovij ehkspluatatsii sudna [Wear

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

- analysis of deadwood bearings depending on the physical and mechanical characteristics of the liner material and the operating conditions of the vessel]. *Vestnik AGTU*. [AGTU Bulletin], 2005, no. 2 (25), pp. 135–140. (In Russian).
4. Nuglichek F. *Podshipniki skol'zheniya iz plastmass*. [Sliding bearings made of plastics]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960, 72 p. (In Russian).
 5. *OST 5.5154-74. Podshipniki skol'zheniya i sal'niki grebnykh valov. Tipy, osnovnye razmery i tekhnicheskie trebovaniya* [Industry standard 5.5154-74. Sliding bearings and propeller shaft seals. Types, basic dimensions and technical requirements], Moscow, Standards Publ., 1974, 43 p. (In Russian).
 6. *RTM 31.5004-75. Podshipniki skol'zheniya grebnykh valov iz nemetallicheskih materialov. Tekhniko-ehkspluatatsionnye trebovaniya k materialam, izgotovleniyu i ehkspluatatsii*. [Technical guidance material 31.5004-75. The sliding bearings of the propeller shafts are made of non-metallic materials. Technical and operational requirements for materials, manufacture and operation]. (In Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200001411> (accessed 23.02.2025).
 7. Rubin M.B., Bahareva V.E. *Podshipniki v sudovoy tekhnike: Spravochnik* [Bearings in marine equipment]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1987, 344 p. (In Russian).
 8. Rumb V.K. *Osnovy proektirovaniya i rascheta sudovogo valoprovoda* [Fundamentals of design and calculation of a ship's shaft pipeline]. St. Petersburg, SPbGMTU Publ., 1996, 106 p. (In Russian).
 9. *Repeshev I.V., Tyaglyj G.V., Yakovlev YU.K. Rukovodstvo po ehkspluatatsii metallicheskih korpusov, ustrojstv i sistem nadvodnykh korablej VMF* [Manual for the operation of metal hulls, devices and systems of surface ships of the Navy]. Moscow, Ministry of Defense of the Russian Federation, Navy Publ., 2009, 185 p. (In Russian).
 10. Halyavkin A.A., Loshadkin D.V., Starkova N.P., Bezrukov N.P., Yakovlev YU.YU. *Razrabotka dejdvudnogo podshipnika s ehllipticheskimi vkladyshami* [Development of a deadwood bearing with elliptical inserts]. *Morskoj vestnik* [Marine Bulletin], 2024, no. 1 (89), pp. 38–40. (In Russian).
 11. Halyavkin A.A., Sanzhapov A.R., Matveev YU.I., Enivatov V.V., Ivanovskaya A.V. *Povyshenie nadezhnosti dejdvudnykh podshipnikov putem lazernoj naplavki grebnogo vala*. [Improving the reliability of deadwood bearings by laser surfacing of the propeller shaft]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Morskie tekhnologii* [Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University. Series: Marine Technologies], 2024, no. 3, pp. 42–48. (In Russian).
 12. Halyavkin A.A., Matveev YU.I., Ali Salamekh, Sausan Sliman. *Povyshenie nadezhnosti mekhanizmov sudovoy ehnergeticheskoy ustanovki* [Improving the reliability of marine power plant mechanisms]. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2024, no. 5, pp. 62–65. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Халявкин Алексей Александрович	канд. техн. наук, доцент кафедры «Судомеханические дисциплины» Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ» 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, 6 sopromat112@mail.ru
Khalyavkin Alexey Alexandrovich	Ph.D (Engin.), Associate Professor of the Department «Ship-mechanical disciplines» Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Admiral F.M. Apraksina – the affiliation of Volga State University of Water Transport

**Ивановская
Александра
Витальевна**

канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок

Керченский государственный морской технологический университет

298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

invkerh@yandex.ru

Ivanovskaya
Aleksandra
Vitalievna

Ph.D (Engin.), Associate Professor at the Department of marine power plants

Kerch State Maritime Technological University

28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

invkerh@yandex.ru

**Ениватов
Валерий
Владимирович**

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой судовых энергетических установок

Керченский государственный морской технологический университет

298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

valeriy.enivatov@gmail.com

Enivatov
Valerii
Vladimirovich

Ph.D (Engin.), Head of the Department of the Department of marine power plants

Kerch State Maritime Technological University

28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

valeriy.enivatov@gmail.com

УДК [629.5.01+627(26)](292.2)

Иванова О.А., Михайлова Т.В., Никонова Е.А., Родькина А.В.
СУДА С ИНВЕРСНЫМ НОСОМ ДЛЯ АРКТИКИ

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования морских сооружений для освоения арктического шельфа и развития Северного морского пути. На основе анализа государственных стратегических документов определены ключевые типы морских сооружений, необходимых для добычи углеводородов и развития портовой инфраструктуры в Арктике. Проведён детальный анализ батиметрии акваторий Северного морского пути для определения оптимальных габаритных характеристик судов с учётом ограничений по осадке. Особое внимание уделено исследованию архитектурно-конструктивных особенностей как реализованных, так и концептуальных проектов судов типа X-BOW, предназначенных для эксплуатации в арктических условиях. Выявлены ключевые преимущества и недостатки данной технологии. Проведена сравнительная оценка конструктивных особенностей форштевней и оптимизированных соотношений главных размерений судов. Результаты исследования вносят существенный вклад в развитие теории и практики проектирования морских судов для эксплуатации в сложных арктических условиях.
Ключевые слова: архитектурно-конструктивные особенности, круглогодичное обслуживание Северного морского пути, форштевень, суда типа X-BOW, инверсный (обратный) нос, главные размерения.

Ivanova O.A., Mikhailova T.V., Nikonova E.A., Rodkina A.V.
INVERTED BOW VESSELS FOR THE ARCTIC

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of offshore structures for the development of the Arctic shelf and the Northern Sea Route. The key types of offshore structures required for hydrocarbon production and the development of port infrastructure in the Arctic are identified based on the analysis of state strategic documents. A detailed analysis of the Northern Sea Route waters bathymetry is carried out to determine the optimal overall dimensions of vessels, taking into account draft restrictions. Particular attention is paid to the study of the architectural and design features of both implemented and conceptual projects of X-BOW vessels intended for operation in Arctic conditions. The key advantages and disadvantages of this technology are identified. A comparative assessment of the stems design features and optimized ratios of the vessels main dimensions is carried out. The results of the study make a significant contribution to the theory and practice development of designing sea vessels for operation in difficult Arctic conditions.

Keywords: architectural and structural features, year-round maintenance of the NSR, stem, X-BOW type vessels, inverse (reverse) bow, dimensions.

Введение. Перспективы развития Арктической зоны. На основе проанализированных материалов государственных стратегий^{1, 2, 3}, определены типы морских сооружений, необходимые для освоения шельфа арктических морей по добыче нефти и газа, по созданию проектов инфраструктуры новых и модернизации существующих арктических портов. Выполнен анализ по глубинам акваторий на протяжении Северного морского пути (СМП) с целью определения максимально возможных габаритных размеров по осадке судов,

¹ Указ Президента РФ № 645 от 26.10.2020 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» (В редакции указов Президента Российской Федерации от 12.11.2021 № 651, от 27.02.2023 № 126).

² Распоряжение Правительства РФ № 2553-р от 28.10.2019 «Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 г.».

³ Указ Президента Российской Федерации № 512 от 31.07.2022 «Морская доктрина Российской Федерации».

который показал, что глубины по пути следования не превышают 10 м, таким образом суда, предназначенные для эксплуатации в данных районах, должны иметь осадку в диапазоне 5–9 м.

В настоящее время актуальным направлением развития арктической зоны является обеспечение круглогодичной транспортировки сжиженного природного газа, по маршрутам СМП в восточном и западном направлениях. Для этого необходимо создание флота судов для самостоятельного плавания в средних по тяжести ледовых условиях. То есть судов ледового класса с ледокольными обводами носовой оконечности. Еще одним направлением развития арктической зоны является создание транспортных судов для перевозки тяжелых и сверхтяжелых грузов – плавучих энергоблоков. Но назначение данного типа судов, позволяет им иметь более умеренные-ледокольные обводы носовой оконечности и более низкий ледовый класс, чем у газозовов, одним из факторов, влияющих на снижение ледового класса, является отсутствие необходимости движения во льдах при высоких скоростях. Таким образом, перед проектантами стоит задача улучшения ледовых качеств судов для круглогодичной эксплуатации в ледовых условиях.

Вопросы проектирования судов, способных обеспечить бесперебойный вывоз и транспортировку углеводородов из Арктики, рассмотрены авторами Крыловского государственного научного центра Сазонова К.Е., Добродеева А.А. Работы посвящены созданию судов активного ледового плавания, и разработке инновационных способов проводки крупнотоннажных судов во льдах. Предложено решение вопросов по оптимизации форм корпусов многокорпусного ледокола с целью получения наименьших значений ледового сопротивления [1]. Определением оптимальной формы носовой оконечности морского ледокола на основе расчетных методов и модельных испытаний занимались Ионов Б.П., Грамузов Е.М, Зуев В.А. Определено влияние изменения формы корпуса на коэффициенты полноты и другие проектные характеристики на основании предложенной математической модели, в которой все основные проектные характеристики, включая форму корпуса, взаимно увязаны с помощью системы аналитических уравнений проектирования, включающих уравнение масс, плавучести, ходкости и остойчивости [2]. Вопросы физического моделирования деформации ледяного покрова ледяной нагрузкой, движущейся с малой скоростью освещены в работе авторов [3], а именно авторами исследовались изменения формы волны и максимального прогиба льда в зависимости от изменения скорости движения и величины нагрузки, что влияет на деформирование ледяного покрова и является критически важным фактором при проектировании ледокольных средств.

Первые суда снабжения появились в 1954 году для удовлетворения потребностей быстро растущей оффшорной нефтяной индустрии. Среди первых судов снабжения были военные баржи, которые подходили для буровых платформ, расположенных вблизи берега. Первые суда снабжения были спроектированы по тому же принципу, т.е. надстройка располагалась в корме. В связи с быстрым мировым развитием нефтяной промышленности, судов снабжения становилось все больше, они становились более универсальными, также улучшались их мореходные качества. Штормовая мореходность судна – одна из сложнейших и противоречивых задач. В наиболее тяжелых условиях эксплуатации находятся суда шельфового (оффшорного) флота, обслуживающие плавучие нефте- и газодобывающие платформы. Именно в шельфовой зоне, на небольшой глубине, штормовые волны из-за взаимодействия с дном становятся непредсказуемыми и могут достигать 10 и более метров. Волна может накрыть судно вместе с ходовым мостиком и повредить стекла рубки

В Приложении 3 Стратегии², изложены три сценария проектов планов строительства гражданских судов и морской техники от 2021 до 2035 года – инновационный, целевой и консервативный, в каждом из которых на протяжении всего данного периода требуются построить от 19 до 65 судов снабжения и обеспечения. На основании этого, а также с учетом требований других государственных документов и планов частных инвесторов по созданию морской техники для освоения Арктической зоны [4, 5], авторами работы в качестве объектов

исследования были приняты суда снабженцы типа X-BOW, как перспективные морские сооружения для зоны Арктики.

Целью исследования является обоснование выбора формы архитектурно-конструктивного типа судна для эксплуатации в морях арктического бассейна.

Материалы и методы исследования. Выбор и обоснование архитектурно-конструктивного типа. Арктический регион отличается экстремальными климатическими условиями и крайне ограниченным периодом навигации, при котором значительная часть акваторий остается покрыта льдом. В связи с этим развитие арктической зоны требует создания эффективной системы транспортного сообщения между отдаленными районами, обеспечивающей бесперебойную и быструю доставку грузов в любых погодных условиях.

Круглогодичное судоходство становится ключевым фактором освоения региона, что выдвигает особые требования к проектированию флота. Создание судов, способных выполнять поставленные задачи в арктических условиях на протяжении всего года, становится одной из приоритетных задач развития судостроительной отрасли России.

Для выбора архитектурно-конструктивного типа (АКТ) судна и работы в арктических условиях был выполнен анализ природно-климатических условий, позволяющий определить наличие ледовых образований, их видов и влияние на проходимость судами СМП в различные периоды года. Определено, что в Карском море и море Лаптевых отсутствие ледовых образований не превышает 2–3 месяцев в году. Восточно-Сибирское море обладает значительной ледовитостью чему способствует наличие мелководья. В Чукотском море наличие льда наблюдается даже в июле и августе [6–8].

Исследование ледовых условий в арктических морях (табл. 1) выявляет существенную неоднородность как между различными морями, так и между отдельными районами одного и того же моря. Кроме того, наблюдается значительная вариативность ледовой обстановки в разные годы, что необходимо учитывать при планировании судоходства в регионе [9].

Таблица 1 – Распределение наличия ледовых образований и периодов «чистой» воды в Арктических морях

Море	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Карское	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Лаптевых	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Восточно-Сибирское	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Чукотское	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Примечание:	- поверхность моря покрыта льдом;											
	- поверхность моря не покрыта льдом (чистая вода);											
	- поверхность моря может быть покрыта или не покрыта льдом, это зависит от того, насколько сурова зима.											

Суда поколения «X-BOW» имеют лучшие показатели для работы в суровых климатических условиях и в неблагоприятную погоду. Они способны на высокой скорости двигаться в штормовых условиях по двум причинам. Во-первых, основная масса носовой части морского судна расположена ниже, чем обычно, поэтому такое судно лучше

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И
ГИДРОГРАФИЯ

противостоит встречной волне. У новых судов поколения «X-BOW» выход из волн постепенный и плавный, а не быстрый и рывком как у типичных кораблей. Благодаря этому ход судов поколения «X-BOW» более ровный. Во-вторых, носовая часть новых судов не выдается высоко вперед. На носу, в отличие от обычных судов, нет изгиба наружу, благодаря этому они не тратят много энергии на борьбу с волнами, что позволяет сохранять им высокую скорость.

Новые суда поколения «X-BOW» компании «Ulstein» имеют ряд преимуществ:

- снижение расходов топлива, за счет равномерного распределения водного потока;
- уменьшение общего объема времени доставки грузов, благодаря сохранению скорости;
- функционирование независимо от погодных условий;
- гарантия сохранности и безопасности груза, благодаря устойчивости корпуса.

Кроме, того применение дизель-электрических силовых установок способствует улучшению экологии.

Головным судном данного типа является «Bourbon Orca» (рис. 1) проекта AX104, предназначенный для приема и постановки якорей шельфовых морских установок. В настоящее время судно эксплуатируется в Северном море, построен в 2006 г. [10].



Рисунок 1 – Bourbon Orca

Носовая оконечность судна снабжения ледового класса должна быть спроектирована таким образом, чтобы выдерживать постоянные нагрузки от взламывания льда, а кормовая оконечность рассчитывается на движение судна в насыщенной колотой ледяной крошке. Данное судно должно быть рассчитано на осуществление ледокольных операций при движении носом и кормой. Данного типа суда, принадлежащие к классу Icebreaker способны выполнять ледокольные работы в арктических морях при толщине льда до 2,0 м в зимне-весеннюю навигацию и до 2,5 м – в летне-осеннюю.

В данной работе проектируется судно-снабжения, корпус которого имеет обводы Ulstein X-Vow. Подобная форма корпуса не способствует всхожести на волну – судно проходит сквозь нее. Это уменьшает килевую качку и практически исключает слеминг – удары волн в днищевую часть судна. Высокий надводный борт в носовой части и большие непроницаемые обводы в носу способствуют незаливаемости палубы и ходовой рубки. Кроме того, все палубное оборудование надежно укрыто от погодных условий (ветра, волн, обледенения и т.п.) и позволяет палубной команде работать в комфортных условиях.

В России были спроектированы четыре судна снабжения IBSV10022. Проект Damen Shipyard Group, рабочую конструкторскую документацию разработало ЦКБ «Лазурит», техническое наблюдение – Damen SG. На судне установлены две колонки высокого ледового класса мощностью по 7,5 МВт. Вес каждой – 130 тонн, высота – 6 м, длина – 10 м. Что позволяют судну преодолевать арктические льды толщиной более 1,5 м.

Головным проектом российских судов типа X-BOW в серии из четырех судов («Катерина Великая», «Владимир Мономах», «Александр Невский» и «Святая Мария»), предназначенных для «Роснефтефлота» стало судно «Катерина Великая» [11], спущенное со стапеля на приморской судовой верфи «Звезда» в декабре 2020 г. «Катерина Великая» является первым многофункциональным судном снабжения неограниченного района плавания, способным работать в условиях сурового климата Арктики. Наличие усиленного ледового класса Icebreaker 7 обеспечивает возможность функционирования при толщине льда до 2,0 м в зимне-весеннюю навигацию и до 2,5 м – в летне-осеннюю.

Анализ реализованных проектов судов с инверсным носом норвежской компании ULSTEIN и российских компаний показал, что их осадка не превышает 10 метров, что является важным фактором для судов при прохождении трассы СМП.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ формы форштевней и соотношений главных размерений. В таблице 2 приведены конструктивные обводы форштевней реализованных проектов судов, место их эксплуатации и ледовый класс.

На основании данных приведенных в таблице 2 выявлены характерные отличия в проектировании конструктивных особенностей форштевней судов с инверсным носом, затем выполнена оценка соотношений главных размерений для определения возможности применения данных судов по осадке при прохождении СМП. Для судов «Катерина Великая» и «Витус Беринг» оснащены специальным ледокольным форштевнем, имеющим характерный обратный наклон в надводной части, который начинается выше конструктивной ватерлинии и достигает угла приблизительно 30°. Такая конструкция форштевня является типичной для ледоколов и судов ледового класса. Она специально разработана для эффективного преодоления ледяных преград: при движении судно может напоздаться на ледяное поле и разрушать его под действием собственной массы. Примечательно, что суда типа «Катерина Великая» отличаются более прямыми, ложкообразными оконечностями, что является характерной особенностью конструкции ледокольного флота и способствует улучшению ледопроеходимости.


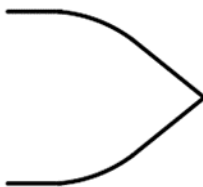
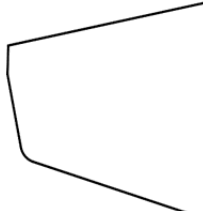
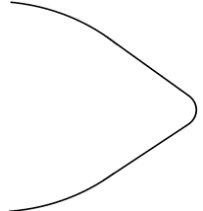
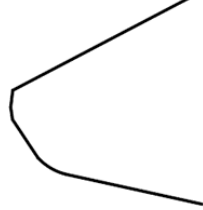
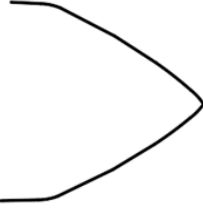
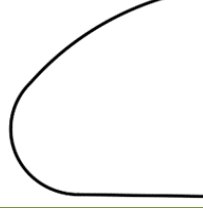
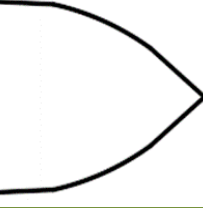
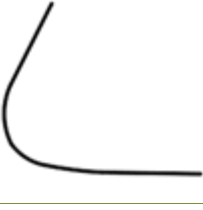
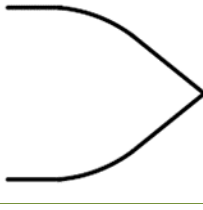
Носовая оконечность судна «Капитан Соколов» выполнена по инновационной архитектуре Enduro Bow. Несмотря на то, что данная форма носовой части обеспечивает более низкий ледовый класс по сравнению с традиционными подрезанными носами, она обладает рядом существенных преимуществ.

В частности, такая конструкция способствует значительному снижению обледенения корпуса, что повышает безопасность эксплуатации в холодных водах. Кроме того, оптимизированная форма носовой оконечности позволяет существенно увеличить внутреннее пространство судна, что расширяет возможности его использования. Дополнительным преимуществом является уменьшение силы удара встречных волн, что улучшает комфорт плавания и снижает нагрузки на конструкцию судна.

Суда норвежских компаний отличаются уникальной конструкцией носовой части – инверсным носом, который обеспечивает ряд существенных преимуществ. Данная инновационная форма позволяет эффективно минимизировать чрезмерную качку и предотвратить неравномерное распределение нагрузки на корпус судна. Особенность инверсного носа заключается в его способности рассеивать водную поверхность изнутри, что позволяет сохранять оптимальную скорость, устойчивость и экономичность благодаря равномерной нагрузке на корпус. Эта конструкция имеет определенное сходство с традиционным бульбом, однако обладает более совершенными гидродинамическими характеристиками. Характерной чертой форштевней норвежских судов является более резкий

подъем носовой оконечности с более острой формой носа по сравнению с российскими аналогами. Такая конструкция способствует улучшению мореходных качеств и повышению эффективности эксплуатации судна в различных условиях плавания.

Таблица 2 – Обводы форштевня построенных судов с инверсным носом

Наименование судна	Район эксплуатации	Ледовый класс	Форштевень	
			вид сбоку	вид сверху
Иностранные суда (Норвегия)				
Bourbon Orca	Северном море	Arc 4		
Viking Poseidon	Мексиканский залив	–		
Island Constructor	Северном море	–		
Российские суда				
Катерина Великая	СМП	Icebreaker 7		
Витус Беринг	Охотском море	Arc5		
Капитан Соколов	СМП	Ice2		
Вячеслав Тихонов	Континентальный шельф	Arc4		

Соотношение L/V влияет на ходкость судна, его маневренность и остойчивость. Большие значения отрицательно сказываются на остойчивости, продольной прочности. Малые значения обеспечивают хорошую маневренность и остойчивость [12].

Суда компании Ulstein входят в диапазон соотношения L/V в среднем до значения 5, также, как и суда российских компаний. Данное значение говорит о том, что эти суда более маневренны и остойчивы в условиях плавания в открытом море, нежели более крупногабаритные суда того же назначения.

Соотношение B/T определяет начальную остойчивость, вместимость и влияет на ходкость судна, чем меньше B/T , тем меньше волновое сопротивление. Стоит отметить что суда норвежского производства имеют большее значение соотношения B/T , нежели суда

российского производства, что позволяет вмещать больше груза, а также такое соотношение положительно влияет на ходкость. Однако суда российской компании имеют меньшее волновое сопротивление [12].

Соотношение Н/Т характеризует запас плавучести судна и влияет на вместимость, непотопляемость, остойчивость как начальную, так и на больших углах крена. На начальной стадии проектирования отношение Н/Т может быть получено по формулам Бронникова А. В., как для универсальных сухогрузов или по формулам Железкова Ж.К. через статистическую зависимость для комбинированных судов, т.к. для судов типа X-BOW в классической теории проектирования нет выведенной зависимости. Однако по результатам численного моделирования и на основании экспериментальных исследований это соотношение будет уточняться при уже полученных значениях длины, ширины и осадки судна.

Выводы. Выполненный анализ соотношений главных размерений и архитектурно-конструктивных решений по корпусу для судов типа X-BOW показали возможность их эксплуатации в морях арктического бассейна. Полученные в работе проектные решения обосновываются с учетом круглогодичной эксплуатации проектируемых судов в тяжелых природно-климатических условиях и направлены на выявление тенденций инновационных подходов при проектировании.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление преимуществ или недостатков конструктивных решений при проектировании судов типа X-BOW с целью оптимизации формы, например, определение оптимального угла наклона форштевня для снижения ледовых нагрузок с учетом влияния принятых решений на изменение мореходных качеств судна.

Список использованной литературы:

1. *Dobrodeev A., Sazonov K.* The Estimation of Carbonic Gas Emission by Ice-Class Large-Size Ships Moving in Ice Using Different Escorting Methods // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2016. Vol. 8. V008T07A001. ASME. DOI: 10.1115/OMAEE2016-54099.
2. *Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А.* Проектирование ледоколов. СПб: Судостроение, 2013. 512 с.
3. *Зуев В.А., Грамузов Е.М., Куркин А.А., Двойченко Ю.А., Себин А.С.* Физическое моделирование деформации ледяного покрова нагрузкой, движущейся с малой скоростью // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. СПб: Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2022. Т. 15 (2). С. 19–32. DOI: 10.59887/fpg/mkmg-68r8-4h6v.
4. Технический отчет «Разработка технических требований в части природных воздействий к перспективным объектам морской техники (платформы/суда) для разведки, бурения и добычи углеводородов в глубоководной части арктического шельфа, включая требования безопасности для сооружений в эксплуатации и при выполнении морских технологических и эксплуатационных операций». СПб: ААНИИ, 2012. № 2. 162 с.
5. Техничко-экономический расчет терминала отгрузки товарной нефти и СЖТ, завода получения газа (ПГ, ПНГ), сжиженных углеводородных газов (СРГ, СНГ) с терминалом отгрузки. Морская часть. Севастополь, 2014. 271 с.
6. Роснедра: государственный реестр участков недр, предоставленных в пользование, и лицензий на пользование недрами. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru> (дата обращения: 11.07.2023).
7. Прогноз параметров ветрового волнения: Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. Оперативный модуль ЕСИМО. URL: <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/opermodule> (дата обращения: 05.07.2023).
8. Сплоченность морского льда в Арктике (ежедневный анализ по спутниковым данным): Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. Оперативный модуль ЕСИМО. URL: <http://hmc.meteor.ru/sea/ocean/ice/icen.html> (дата обращения: 05.07.2023).
9. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М.: Обминск: ИГ–

СОЦИН, 2017. 640 с.

10. Богатов С.А. «Утюжок» для газозиков и нефтяников // История корабля. 2007. № 1 (15). С. 38–50.
11. Судоверфь «Звезда» осуществила спуск со стапеля первого многофункционального судна снабжения: Роснефть. URL: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/204377/> (дата обращения: 13.09.2023).
12. Роннов Е.П. Проектирование судов: учебник для вузов. СПб: Лань, 2022. 296 с.

References:

1. Dobrodeev A., Sazonov K. The Estimation of Carbonic Gas Emission by Ice-Class Large-Size Ships Moving in Ice Using Different Escorting Methods. *Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2016, vol. 8, V008T07A001. ASME. (In English). DOI: 10.1115/OMAE2016-54099.
2. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. *Proyektirovaniye ledokolov* [Design of icebreakers]. St. Petersburg, Sudostroyeniye Publ., 2013, 512 p. (In Russian).
3. Zuev V.A., Gramuzov E.M., Kurkin A.A., Dvoichenko Yu.A., Sebin A.S. Fizicheskoye modelirovaniye deformatsii ledyanogo pokrova nagruzkoy, dvizhushcheysya s maloy skorost'yu [Physical modeling of ice cover deformation by a load moving at low speed]. *Fundamental and Applied Hydrophysics* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2022, vol. 15 (2), pp. 19–32. (In Russian). DOI: 10.59887/fpg/mkmg-68r8-4h6v.
4. *Tekhnicheskij otchet «Razrabotka tekhnicheskikh trebovanij v chasti prirodnykh vozdeystvij k perspektivnym ob'ektam morskoy tekhniki (platformy/suda) dlja razvedki, bureniya i dobychi uglevodorodov v glubokovodnoj chasti arkticheskogo shel'fa, vkljuchaja trebovaniya bezopasnosti dlja sooruzhenij v jekspluatácii i pri vypolnenii morskikh tekhnologicheskikh i jekspluatacionnykh operacij»* [Development of technical requirements in terms of natural influences for promising marine equipment (platforms/vessels) for exploration, drilling and production of hydrocarbons in the deep-water part of the Arctic shelf, including safety requirements for structures in operation and during offshore technological and operational operations]. St-Peterburg, AANII Publ., 2012, 162 p. (In Russian).
5. *Tekhniko-jekonomicheskij raschet terminala otgruzki tovarnoj nefti i SZhT, zavoda poluchenija gaza (PG, PNG), szhizhennykh uglevodorodnykh gazov (SRG, SNG) s terminalom otgruzki [Technical and economic calculation of a commercial oil and liquid fuel loading terminal, a gas production plant (NG, APG), liquefied hydrocarbon gases (SRG, CIS) with a loading terminal]]»* Morskaja chast'. Sevastopol, 2014, 271 p. (In Russian).
6. *Rosnedra: gosudarstvennyj reestr uchastkov nedr, predostavlennykh v pol'zovanie, i licenzij na pol'zovanie nedrami* [Rosnedra: state register of subsoil plots granted for use and licenses for subsoil use]. (In Russian). Available at: <https://www.rosnedra.gov.ru> (accessed 11.07.2023).
7. *Prognoz parametrov vetrovogo volnenija: Edinaja gosudarstvennaja sistema informacii ob obstanovke v Mirovom okeane. Operativnyj modul' ESIMO* [Forecast of wind wave parameters: Unified state information system on the situation in the World Ocean. ESIMO operational module]. (In Russian). Available at: <http://portal.esimo.ru/portal/portal/esimo-user/opermodule> (accessed 05.07.2023).
8. *Splochnost' morskogo l'da v Arktike (ezhednevnyj analiz po sputnikovym dannym): Edinaja gosudarstvennaja sistema informacii ob obstanovke v Mirovom okeane. Operativnyj modul' ESIMO* [Sea ice concentration in the Arctic (daily analysis based on satellite data): Unified state information system on the situation in the World Ocean. ESIMO operational module]. (In Russian). Available at: <http://hmc.meteor.ru/sea/ocean/ice/icen.html> (accessed 05.07.2023).
9. Dumanskaja I.O. *Ledovye uslovija morej aziatskoj chasti Rossii* [Ice conditions of the seas of the Asian part of Russia]. Moscow, Obninsk: IG–SOCIN Publ., 2017, 640 p. (In Russian).
10. Bogatov S.A. «Utjuzhok» dlja gazozikov i neftjanikov [“Iron” for gas and oil workers]. *Istorija korablja* [History of the Ship], 2007, no. 1 (15), pp. 38–50. (In Russian).
11. *Sudoverf' «Zvezda» osushhestvila spusk so stapelja pervogo mnogofunkcional'nogo sudna snabzhenija: Rosneft'* [The Zvezda shipyard launched the first multifunctional supply vessel: Rosneft]. (In Russian). Available at: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/204377/> (accessed

13.09.2023).

12. Ronnov E.P. *Proektirovanie sudov* [Ship design]. St. Peterburg, Lan' Publ., 2022, 296 p. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Иванова Ольга Александровна	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение» Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 o.a.ivanova.kmt@mail.ru
Ivanova Olga Alexandrovna	Ph.D (Engin.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 o.a.ivanova.kmt@mail.ru
Михайлова Татьяна Васильевна	доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение» Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 Tanya.mihailova@mail.ru
Mikhailova Tatiana Vasilievna	Assistant Professor of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 Tanya.mihailova@mail.ru
Никонова Екатерина Александровна	студент 5 курса кафедры «Океанотехника и кораблестроение» Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 katyanikonova355@mail.ru
Nikonova Ekaterina Alexandrovna	5th year student of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 katyanikonova355@mail.ru
Родькина Анна Владимировна	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение» Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 a.v.rodkina@mail.ru
Rodkina Anna Vladimirovna	Ph.D (Engin.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 a.v.rodkina@mail.ru