



**КамчатГТУ**



# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ**

*Материалы  
Четвертой международной научно-технической конференции  
(25–26 ноября 2021 г.)*

Петропавловск-Камчатский  
2022

Федеральное агентство по рыболовству  
Российский союз инженеров  
Международный союз машиностроителей  
Камчатский государственный технический университет  
Донецкий национальный технический университет  
Азербайджанская государственная морская академия  
Усинский филиал Ухтинского государственного технического университета

***ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ  
ВОДНОГО ТРАНСПОРТА:  
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ***

*Материалы  
Четвертой международной научно-технической конференции  
(25–26 ноября 2021 г.)*

Издательство



КамчатГТУ

Петропавловск-Камчатский  
2022

УДК 656.6:629.5  
ББК 39.42-08  
Т38

Ответственный за выпуск

*О.А. Белов,*  
кандидат технических наук

Редакционная коллегия

*О.А. Белов, к.т.н. (председатель); С.Ю. Труднев, к.т.н.;  
А.В. Костенко, к.т.н.; С.Н. Царенко, к.т.н.;  
Е.П. Белова, к.п.н.; Гузь М.П.*

Т38 **Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития** : материалы Четвертой международной научно-технической конференции (25–26 ноября 2021 г.) / отв. за вып. О.А. Белов. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2022. – 145 с.

ISBN 978-5-328-00422-0

В сборник включены материалы Четвертой международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития», отражающие научные и практические результаты в области технической эксплуатации водного транспорта.

Освещены актуальные проблемы, представлены современные достижения и перспективные направления развития в таких областях, как судовождение, судостроение и судоремонт, электротехнические комплексы и системы, информационные технологии и моделирование, технологические машины и оборудование, наукоемкие технологии изготовления и ремонта деталей судов и судовых агрегатов, подготовка инженерных кадров.

Авторами представленных докладов являются преподаватели, ведущие сотрудники научно-исследовательских институтов, аспиранты и студенты высших учебных заведений, ведущих научную и образовательную деятельность в сфере водного транспорта.

УДК 656.6:629.5  
ББК 39.42-08

ISBN 978-5-328-00422-0

© КамчатГТУ, 2022  
© Авторы, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 1. СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ СУДОВ И СУДОВЫХ АГРЕГАТОВ

<b>Белов О.А.</b> Техническое обеспечение морских судов как фактор эффективной и безопасной эксплуатации морского транспорта .....	5
<b>Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Лукичев А.В., Стрельник Ю.Н.</b> Технологическое обеспечение оптимального ресурса деталей соединений транспортных машин с неравномерным воздействием эксплуатационных факторов .....	10
<b>Михайлов Д.А., Шейко Е.А., Михайлов А.Н.</b> Методологические основы комплексного обеспечения функционально-ориентированных свойств иерархической структуры газотурбинных двигателей .....	15
<b>Семенов А.Ю., Ястребов Д.П., Швецов В.А.</b> Разработка импульсного лабораторного источника питания с дополнительными узлами управления для ремонта техники на рыбопромысловых судах и кораблях .....	20
<b>Трибунская Р.М., Жуков С.А.</b> Анализ состояния подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания неразрушающим методом магнитной памяти металла.....	24
<b>Фоменко С.А., Танасогло А.В., Бубнов А.С., Попов Д.Н., Цуканов Д.А.</b> Методика проведения вибрационных испытаний ферменных конструкций.....	27
<b>Ястребов Д.П., Ершова К.И., Летунов А.С., Дуров Д.Е.</b> О результатах внедрения научных исследований на рыбопромысловых судах Камчатского края .....	32

### СЕКЦИЯ 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>Гараев Р.А., Труднев С.Ю.</b> Разработка судового тренажера для адаптации членов экипажей морских судов .....	36
<b>Глебова Е.В., Дочкин А.А.</b> Оценка возможности применения полимерных изоляторов в судовых высоковольтных системах .....	39
<b>Кузьмина Ю.А., Труднев С.Ю.</b> Исследование работы двигателя постоянного тока на холостом ходу .....	43
<b>Марков Н.А., Марченко А.А.</b> Исследование одноконтурной модели гребной электрической установки.....	46
<b>Марченко А.А., Столетов С.В.</b> Исследование механических характеристик асинхронного электродвигателя в режиме генераторного торможения .....	51
<b>Мясников Г.С., Новосадов Б.И.</b> Повышение надежности контактной аппаратуры в условиях реализации требований технической эксплуатации .....	58
<b>Рогожников А.О., Белов О.А.</b> Разработка программного обеспечения обработки данных для автоматизированного устройства контроля коррозионной защиты .....	63
<b>Рогожников А.О., Ершова К.И.</b> Разработка тренажера отработки навыков управления судовой электроэнергетической системой.....	69

<b>Стреляева Ю.В., Марченко А.А.</b> Построение одноконтурной модели гребной электрической установки .....	73
<b>Терновский П.Б., Лицкан М.Ю.</b> Организация поверки контрольно-измерительных приборов и повышение качества эксплуатации судового электрооборудования .....	77
<b>Яблуновский И.А., Перминов В.А.</b> Техническое обеспечение измерения и контроля уровня топлива в судовых танках .....	81

### СЕКЦИЯ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

<b>Горячковская А.С., Труднев С.Ю.</b> Двигатель внутреннего сгорания (двигатель Стирлинга) .....	87
<b>Игнаткина Е.Л., Костенко А.В.</b> Особенности планирования экспериментальных исследований коэффициента трения тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог .....	89
<b>Иодис В.А., Сарайкина И.П., Акжигитов А.А.</b> Проектирование схемы установки получения твердого диоксида углерода .....	93
<b>Иодис В.А., Сарайкина И.П., Шмелёв Д.А.</b> Технико-экономический анализ промышленных установок для производства сухого льда .....	97
<b>Фоменко С.А., Танасогло А.В., Машталер С.Н.</b> Метод усиления пролетной конструкции крана-перегрузателя .....	101

### СЕКЦИЯ 4. ТРАНСПОРТНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Белов О.А., Белова Е.П.</b> Современные технологии защиты от коррозии и опыт их применения на морском транспорте .....	104
<b>Змеев А.Д., Рогожников А.О.</b> Перспектива использования подводных дронов для оценки технического состояния антикоррозийной защиты судна .....	109
<b>Ляндзберг Р.А.</b> Самые опасные ядерные аварии XX века .....	113
<b>Рак А.Н., Царенко С.Н.</b> Об опасности использования ламп накаливания в трюме при перевозке лесоматериалов неспециализированными судами .....	116
<b>Царенко С.Н., Молчан А.А., Мхоян А.А.</b> Динамика валопровода гребного винта при линейном режиме разгона .....	122

### СЕКЦИЯ 5. ГУМАНИТАРНАЯ СЕКЦИЯ

<b>Белова Е.П.</b> Основные направления исследования коррозии морских судов в иностранной научной литературе .....	127
<b>Каверина О.Г., Сирота Т.А.</b> Развитие умения работать с информацией на иностранном языке как необходимое условие для профессионального роста .....	132
<b>Ковалев И.А.</b> К вопросу оценки уровня здоровья курсантов .....	136
<b>Шаповалова Е.В., Нистор А.С.</b> Разработка учебно-методического комплекса с применением аддитивных технологий для работы с людьми с ограниченными возможностями здоровья .....	140
Список организаций – участников конференции и их адреса .....	145

## СЕКЦИЯ 1. СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ СУДОВ И СУДОВЫХ АГРЕГАТОВ

УДК 629.5

**О.А. Белов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: boa-1@mail.ru*

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРСКИХ СУДОВ КАК ФАКТОР ЭФФЕКТИВНОЙ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

Морские суда являются базовой экономической составляющей в развитии прибрежных регионов и территорий. Обеспечение эффективной и безопасной эксплуатации морского транспорта является важной и актуальной задачей. Решение этой задачи требует системного подхода и включает в себя комплексы мероприятий по совершенствованию конструктивной и организационно-технической составляющей судов, а также по совершенствованию и развитию береговой инфраструктуры технического обеспечения судового состава флота. В статье приводится анализ состояния системы технического обеспечения морских судов в Камчатском крае и оценивается влияние данного фактора на эффективность и безопасность эксплуатации флота в целом.

**Ключевые слова:** техническое обслуживание, техническая эксплуатация, работоспособность, эффективность, надежность, безопасность.

**O.A. Belov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: boa-1@mail.ru*

### TECHNICAL SUPPORT OF SEA SHIPS AS A FACTOR OF EFFECTIVE AND SAFE OPERATION OF SEA TRANSPORT

Marine vessels are the basic economic component in the development of coastal regions and territories. Ensuring the efficient and safe operation of maritime transport is an important and urgent task. Solving this problem requires a systematic approach and includes a set of measures to improve the constructive, organizational and technical component of ships, as well as to improve and develop the coastal infrastructure for the technical support of the fleet. The article analyzes the state of the system of technical support of sea vessels in the Kamchatka Territory and evaluates the influence of this factor on the efficiency and safety of the fleet operation as a whole.

**Key words:** maintenance, technical operation, operability, efficiency, reliability, safety.

Безопасность эксплуатации судна в первую очередь определяется его техническим состоянием. Основа безопасной эксплуатации закладывается еще на этапе строительства судна в ходе реализации конструктивных мероприятий. Именно реализация этого этапа обеспечивает необходимый уровень надежности корпуса судна, а также судовых систем, устройств и отдельных механизмов. Выбор корпусных материалов, оборудования и принятие конструктивных, технологических и схемных решений закладывают в проект судна необходимые мореходные и эксплуатационные качества. Кроме этого, на этапе проектирования и строительства судов закладывается основа их дальнейшей эффективной технической эксплуатации [1, 2].

Опыт эксплуатации морских судов подтверждает важность комплексной реализации конструктивных мероприятий на этапе строительства судна. Однако поддержание заданного уровня

технической готовности судна, обеспечение его исправного технического состояния в целом и работоспособности отдельных узлов и механизмов зависят от общей организации технической эксплуатации и построения всей системы технического обеспечения. На данном этапе можно выделить несколько основных составляющих, связанных с обеспечением безопасной и эффективной эксплуатации морского транспорта.

Во-первых, следует отметить качество профессиональной подготовки экипажей судов. Руководящими документами, в частности Международной конвенцией «О подготовке и дипломировании моряков и несении вахты» (ПДНВ), устанавливаются стандарты знаний, понимания, опыта и профессиональной компетентности членов экипажей морских судов. Обеспечение данных стандартов компетентности и профессионализма моряков призвано обеспечить охрану человеческой жизни, имущества и окружающей среды. Поэтому профессиональная подготовка членов экипажей судов включает в себя формирование компетенций в области технического обслуживания, проведения регламентных работ и ремонтов [3–5].

Однако для определения степени готовности системы и оценки ее технического состояния в процессе эксплуатации судна наряду с традиционными показателями необходимо учитывать влияние человеческого фактора. Как известно, человеческий фактор в любой технической системе является слабоформализуемым явлением и неизбежно делает все такие системы вероятностными. Исходя из вероятностной природы этого явления, обычные методы оценки и прогнозирования уровня технической готовности оказываются неэффективными. Для снижения влияния данного явления следует внедрять в систему управления технической эксплуатацией новые методы организационного контроля, технологии и системы автоматизированного контроля, а также усовершенствованные методы оценки технической готовности судна, наглядно отражающие ее уровень с учетом человеческого фактора. Такой подход позволяет прогнозировать возможные технические происшествия и отказы, а также своевременно определять и устранять предпосылки к их возникновению [6].

Во-вторых, следует учитывать необходимость наличия базы технического обслуживания судов. Такие подразделения решают задачи устранения дефектов различного оборудования, восстановления рабочих свойств отдельных деталей, изготовление новых деталей или специальных приспособлений и т. д. Основная роль базы технического обслуживания заключается в увеличении возможностей восстановления заданного уровня технической готовности судна в период проведения регламентных работ за счет дополнительных производственных мощностей. Базы технического обслуживания могут формироваться на основе береговых ремонтно-технических станций (БРТС), отдельных судоремонтных мастерских (СРМ) или ремонтно-эксплуатационных баз (РЭБ). Также возможно формирование подвижных ремонтно-эксплуатационных комплексов на основе плавучих мастерских (ПМ). В последнем случае возможно качественное обеспечение проведения большого объема регламентных и восстановительных работ непосредственно в море или во временных пунктах базирования судов [7].

С увеличением на судах цифрового оборудования и микропроцессорной техники возникает необходимость создания специализированного информационно-технического центра по обслуживанию и обеспечению работоспособности данного вида оборудования. Учитывая высокий уровень автоматизации современных судов и широкий спектр применяемых микропроцессорных систем, необходимость такого специализированного центра очевидна. Для реализации комплексного подхода по этому направлению данный центр должен быть универсальным и многофункциональным. Это в свою очередь требует объединения и централизации ресурсов, сосредоточения материально-технического, производственного и кадрового потенциала в рамках регионального информационно-технического центра.

В-третьих, важную роль в поддержании на заданном уровне технической готовности судов играет система материально-технического обеспечения. Под понятием «материально-техническое обеспечение» подразумевается целый ряд необходимых мероприятий по полной комплектации судна к его дальнейшей эксплуатации. Система материально-технического обеспечения решает задачу обеспечения судов материалами и запасами по номенклатуре и в количествах, необходимых для их эффективной эксплуатации и безопасного плавания. Под указанными материалами понимаются определенное техническое оборудование, запасные части, инструмент, приспособления, запасы воды, ГСМ и другие расходные материалы, необходимые для нормальной эксплуатации судна и поддержания его технической готовности [7].

Количество и номенклатура материальных запасов определяются нормами снабжения. Нормы снабжения должны учитывать тип судна, особенности его эксплуатации, состав основного оборудования и его характеристики, в том числе периодичность и объемы регламентных работ.

Основным критерием оценки эффективности системы материально-технического обеспечения является объем номенклатуры материальных запасов. При эксплуатации серийных судов однотипных проектов решение данной задачи упрощается, так как номенклатура расходных материалов для этих судов будет одинаковой. Особенно это важно в вопросах снабжения судов запасными частями, в том числе используемых при проведении очередных освидетельствований и регламентных работ. Высокая организация работы и развитая номенклатура системы материально-технического обеспечения позволяют повысить качество технического обслуживания и ремонтов, снизить финансовые затраты и сократить сроки их проведения.

Увеличение числа различных проектов судов с использованием на них оборудования разных типов, марок и производителей подрывает надежность материально-технического обеспечения. Увеличение объемов номенклатуры утрачивает смысл, так как в таких условиях часть материальных запасов может оказаться невостребованной. В этом случае системе снабжения приходится работать практически «с колес» под конкретные заказы, что существенно снижает ее эффективность. При этом массовое использование оборудования иностранных производителей еще больше усугубляет ситуацию, так как появляются дополнительные экономические, логистические, а в современных условиях еще и политические риски.

Снижение данных рисков и повышение устойчивости является актуальной задачей в системе материально-технического обеспечения. Общая унификация судов и судового оборудования в современных условиях практически невозможна. Однако следует понимать и комплексно оценивать влияние данного фактора на эффективность системы материально-технического обеспечения. Нивелировать возникающие риски и обеспечить требуемую эффективность позволяет применение системы автоматизированного учета материальных запасов. Такие автоматизированные системы повышают оперативность управления материальными запасами, придают всей системе снабжения дополнительную маневренность и возможность своевременно адаптироваться к изменяющимся условиям.

Четвертым, базовым элементом эффективной технической эксплуатации морского транспорта является система судоремонта. Основной задачей, решаемой в ходе плановых ремонтов судов, является восстановление их технических характеристик до уровня, позволяющего обеспечить эффективную и безопасную эксплуатацию судна в межремонтный период. Дополнительно в период плановых ремонтов могут решаться задачи улучшения или изменения характеристик судна или отдельных видов оборудования путем проведения дополнительных работ по реконструкции, модернизации или переоборудованию судна [8].

Основу эффективного судоремонта составляет производственная база судоремонтного предприятия. Она включает в себя производственные цеха и участки, позволяющие реализовать полный технологический цикл восстановления работоспособности судна и его оборудования. Соответственно, развитая производственная база, автоматизация производственных процессов, применение современных технологий являются важными факторами обеспечения качественного ремонта судов. Строится такая производственная база на эффективной системе снабжения предприятия, позволяющей оперативно обеспечивать потребности судоремонтного производства.

Ремонт судов является сложным технологическим процессом, включающим в себя множество отдельных технологий. Для реализации этих технологий и решения главных задач судоремонта требуется высококвалифицированный персонал. Подготовка специалистов, создание и поощрение системы передачи опыта, формирование кадрового потенциала предприятия – важная задача и определяющий фактор в вопросах обеспечения эффективности всего судоремонтного комплекса.

Функционирование представленной системы обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации судна невозможно без отлаженной системы финансирования, эффективной правовой базы и комплексного научного обеспечения производства. Отсутствие или несовершенство любого из этих трех элементов нарушает устойчивость системы, и она утрачивает свою работоспособность. Также следует обратить внимание на взаимосвязь и зависимость всех элементов друг от друга на различных уровнях функционирования данной системы. Только при соблюдении всех структурных связей обеспечивается необходимая сбалансированность системы, позволяющая

не только решать главную задачу по обеспечению технической готовности морских судов и их эффективной эксплуатации, но и поддерживать саму систему в тонусе за счет создания условий совершенствования и развития.

Общая структурная схема рассмотренной системы технического обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации морских судов представлена на рисунке.



*Структурная схема системы технического обеспечения эффективной эксплуатации и безопасной эксплуатации морских судов*

Как видно из рисунка, представленная структурная схема состоит из трех уровней, на которых базируется техническая готовность судов, обеспечивающая в свою очередь эффективную эксплуатацию судна. При этом верхний и нижний уровни являются постоянными, статическими составляющими системы, в то время как средний уровень представляет собой динамический набор факторов, изменяющихся под воздействием внешних и внутренних условий. Структура среднего уровня может изменяться, дополняться или иметь другой набор элементов в зависимости от региона, типового состава судов, условий кадрового обеспечения и других факторов. Это придает всей системе необходимую функциональность и устойчивость, позволяющую качественно обеспечить решение актуальной задачи повышения эффективности и безопасности эксплуатации морских судов.

Таким образом, техническое обеспечение судна представляет собой сложную, глубоко интегрированную многоуровневую систему. Любой элемент этой системы не может эффективно функционировать изолированно, обособленно или вне структуры данной системы. Развитие или совершенствование системы возможно только при наличии сформированного верхнего и нижнего уровня представленной структурной схемы за счет оптимизации состава элементов среднего уровня. В ином случае можно говорить об отсутствии результативной и надежной системы технического обеспечения морских судов, что подрывает основы их эффективной и безопасной эксплуатации.

### Литература

1. Белов О.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский. – 2019. – С. 80–83.
2. Белов О.А. Оценка безопасности эксплуатации судовых энергетических установок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2017. – № 42. – С. 6–10.
3. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты // Международная морская организация. – Лондон: ИМО, 2013. – 413 с.
4. Белов О.А. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.
5. Белов О.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2016. – № 3 (16). – С. 78–81.
6. Белов О.А. Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – № 30. – С. 11–16.
7. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 5–9.
8. Гальянов А.П. Технология и организация судоремонта в рыбной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1988. – 303 с.

УДК 621.7.067

**А.Н. Михайлов, С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, Ю.Н. Стрельник**

*Донецкий национальный технический университет,  
Донецк, 283001  
e-mail: serge-matvienko@yandex.ru*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕСУРСА  
ДЕТАЛЕЙ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН  
С НЕРАВНОМЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ**

Разработана методика обеспечения заданного ресурса деталей по критерию износостойкости технологическими методами формирования рабочего поверхностного слоя. Разработан алгоритм управления ресурсом по критерию износостойкости. Предложена структура аналитической оценки ресурса по критерию износостойкости. Рассмотрены структурные варианты модифицированного поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** поверхностный слой, зона, ресурс, свойства, технологические воздействия.

**A.N. Mikhaylov, S.A. Matvienko, A.V. Lukichev, Yu.N. Strelnik**

*Donetsk National Technical University,  
Donetsk, 283001  
e-mail: serge-matvienko@yandex.ru*

**TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR OPTIMUM SERVICE LIFE  
OF DETAIL CONNECTIONS OF TRANSPORT MACHINES  
WITH UNEVEN IMPACT OF OPERATIONAL FACTORS**

The technique has been developed to ensure a specified life of parts by the criterion of wear resistance by technological methods of forming a working surface layer. An algorithm for resource management based on the wear resistance criterion has been developed. The structure of the analytical assessment of the resource according to the criterion of wear resistance is proposed. Structural variants of the modified surface layer are considered.

**Key words:** surface layer, zone, resource, properties, technological impact.

Задача прогнозирования износа рабочих поверхностей деталей для обеспечения заданной надежности и долговечности деталей имеет решающее значение для назначения ресурса деталей и машины в целом.

Ресурс ответственных деталей сопряжений машин с неравномерным воздействием в пространстве и во времени эксплуатационных факторов на их рабочий поверхностный слой (ПС) напрямую определяется износостойкостью рабочего ПС, а именно износостойкостью функциональной зоны ПС с наименьшим ресурсом по сравнению с остальными зонами. Поэтому оптимальным для определения ресурса деталей сопряжений с неравномерным воздействием эксплуатационных факторов на рабочую поверхность является применение критерия износостойкости [1–9].

Алгоритм оценки ресурса детали по критерию износостойкости рабочего ПС позволяет выполнить теоретический анализ для оценки эффективности различных способов формирования модифицированных ПС и выбора наиболее целесообразных вариантов для заданных условий эксплуатации.

Общая структура расчета на износ деталей подвижных сопряжений, как правило, включает следующие этапы [7]:

- 1) определение расчетных давлений на контактных поверхностях;
- 2) определение характера контактного взаимодействия рабочих ПС;
- 3) расчет линейного износа;
- 4) определение рабочих ресурсов по критерию износостойкости.

Интенсивность изнашивания контактирующих рабочих ПС зависит от конкретных условий эксплуатации, является функцией времени и зависит от силы сжатия трущихся поверхностей, скорости скольжения, твердости материала, волнистости и шероховатости контактирующих поверхностей, вида смазочного материала, температуры, наличия вибраций, рабочей среды и других факторов [9].

Управление жизненным циклом изделия осуществляется постоянно на этапах проектирования, изготовления, эксплуатации и утилизации. На стадиях проектирования и изготовления решаются следующие основные задачи:

- управление ресурсом (сроком службы) деталей и изделия в целом;
- уменьшение себестоимости;
- обоснование увеличения полного ресурса детали за счет восстановления на следующий временной интервал.

Стратегия управления ресурсом детали включает три этапа. На первом этапе стратегии ресурс детали устанавливается в целом. На втором этапе стратегии ресурс детали ограничивается наименьшим ресурсом какой-либо из его поверхностей. На третьем этапе ресурс детали определяется наименьшим ресурсом какой-либо функциональной зоны рабочего ПС, определяемого условиями эксплуатации.

На стадии технического проекта осуществляется выбор и обоснование критических конструктивных элементов, лимитирующих ресурс детали по условиям износостойкости, проводится обоснование заданного ресурса.

На сегодняшний день рассматриваются расчеты ресурса различных трибосопряжений по критерию износостойкости. Но нет общей методики управления ресурсом деталей пар сопряжений по критерию износостойкости. Для технологических поверхностей с неравномерными эксплуатационными функциями по зонам свойственна ситуация, когда одна зона теряет свои функции раньше остальных, или когда отказы зон происходят дифференцированно. Восстановление работоспособности отдельной зоны или всей технологической поверхности связано с монтажом и демонтажом детали или узла и требует значительных экономических затрат.

С технологической стороны оптимальной будет функциональная поверхность, ресурс  $R_{ПС}$  которой будет равен ресурсу  $R_d$  всей детали, ресурсу узла в целом и ресурсу  $R_m$  машины в целом:

$$R_{ПС} = R_d = R_m. \quad (1)$$

При формировании ПС необходимо обеспечить равенство ресурсов всех функциональных зон. Например, совокупный ресурс  $R_{ПС}$  для рабочего поверхностного слоя с четырьмя функциональными зонами равен:

$$R_{ПС} = R_{ПС\ 31} = R_{ПС\ 32} = R_{ПС\ 33} = R_{ПС\ 34}. \quad (2)$$

Ресурс любой зоны поверхностного слоя ( $R_{ПС\ z}$ ) равен сумме ресурсов каждого функционального слоя данной зоны.

Необходимость обеспечения равного ресурса зон ПС требует дифференцированного расчета всех функциональных зон на износостойкость.

Исходя из [1–5], на ресурс деталей трения оказывают влияние твердость и коэффициент условий трения и среды. Коэффициент трения зависит от качества обработки трущихся поверхностей, скорости движения тел относительно друг друга и материала соприкасающихся поверхностей. Следовательно, на ресурс основное влияние оказывают технологии формирования рабочего ПС соответствующего качества. При финишной обработке формируется ПС, оказывающий влияние на процесс трения, износостойкость и триботехнические характеристики (линейный и весовой износ, коэффициент трения, интенсивность изнашивания).

**Алгоритм управления ресурсом по критерию износостойкости:**

- аналитическая оценка ресурса детали по критерию износостойкости;
- проектирование рабочих поверхностей;
- определение функциональных зон рабочих ПС;
- исследование каждой функциональной зоны на износостойкость;

- усовершенствование или разработка технологии модификации поверхностного слоя, обеспечивающей общий ресурс всей рабочей поверхности, равный ресурсу функциональной зоны поверхностного слоя;
- экономическое обоснование проектируемой детали.

Процесс аналитической оценки ресурса по критерию износостойкости можно разложить на следующие операции:

1. Определение исходных данных (конструкция сопряжения, условия эксплуатации, марка материала и др.).
2. Определение и расчет скорости качения и силы прижатия контактирующих поверхностей.
3. Расчет коэффициента трения.
4. Оценка физико-механических свойств материала контактирующих деталей с точки зрения износостойкости.
5. Расчет механической составляющей коэффициента трения в каждой функциональной зоне рабочего поверхностного слоя контактирующих поверхностей деталей.
6. Оценка скорости изнашивания каждой функциональной зоны ПС.
7. Оценка ресурса детали по критерию износостойкости.

С точки зрения потребительской полезности для деталей соединений наиболее важным показателем является оптимальная долговечность при наименьшей себестоимости. Целенаправленное формирование качества ПС имеет доминирующее значение для обеспечения оптимальной долговечности деталей. Достижение необходимой полезности решается конструкторскими и технологическими методами или их комбинацией. Особенно перспективными и необходимыми для обеспечения требуемого на сегодняшний момент уровня качества изделий являются функционально-ориентированные комбинированные технологии, разрабатываемые с учетом функционального назначения рабочих поверхностей деталей машин и условий их эксплуатации [10, 11].

Долговечность проектируемых деталей должна быть оптимальной. Оптимальная долговечность ( $T_{\text{опт. д}}$ ) – это период времени, в течение которого на нее приходятся минимальные совокупные годовые затраты [5]:

$$\frac{\sum_{i=1}^{T_{\text{опт}}} C_{\text{з. д. } i}}{T_{\text{опт}}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $C_{\text{з. д. } i}$  – совокупные затраты, приходящиеся на деталь в  $i$ -м году эксплуатации изделия;  $T_{\text{опт}}$  – оптимальная долговечность детали.

Так как ресурс деталей напрямую зависит от состояния рабочего ПС, то можно сказать, что  $T_{\text{опт. д}} = T_{\text{опт. ПС}}$ . ПС состоит из определенного множества функционально-ориентированных зон. Ресурс различных зон отличается. При сравнении оптимальных ресурсов ПС и детали в целом возможны разные варианты.

При этом повышение долговечности не всегда будет связано с повышением стоимости. Это возможно за счет применения комбинированных технологических воздействий и обеспечения максимального эффекта.

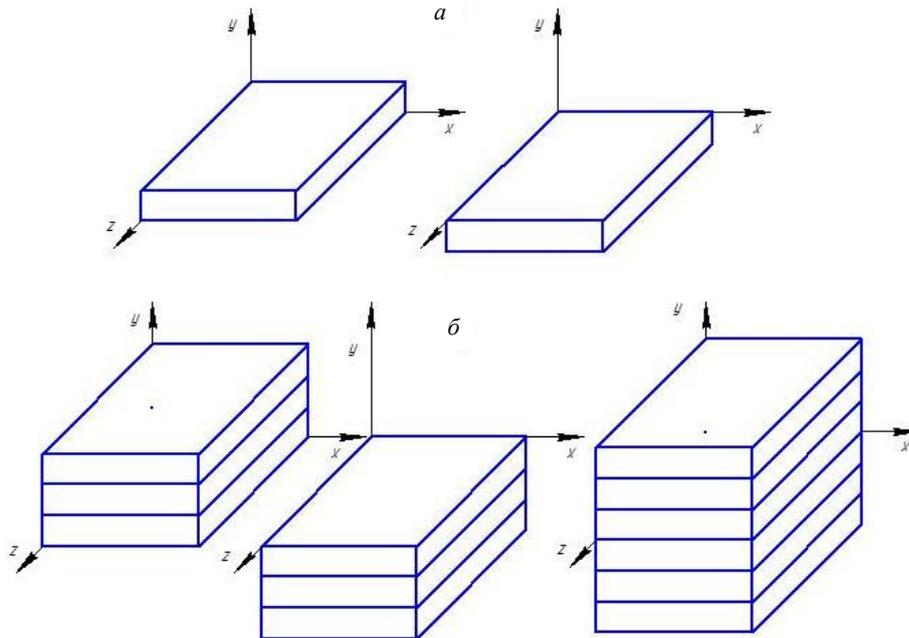
Обеспечение износостойкости как приоритетного эксплуатационного свойства ПС может осуществляться следующими методами модификации ПС:

- без нанесения покрытия (ХТО, ППД, методы упрочнения) с модификацией свойств без удаления припуска с целенаправленным комбинированным воздействием на поверхностный слой (химическим, электромагнитным, деформационным, термическим);
- нанесением покрытий (как правило, с модификацией поверхностных слоев), в том числе с применением комбинированных технологических процессов;
  - путем нанесения однослойных однородных покрытий;
  - путем нанесения однослойных композиционных покрытий;
  - путем нанесения многослойных покрытий;
  - с удалением части поверхностного слоя изделия до достижения материала, обладающего требуемыми эксплуатационными свойствами;
- комбинированием операций нанесения и упрочнения покрытий.

На рисунке представлены структурные варианты модифицированного ПС (МПС). Оси координат совпадают с плоскостью начала преобразования ПС [12, 13].

Однослойный функционально-ориентированный МПС (рис., а) модифицируется непрерывно. В этом случае по высоте слоя  $z$  его свойства и структура однородны. Однослойный функционально-ориентированный МПС в направлении  $x$  и  $y$  по поверхности детали модифицируется одновременно в двух направлениях. В направлении  $z$  или  $(-z)$  слой модифицируется непрерывно.

Многослойный функционально-ориентированный МПС (рис., б) формируется слоями в направлении  $x$  и  $y$  одновременно, а в направлении  $z$  и (или  $-z$ ) – прерывисто и относится к типу одновременно-единовременное прерывистое.



Структурные варианты МПС:

а – однослойный ПС типа «единовременно-единовременно непрерывный»;  
б – многослойный ПС типа «единовременно-единовременно прерывистый»

При обеспечении заданного оптимального ресурса наиболее ответственных деталей с неравномерными эксплуатационными факторами, действующими на участки рабочего ПС, необходимо технологическими методами формировать ПС с равенством ресурсов каждой функциональной зоны, достигающим величины ресурса изделия в целом.

### Литература

1. Модель отказов цилиндрических зубчатых передач по критерию износостойкости рабочих поверхностей / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – М.: МГТК им. Н.Э. Баумана, 2019. – № 5. – С. 3–9.
2. Методика анализа и повышения ресурса цепной передачи по критерию износа зуба звездочки с эволютным профилем / С.В. Андриенко, А.В. Устиненко, Р.В. Протасов // Вестник ХНАДУ. – Харьков, 2015. – Вып. 71. – С. 17–24.
3. Методика проектной оценки ресурса зубчатых муфт по критерию износостойкости / В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов // Современные наукоемкие технологии. – Магнитогорск: МГТУ им Г.И. Носова, 2018. – № 7. – С. 20–25.
4. Ахмедпашаев М.М., Ахмедпашаев М.У., Бегов Ж.Б. Расчет технического ресурса кинематических пар погружного винтового насоса: Сборник научных трудов Дагестанского государственного технического университета / Под общ. ред. Т.А. Исмаилова. – Махачкала, 2018. – Т. 1. – С. 54–57.

5. Повышение ресурса работы зубчатых передач на основе выбора технологий упрочнения рабочих поверхностей зубьев / *Л.И. Куксенова, С.А. Поляков, М.С. Алексеева, С.В. Рубцов* // Вестник научно-технического развития. – М., 2019. – № 3 (139). – С. 24–36.

6. *Ахмедпашаев М.У., Бегов Ж.Б.* Методика расчета деталей трибосопряжений на долговечность по критерию износостойкости и полного использования их годности. – Махачкала: Дагестанский гос. техн. ун-т, 2016. – С. 413–416.

7. *Суглобов В.В.* Определение рабочего ресурса шарниров скольжения универсальных шпинделей по критерию износостойкости // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сборник научных трудов. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – Вып. 2. – С. 103–109.

8. *Богданович А.В.* О расчетно-экспериментальной оценке работоспособности шаровых шарниров шасси транспортного средства. Часть 2: Расчет по критерию износостойкости и экспериментальное определение характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям // Механика машин, механизмов и материалов. – Минск: БГУ, 2019. – С. 58–65.

9. *Ряховский О.А., Сорокин Ф.Д., Марохин А.С.* Расчет ресурса по критерию изнашивания резьбы планетарного роликовинтового механизма // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – М.: МГТК им. Н.Э. Баумана, 2012. – № 4. – С. 42–49.

10. *Михайлов А.Н.* Общий подход в создании функционально-ориентированных макро-, микро- и нанотехнологий для изделий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XVIII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 12–17 сентября 2011 г.: в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Т. 2. – С. 209–217.

11. Методика нанесения функционально-ориентированного покрытия на шаровой палец наконечника рулевой тяги автобуса / *Ю.Н. Стрельник, Д.А. Михайлов, С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, А.Н. Михайлов* // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2020. – № 3 (70). – С. 57–64.

12. *Матвиенко С.А., Лукичев А.В.* Структура и классификация модифицированных поверхностных слоев деталей машин // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф. (26 ноября 2020 г.) / Отв. за вып. О.А. Белов. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2021. – С. 118–122.

13. *Михайлов А.Н.* Методика оценки значимости параметров качества деталей и их поверхностного слоя с точки зрения полезности (качества) / *А.Н. Михайлов, Ю.Н. Стрельник, С.А. Матвиенко, А.В. Лукичев, М.И. Литвинов* // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVIII междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 13–19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 323–327.

УДК 621.431

Д.А. Михайлов<sup>1</sup>, Е.А. Шейко<sup>1</sup>, А.Н. Михайлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Донецкая академия гражданской защиты,  
Донецк, 283050;*

<sup>2</sup> *Донецкий национальный технический университет,  
Донецк, 283001  
e-mail: mntk21@mail.ru*

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе представлены методологические основы комплексного обеспечения функционально-ориентированных свойств иерархической структуры газотурбинных двигателей. Эта методология базируется на итерационно-рекуррентном процессе формирования функционально-ориентированных свойств из условия обеспечения равных, кратных или функционально зависимых эксплуатационных свойств элементов авиационного двигателя. В данной работе показаны основные особенности реализации этой методологии в комплексном обеспечении функционально-ориентированных и эксплуатационных свойств иерархической структуры элементов газотурбинного двигателя.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, иерархическая структура элементов, функционально-ориентированные свойства, общая методология обеспечения свойств.

D.A. Mikhaylov<sup>1</sup>, E.A. Sheiko<sup>1</sup>, A.N. Mikhaylov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Donetsk Academy of Civil Protection,  
Donetsk, 283050;*

<sup>2</sup> *Donetsk National Technical University,  
Donetsk, 283001  
e-mail: mntk21@mail.ru*

## METHODOLOGICAL BASIS OF COMPREHENSIVE SUPPORT FOR FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF THE HIERARCHICAL STRUCTURE OF GAS TURBINE ENGINES

The paper presents the methodological foundations for the integrated provision of functionally oriented properties of the hierarchical structure of gas turbine engines. This methodology is based on an iterative-recurrent process of forming functionally-oriented properties from the condition of ensuring equal, multiple or functionally dependent operational properties of aircraft engine elements. This paper shows the main features of the implementation of this methodology in the complex provision of functionally oriented and operational properties of the hierarchical structure of the elements of a gas turbine engine.

**Key words:** gas turbine engine, hierarchical structure of elements, functionally oriented properties, general methodology for ensuring properties.

Газотурбинные двигатели (ГТД), являясь сложными системами, широко используются в авиационной технике в качестве силовых установок благодаря их высокой эффективности и нетрадиционным эксплуатационным характеристикам (рис. 1). При этом разработка новых ГТД и их совершенствование тесно связаны с особенностями конструктивного и технологического характера, обеспечением качественно новой совокупности свойств и возможностей. Поэтому проведение исследований в этом направлении является важнейшей задачей этого направления [1–3].

Выполненные исследования структуры ГТД [4, 5] позволили установить, что состав его элементов имеет иерархическую структуру, состоящую из  $R$ -уровней [5], где  $R$  – общее количество уровней структуры. При этом анализ особенностей эксплуатации ГТД показал, что на элементы его

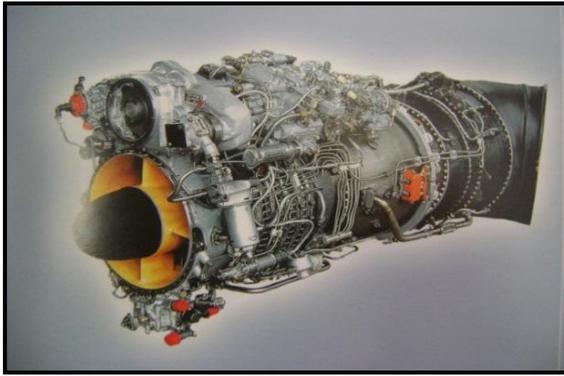


Рис. 1. Общий вид газотурбинного двигателя модели TB3-117

структуры действуют неравномерные эксплуатационные воздействия  $R$ -классов, которые вызывают возникновение неравномерных износов иерархической структуры элементов двигателя  $R$ -родов. Возникновение этих неравномерностей износа обусловлено особенностями структуры, конструктивными, кинематическими, температурными и термогазодинамическими характеристиками авиационного двигателя.

Проведенные исследования позволили установить, что для повышения эксплуатационных свойств ГТД целесообразно формирование функционально-ориентированных свойств (ФОС) с одновременным обеспечением равных, кратных или функционально-зависимых эксплуата-

ционных свойств его иерархической структуры элементов [6–8]. Вместе с тем можно отметить, что для решения этих вопросов необходима разработка общих методологических основ обеспечения ФОС иерархической структуры элементов ГТД.

В представленной работе выполняется разработка методологических основ формирования ФОС иерархической структуры элементов ГТД, работающих в условиях наличия неравномерных эксплуатационных воздействий.

### Методологические основы обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД

Можно отметить, что при формировании ФОС иерархической структуры элементов ГТД главной особенностью их обеспечения является совместное решение триединой задачи:

- обеспечение равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств (например, равного ресурса, назначенного ресурса, долговечности и тому подобного) элементов иерархической структуры ГТД, работающих в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий  $R$ -классов, вызывающих неравномерные износы  $R$ -родов;

- обеспечение изменяющихся технических свойств (например, физико-механических свойств (ФМС), конструктивных, геометрических и других) элементов иерархической структуры ГТД, работающих в условиях наличия неравномерных эксплуатационных воздействий  $R$ -классов, вызывающих неравномерные износы  $R$ -родов;

- обеспечение изменяющихся технологических свойств (например, технологических параметров реализации ФМС) элементов иерархической структуры ГТД, работающих в условиях действия неравномерностей эксплуатационных воздействий  $R$ -родов, вызывающих неравномерные износы  $R$ -родов.

На основании этого в данной работе разработаны методологические основы обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД. На рис. 2 показана последовательность общей методологии в обеспечении ФОС иерархической структуры элементов ГТД. Эта последовательность состоит из пяти стадий проектирования и обеспечения ФОС:

1-я стадия проектирования: разработка общего подхода в обеспечении ФОС структуры ГТД;

2-я стадия проектирования: технологический инжиниринг в обеспечении ФОС структуры ГТД;

3-я стадия проектирования: синтез технологического обеспечения ФОС структуры ГТД;

4-я стадия проектирования: формирование ФОС структурных элементов ГТД;

5-я стадия проектирования: повышение или обеспечение заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств ГТД.

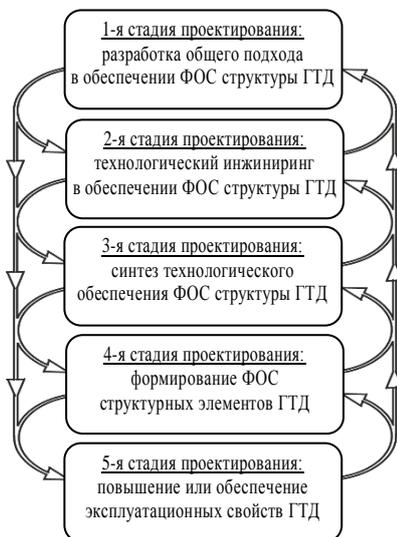


Рис. 2. Последовательность реализации методологических основ в обеспечении ФОС иерархической структуры элементов ГТД

Следует отметить, что в методологических основах процесс проектирования ГТД с ФОС структуры ГТД имеет итерационно-рекуррентную последовательность, что обеспечивает возможность учитывать обратные связи и уточнять исходные данные. На каждой стадии проектирования решается комплекс различных вопросов, связанных с обеспечением ФОС иерархической структуры ГТД.

На рис. 3 представлены основные особенности разработанных методологических основ в обеспечении ФОС структуры ГТД.

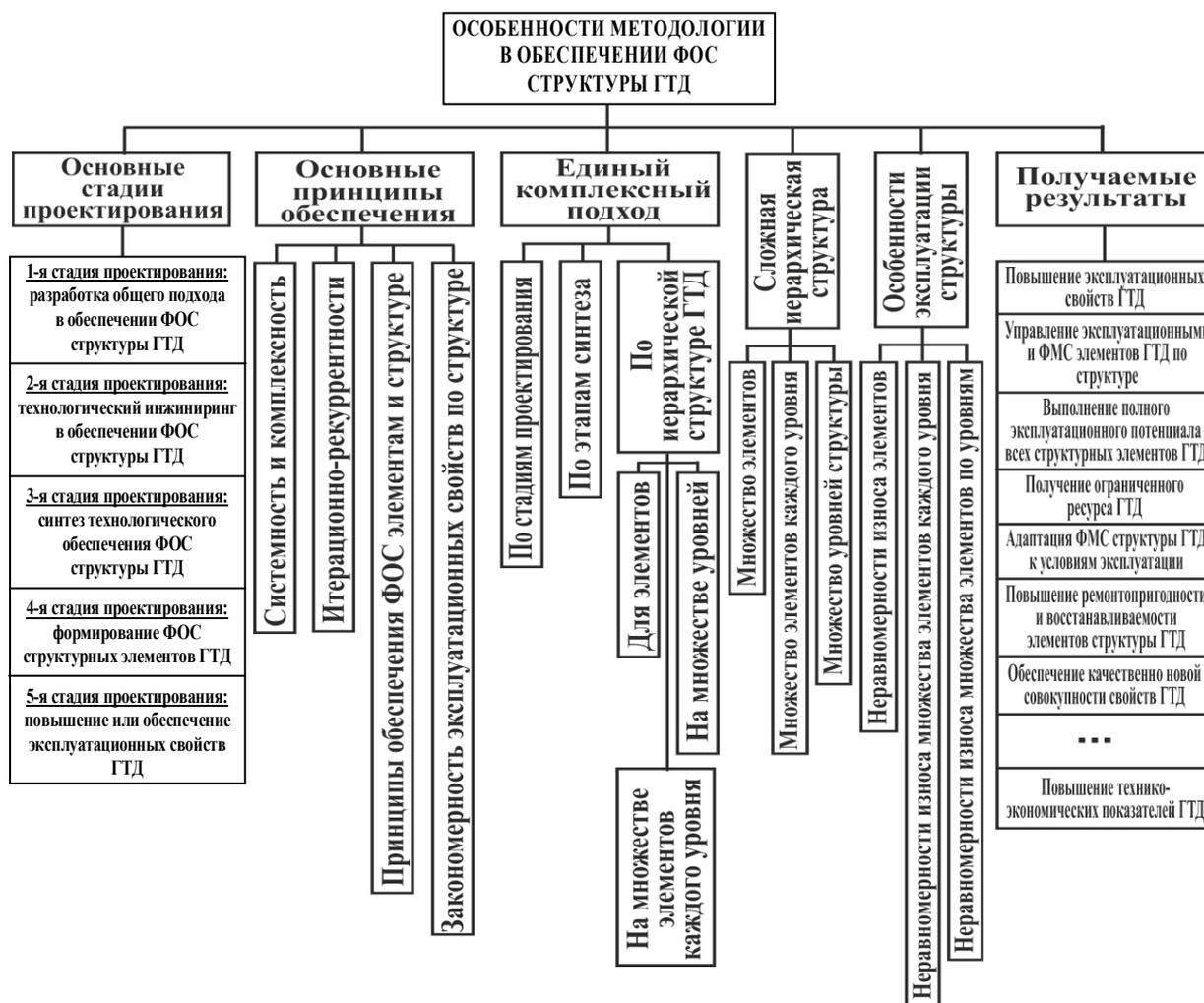


Рис. 3. Особенности методологических основ в обеспечении ФОС структуры ГТД

Можно отметить, что методологические основы в обеспечении ФОС иерархической структуры ГТД (рис. 3) базируются на следующих особенностях:

- основные стадии проектирования;
- основные принципы обеспечения;
- единый комплексный подход в проектировании;
- сложная иерархическая структура;
- особенности эксплуатации структуры;
- получаемые результаты.

Следует заметить, что главной особенностью этой методологии является то, что процесс обеспечения ФОС реализуется на основе единого комплексного подхода в проектировании. При этом на каждой стадии проектирования решаются свои конкретные задачи.

На 1-й стадии проектирования (см. рис. 2) выполнена разработка общего подхода в обеспечении ФОС иерархической структуры ГТД. Этот подход базируется на системной модели формирования ФОС по структуре ГТД. С помощью этой модели на базе входных параметров обобщенного входа и особенностей эксплуатационных воздействий определяются параметры

обобщенного выхода. Для решения вопросов обеспечения ФОС по структуре ГТД разработана общая структурная модель формирования ФОС по иерархической структуре ГТД в зависимости от этапов жизненного цикла.

2-я стадия проектирования – это технологический инжиниринг в обеспечении ФОС иерархической структуры ГТД. Процесс реализации технологического инжиниринга в обеспечении ФОС заключается в установлении связей, особенностей и начальных параметров обеспечения свойств по трем этапам жизненного цикла ГТД, а именно: эксплуатация, технология и обеспечение ФОС по иерархической структуре элементов ГТД.

В этом случае решаются следующие задачи:

1. Выполняют установление межэтапных связей – на базе группы особых принципов ориентации параметров функционально-ориентированного подхода [4].

2. Проводят выявление особенностей обеспечения ФОС иерархической структуры ГТД – на основе установления закономерностей между критериями свойств: эксплуатационные, технические (ФОС), технологические [6, 7].

3. Определяют начальные параметры в обеспечении ФОС по структуре ГТД – на базе композиционного синтеза процессов по трем этапам жизненного цикла ГТД [10].

При этом получаемый результат – определение начальных параметров для обеспечения ФОС и создания комплексной технологии для иерархической структуры ГТД.

На 3-й стадии проектирования выполняется синтез технологического обеспечения ФОС структуры ГТД. Можно отметить, что этот процесс имеет свои определенные особенности, а именно – этот процесс базируется на ряде принципов [4, 9, 10]. В целом на этой стадии проектирования решается целый комплекс вопросов [10].

Далее, на 4-й стадии проектирования выполняется формирование ФОС по иерархической структуре элементов ГТД. Можно отметить, что этот процесс имеет свои определенные особенности. Поэтому в целом на этой стадии проектирования решается также целый комплекс проблем [10].

На 5-й стадии проектирования решаются вопросы обеспечения и повышения эксплуатационных свойств ГТД. Поэтому на этой стадии проектирования определен рациональный объем структуры ГТД, которой следует обеспечивать ФОС. Эти данные определяются на базе специальных графиков, которые позволили установить следующее:

1. Для ГТД достаточно обеспечения ФОС структурных элементов в пределах 45...50% от общего количества его деталей.

2. Процесс обеспечения ФОС должен быть направлен на основные детали ГТД, такие как лопатки компрессора, турбины, свободные турбины, детали камеры сгорания и тому подобные, расположенные по проточной части (тракту) двигателя.

Таким образом, разработанные методологические основы обеспечения ФОС иерархической структуры элементов ГТД позволяют следующее:

1. Обеспечивается возможность создания ГТД с принципиально новыми свойствами.

2. Создаются условия для повышения ресурса ГТД, реализации предельного, заданного или требуемого его ресурса, повышения ресурса структурных составляющих ГТД из условия увеличения ресурса любого структурного элемента с более низким ресурсом до значения ресурса структурного элемента, имеющего предельный ресурс.

3. Обеспечивается равный, кратный или функционально-зависимый ресурс структурных составляющих ГТД по всей иерархической структуре его элементов.

4. Обеспечивается возможность использования полного эксплуатационного потенциала всех составляющих иерархической структуры ГТД.

5. Появляется возможность при изготовлении структурных составляющих ГТД адаптации их свойств к особенностям эксплуатации.

6. Обеспечивается возможность обеспечения, регулировки или управления эксплуатационных свойств структурных составляющих ГТД на этапе технологического обеспечения их свойств.

7. Повышается ремонтпригодность структурных составляющих ГТД, обеспечивается возможность многократного восстановления их эксплуатационных свойств при ремонтах.

8. Повышаются технико-экономические параметры ГТД в целом.

Разработанные методологические основы формирования ФОС иерархической структуры элементов ГТД, работающих в условиях наличия неравномерных эксплуатационных воздействий,

позволяют одновременно формировать эксплуатационные, технические и технологические свойства структуры и обеспечивать заданные, требуемые, ограниченные или предельные свойства авиационного двигателя.

### Литература

1. *Богуслаев В.А.* Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. – 332 с.
2. *Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л.* Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. *Авиаинформ: Ежемесячный информационно-аналитический журнал.* – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2021. – Вып. № 1 (202). – 126 с.
4. *Михайлов А.Н.* Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. *Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д.А. Михайлов, А.В. Хандожко, Е.А. Шейко, А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов.* – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 132–139.
6. Патент № 2718877 RU. Кл. C23C 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / *А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, В.А. Михайлов и др.* – Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.
7. *Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, Е.А. Шейко, В.А. Михайлов // Научно-технические технологии в машиностроении.* – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40–48. DOI: 10/30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48.
8. *Общие особенности технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами структуры / Д.А. Михайлов, А.Н. Михайлов, Н.С. Пичко, Е.А. Шейко // Научно-технические технологии в машиностроении.* – Брянск: БГТУ, 2021. – № 10 (124). – С. 28–38. Doi.org/10.30987/2223-4608-2021-10-28-38.
9. *Михайлов А.Н., Михайлов Д.А.* Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств // *Инновации в машиностроении: Сборник трудов XII Междунар. науч.-практ. конф.* – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 76–83.
10. *Особенности синтеза многосвязного технологического континуума обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя / Д.А. Михайлов, О.В. Филиппова, А.Н. Михайлов, Е.А. Шейко // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVIII междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 14–19 сентября 2021 г.* – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 328–334.

УДК 621.311.6

**А.Ю. Семененко, Д.П. Ястребов, В.А. Швецов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: restart1101@mail.ru*

## **РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УЗЛАМИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РЕМОНТА ТЕХНИКИ НА РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДАХ И КОРАБЛЯХ**

На сегодняшний день существует множество источников питания, все они предназначены для питания различных потребителей с разными параметрами и способами реализации. Преимуществом разработки перед низкочастотными преобразователями напряжения является малый вес и габариты, а выходная мощность и КПД во много превосходят сетевые трансформаторы. Существуют и недостатки: такие как издаваемые генератором помехи и высокочастотное излучение (ВЧ), но эти проблемы можно снизить путем установки экрана и фильтров ВЧ. В статье рассмотрен разработанный полумостовой сетевой импульсный лабораторный источник питания с номинальной мощностью в 3 000 Ватт, с регулировкой напряжения в широком диапазоне 1,2–65 вольт и с регулировкой тока 0,10–50 ампер, со срабатыванием защиты по выходным параметрам блока питания. Разрабатываемый блок питания может генерировать двухполярное питание для питания различных усилителей звука. Основное предназначение разработки – выполнять функции лабораторного источника питания для проверки различных устройств и аппаратуры, где один лабораторный блок питания заменяет узкоспециализированные аналоги. В отличие от аналогов, данная разработка обладает высокой надежностью и стабильностью, в которой использованы высококачественные компоненты, которые дают блоку запас по мощности компонентов.

**Ключевые слова:** полумостовой сетевой импульсный лабораторный источник питания, аккумуляторные батареи, система ограничения по току, фильтры высоких частот.

**A.U. Semenenko, D.P. Yastrebov, V.A. Shvetsov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: restart1101@mail.ru*

## **DEVELOPMENT OF A PULSED LABORATORY POWER SUPPLY WITH ADDITIONAL CONTROL UNITS FOR THE REPAIR OF EQUIPMENT ON FISHING VESSELS AND SHIPS**

Today there are many power supplies, all of them are designed to power various consumers with different parameters and implementation methods. The advantage of the development over low-frequency voltage converters is low weight and dimensions, and the output power and efficiency are much superior to mains transformers. There are disadvantages such as generator-emitted interference and high-frequency radiation (HF), but these problems can be reduced by installing a shield and high-frequency filters. The report considers the developed half-bridge network switching laboratory power supply with a nominal power of 3 000 watts, with voltage regulation in a wide range of 1.2–65 volts and with current regulation of 0.10–50 amperes, with protection operation according to the output parameters of the power supply. The power supply under development can generate bipolar power to power various audio amplifiers. The main purpose of the development is to perform the functions of a laboratory power supply for testing various devices and equipment, where one laboratory power supply replaces highly specialized analogs. The development, in contrast to analogs, has high reliability and stability, in which high-quality components are used, which give the unit a power reserve of components.

**Key words:** half-bridge network switching laboratory power supply, storage batteries, current limiting system, high-frequency filters.

На сегодняшний день существует множество источников питания, все они предназначены для питания различных потребителей с разными параметрами и способами реализации. Учреждения, в которых применяются блоки питания (БП) с регулируемым выходным питанием, имеют дело с различным оборудованием, форму питающего сигнала которого трудно точно предсказать [1]. Так, работа с электроникой автомобилей различных марок и моделей не может быть выполнена с применением одного-единственного источника питания. Та же ситуация с ремонтом техники и оборудования, в первую очередь компьютерного. Большое распространение получил лабораторный блок питания, который включает в себе большой потенциал функций и возможностей для запуска и ремонта различной техники [2].

Цель статьи – разработка импульсного лабораторного источника питания с дополнительными узлами управления для ремонта техники на рыбопромысловых судах и кораблях.

Для достижения поставленной цели разработан лабораторный источник питания с системой защиты от перенапряжения и перегрева. Разработанный полумостовой сетевой импульсный лабораторный источник питания имеет следующие характеристики: номинальная мощность в 3 000 Вт; регулировка напряжения в широком диапазоне – 1,2–65 В и с регулировкой тока 0,10–50 А; срабатывание защиты по выходу, также блок питания содержит узлы заряда аккумуляторных батарей и проверки светодиодов. Разработка может выдавать двухполярное питание для питания различных усилителей звука. Основное предназначение разработки – выполнять функции лабораторного источника питания для проверки различных устройств и аппаратуры, где один лабораторный блок питания заменяет узкоспециализированные аналоги [3]. На сегодняшний день готова переделанная система управления, распечатана силовая плата, на ней ШИМ-контроллер, драйвер, система триггерной защиты по току, термозащита, термовыключатель для кулера, часть схемы обратной связи по напряжению. Схема переделана для внедрения дополнительных узлов. Разработанная схема представлена на рис. 1.

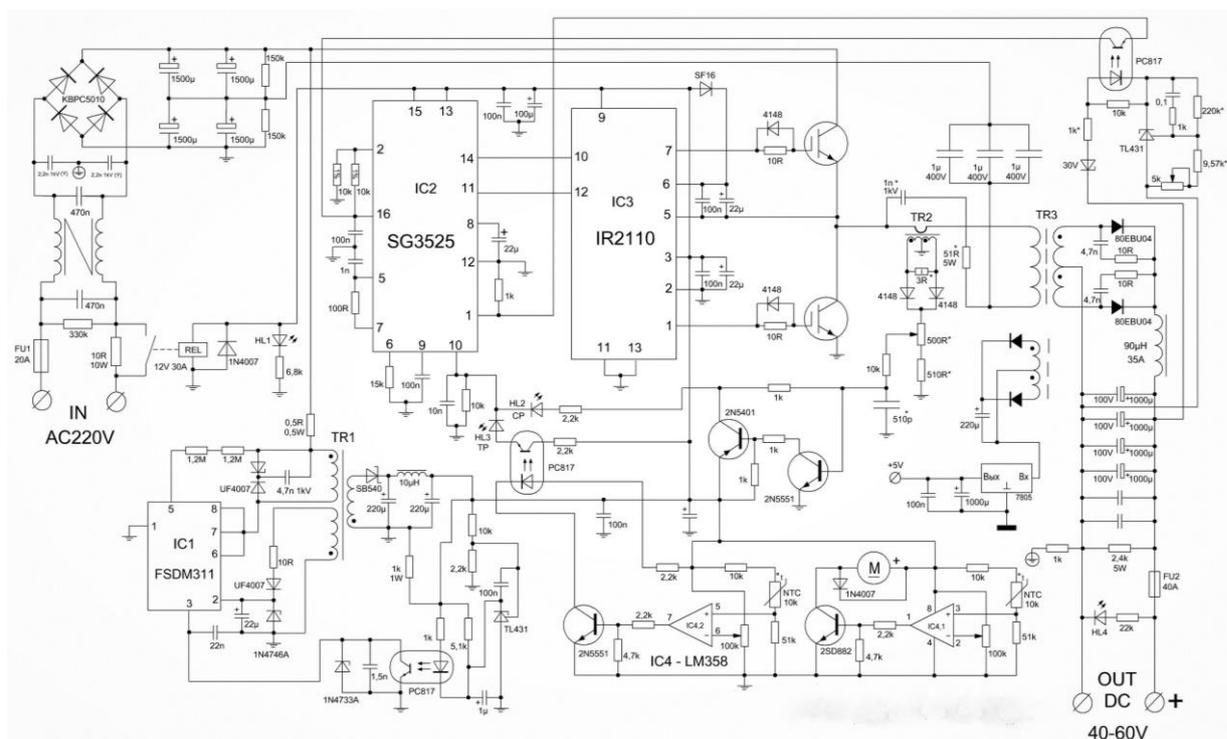


Рис. 1. Структурная схема устройства импульсного источника питания с узлами защиты и управления

Краткое описание лабораторного блока питания согласно рис. 1. Источник питания построен на основе ШИМ-контроллера SG3525. Рабочая частота широтно-импульсной модуляции (ШИМ) задается компонентами R10, C11, R7 (последний задает мертвое время в зависимости от сопротивления резистора, мертвое время может длиться до 5%).

Конденсатор С12 обеспечивает плавный пуск – это плавное увеличение скважности импульсов после запуска ШИМ-контроллера, такое решение обеспечивает мягкий заряд выходных конденсаторов и минимизирует значение ударных токов в момент запуска схемы.

Диоды VD7 и VD8 обеспечивают скоростной разряд затворов ключей в момент отсутствия импульса. Защита по току построена с применением трансформатора тока TR2 – увеличение тока во вторичной цепи (пример – короткое замыкание на выходе) приведет к резкому увеличению тока в первичной цепи, вследствие этого увеличится напряжение на вторичной обмотке трансформатора тока. Эта обмотка нагружена резистором 3R. На этом резисторе будет образовываться определенное падение напряжения. Это напряжение выпрямляется диодами VD9, VD10 и через делитель R42, R44 поступает на вход триггерной защелки, которая построена на транзисторах VT3, VT4. Если напряжение на входе триггера более 0,6–0,7 В, защелка сработает, откроется VT4, а затем и VT3. На выводе 10 микросхемы ШИМ поступит напряжение более 2,5 В, вследствие чего сработает внутренняя защита и микросхема перестанет генерировать импульсы. Сработает индикаторный светодиод HL2. Защита не сбросится, пока блок не будет отключен от сети и не разрядятся входные электролитические конденсаторы.

Подстроечным резистором R44 регулируют ток срабатывания защиты, если нужна регулировка в более широком пределе – меняется резистор 3R: чем больше его сопротивление, тем меньше ток срабатывания защиты и наоборот.

Рабочая частота микросхемы ШИМ – около 64 кГц, частота на выходах в два раза меньше, что можно увидеть на рис. 2. Импульсы с выхода микросхемы ШИМ (выходы 14 и 11) поступают на драйвер IR2110. Выход драйвера управляет IGBT-транзисторами.

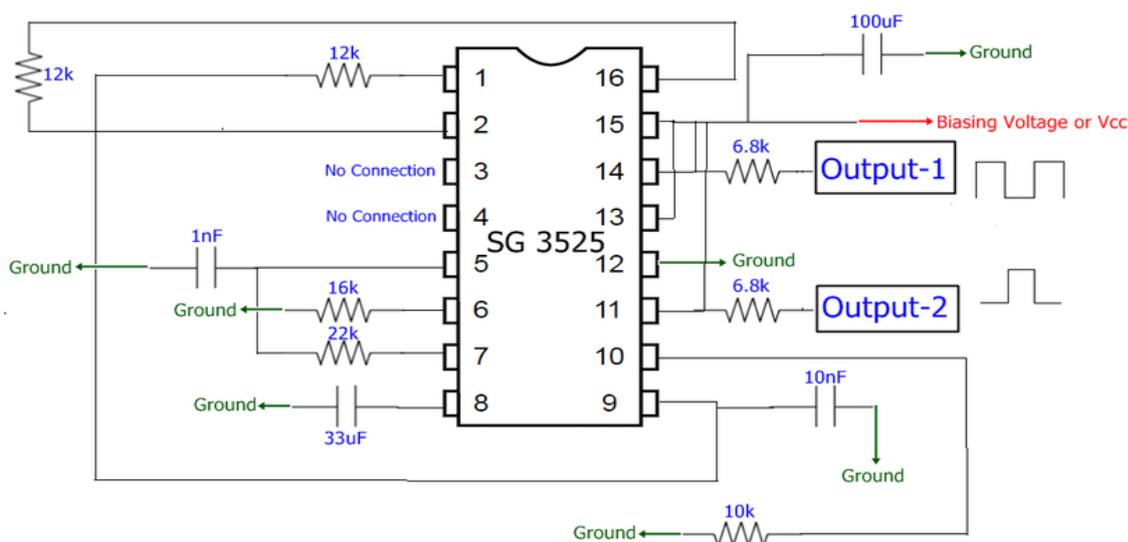


Рис. 2. Регулировка скважности ШИМ-сигнала и управление ключами

Лабораторные исследования выполняли с 12.09.20 по 18.03.21. В результате лабораторных исследований была оценена надежность элементной базы устройства и определены метрологические характеристики результатов контрольных измерений, которые представлены на рис. 3. Преимуществами разработки перед низкочастотными преобразователями напряжения являются малый вес и габариты, а выходная мощность и КПД во много раз превосходят сетевые трансформаторы, что видно из результатов исследований на рис. 3 [4]. Существуют и недостатки, такие как издаваемые генератором помехи и высокочастотное излучение (ВЧ), но эти проблемы можно снизить путем установки экрана и фильтров ВЧ [5]. Разработка в отличие от аналогов обладает высокой надежностью и стабильностью, использованы высококачественные компоненты, которые дают разработанному блоку в 20 раз и более запас по мощности компонентов по сравнению с аналогами. Например, существуют и более мощные источники у китайских производителей, но качество производства некоторых критически важных для целей и задач данного научного исследования элементов, входящих в их устройство, находится на низком уровне, т. к. в их производстве использованы недорогие малосильные элементы, работающие на пределе своих возможностей [4].

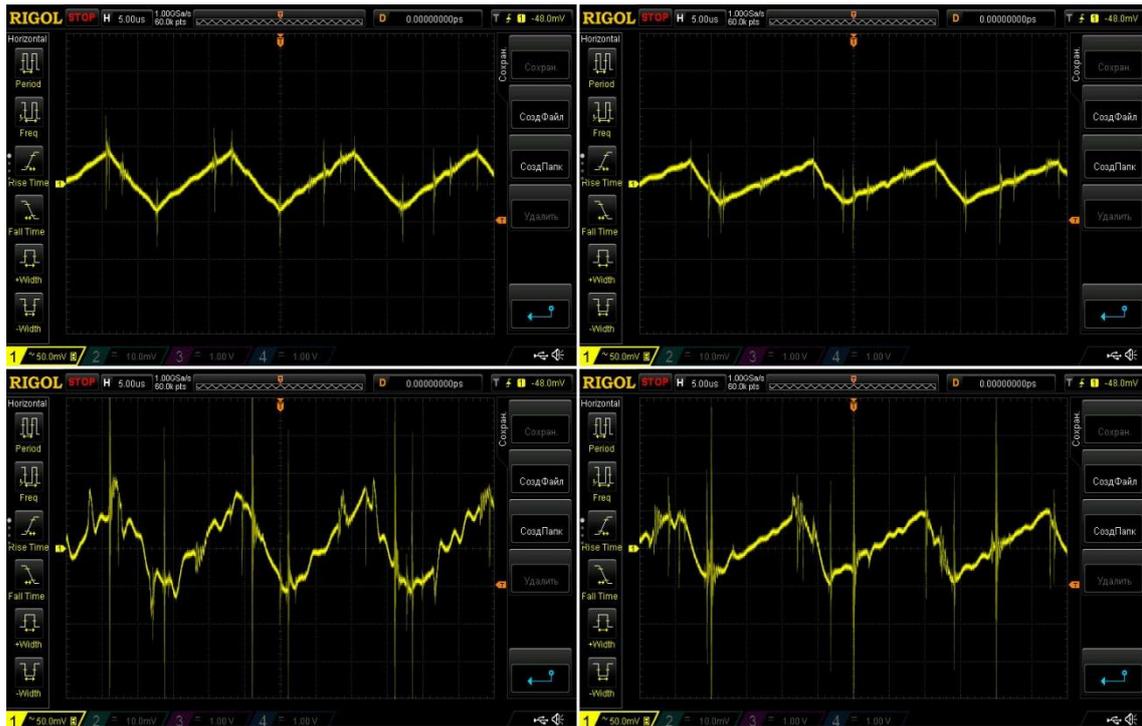


Рис. 3. Изменение частоты генерации разной выходной мощности

Обслуживающий персонал или будущие специалисты смогут произвести ремонт и получить практические навыки в схемотехнике. Что касается судовых компаний и рыбодобывающих комплексов, полученные навыки у персонала при повышении квалификации или переквалификации позволят снизить количество аварий на судах, выход оборудования из строя из-за неправильной эксплуатации персоналом и повысить в итоге безопасность мореплавания.

### Литература

1. Демянчук Я.И. Разработка лабораторного блока питания: Материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей им. Д.И. Менделеева. – Тюмень: Изд-во ТИУ, 2016. – С. 421–424.
2. Гусев В.Г., Гесев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. – М.: Высшая школа, 2008. – 797 с.
3. Мороз К. Импульсный блок питания 0...30 В, 0,01...5 А // Радио. – 2008. – № 4. – С. 23–24.
4. Лабораторный блок питания с управлением от микроконтроллера [Электронный ресурс]. – URL: <http://avr.ru/ready/contr/power/power> (дата обращения: 15.11.21).
5. Браммер Ю.А., Пацук И.Н. Импульсные цифровые устройства. – М.: Высшая школа, 2002. – 350 с.

УДК 621.41:621.822.1

**Р.М. Трибунская, С.А. Жуков**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: rayamt@mail.ru*

### **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА**

Рассматриваются диагностика вкладышей подшипников скольжения неразрушающим методом контроля – методом магнитной памяти металла, особенности вычисления магнитного показателя деформационной способности и выявления зон максимальной концентрации остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** подшипники, антифрикционный слой, магнитодислокационный гистерезис, магнитная память металла, концентрация остаточных напряжений, остаточная намагниченность, предельное состояние металла.

**R.M. Tribunskaya, S.A. Zhukov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: rayamt@mail.ru*

### **ANALYSIS OF THE STATE OF SLIDING BEARINGS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY THE NON-DESTRUCTIVE METHOD OF METAL MAGNETIC MEMORY**

The diagnostics of sliding bearing shells by the non-destructive method of testing the metal magnetic memory, the features of calculating the magnetic index of deformation capacity and identifying the zones of maximum concentration of residual stresses are considered.

**Key words:** earrings, antifriction layer, magnetic dislocation hysteresis, metal magnetic memory, concentration of residual stresses, residual magnetization, limiting state of metal.

Подшипники скольжения в процессе эксплуатации подвергаются воздействию постоянных и переменных по модулю и направлению нагрузок. Антифрикционный слой вкладышей должен обладать достаточно высокими механическими свойствами, при рабочих температурах – хорошими технологическими свойствами (прочной сцепляемостью с основанием, обрабатываемостью резанием). Основа вкладыша подшипника, на которую наносится подшипниковый материал, обеспечивает ему требуемую прочность и жесткость. Сплавом основы вкладыша является углеродистая сталь 10. Антифрикционные сплавы, наносимые на основу: на основе олова и свинца (специальный сплав Sn 10%, Cu 2,5–3%, Pb – остальное), на основе меди: бронза БрС30, БрОС1-22 (рис. 1). Не существует единого унифицированного неразрушающего метода определения прочности сцепления антифрикционного слоя со стальной основой.

В период ремонта судна после снятия рабочих нагрузок в процессе дефектации подшипников скольжения предлагается применять метод магнитной памяти металла (МПМ). В процессе эксплуатации под воздействием рабочих нагрузок формируется структура сплава корпуса подшипника.

После их снятия она не изменяется и характеризуется магнитодислокационным гистерезисом. Естественная намагниченность сплава формируется в результате воздействия магнитного поля Земли, а также может изменяться при регулярном влиянии электромагнитных полей оборудования, входящего в конструкцию (структурно-технологическая наследственность). Для оборудования, находящегося в эксплуатации, магнитная память проявляется в необратимом изменении намагниченности металла в направлении действия максимальных напряжений от рабочих

нагрузок, т. е. в зоне повышенной концентрации напряжения происходит инверсия – скачкообразное изменение магнитного поля  $H_p$ . Это место и является зоной концентрации напряжений (ЗКН) [1]. Принцип метода технической диагностики – магнитной памяти металла (МПМ), применяемый в металлических конструкциях, основан на взаимосвязи дислокационных процессов с физикой магнитных явлений. Методика основана на измерении магнитного поля рассеяния  $H_p$ , характеризующего распределение остаточной намагниченности в корпусе подшипника. Измерение поля  $H_p$  может производиться через слой антифрикционного сплава толщиной до 20 мм. Участок с потенциально неплотным прилеганием антифрикционного слоя определяется по максимальной концентрации остаточных напряжений (зона КН). Для количественной оценки уровня концентрации остаточных напряжений определяют коэффициент интенсивности  $K_{ин}$  изменения магнитного поля  $H_p$  по формуле:

$$K_{ин} = |\Delta H_p| / L_x,$$

где  $\Delta H_p$  – разность поля  $H_p$  между двумя точками контроля,  $L_x$  – расстояние между точками контроля (ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009). Зоны максимальной концентрации остаточных напряжений соответствуют максимальному градиенту нормальной или тангенциальной составляющей поля  $H_p$ . Результаты контроля записывают в блок памяти прибора и затем, используя соответствующее программное обеспечение, определяют ЗКН с максимальным значением  $K_{ин}^{max}$  и считают среднее значение  $K_{ин}^{cp}$  для всех зон КН, выявленных на объекте контроля. После определения  $K_{ин}^{max}$  и  $K_{ин}^{cp}$  для всех зон, выявленных при контроле, выделяют две-три ЗКН с самыми большими значениями и вычисляют магнитный показатель деформационной способности  $m$  по формуле:

$$m = K_{ин}^{max} / K_{ин}^{cp}.$$

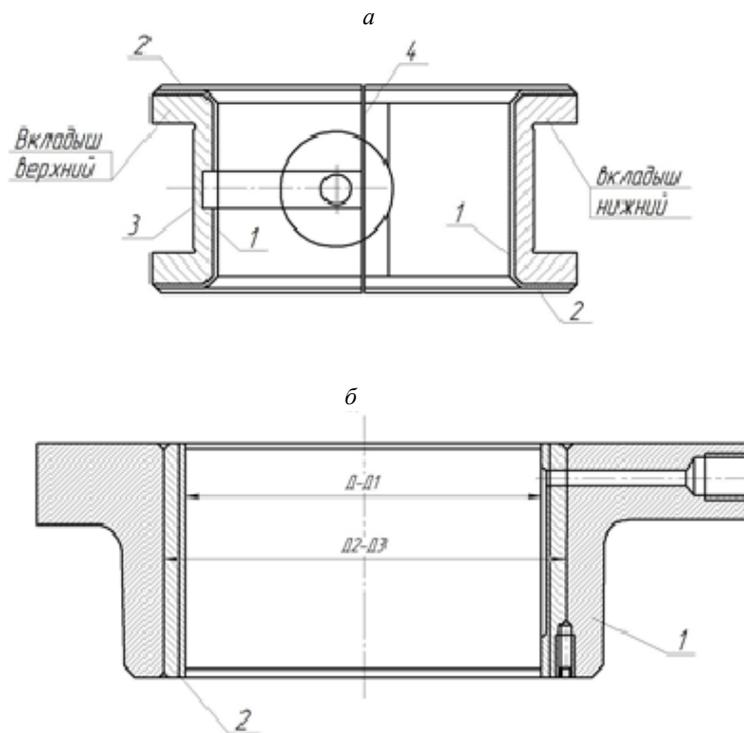


Рис. 1. Конструкции: а – вкладыша упорного подшипника (1, 2 – антифрикционный слой, 3 – корпус подшипника); б – подшипника опорного концевое (1 – корпус подшипника, 2 – антифрикционный слой)

Отношение  $m$  рассчитывают отдельно для градиентов нормальной и тангенциальной составляющих поля. Если  $m$  превышает предельное значение  $m_{пр}$ , то делают вывод о предельном состоянии металла, предшествующем повреждению [2]. Методику целесообразно использовать в сочетании с ультразвуковой дефектоскопией. Первоначально с помощью специализированных магнитометров (ИКНМ-2ФПМ или типа ИКН) определяются зоны максимальной концентрации

напряжений. Затем путем сканирования вдоль линий КН датчиком ультразвукового прибора (например, толщиномером) определяется зона неплотного прилегания специального сплава на основе олова и свинца. На рис. 2 показан пример расположения линий КН, выявленных через слой сплава: Sn – 10%, Cu – 2,5–3%, Pb – остальное.

По результатам контроля каждой зоны выявляются зоны максимальной концентрации напряжений, которые характеризуются максимальным градиентом величины  $|\Delta H_p|$  по длине контролируемого участка  $L_K$  (рис. 3).

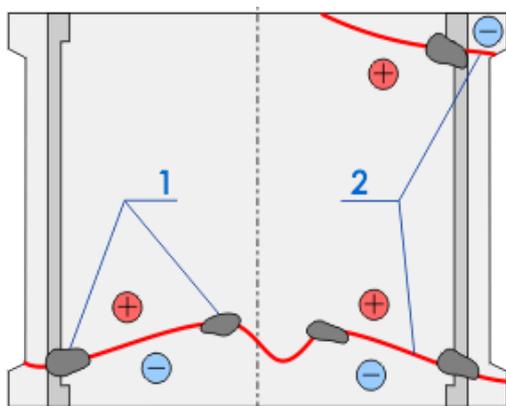


Рис. 2. Расположение линий КН, выявленных через слой специального сплава Sn 10%, Cu 2,5–3%, Pb – остальное, толщиной 10 мм на вкладыше подшипника упорного:  
1 – места неплотного прилегания, 2 – линии КН

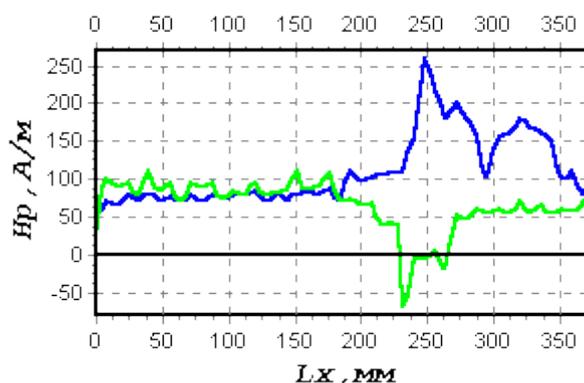


Рис. 3. Результаты контроля участка вкладыша подшипника в зоне неплотного прилегания

После выполнения контроля всех участков производится контроль в зонах концентрации напряжений на предмет выявления в них возможных дефектов методом УЗД.

Анализ напряженно-деформированного состояния проводится по результатам построенных эпюр распределения величины  $H_p$ . Места совпадения зон концентрации напряжений с концентрацией напряжений от рабочих нагрузок будут наиболее опасным для развития повреждения.

Метод магнитной памяти металла применительно к диагностике элементов и конструкций судового оборудования, основанный на считывании информации с помощью специализированных приборов, оценивает фактическое напряженно-деформированное состояние оборудования и выявляет на раннем этапе зоны максимальной поврежденности металла, является перспективным методом неразрушающего контроля, применяемым в судоремонте. Этот метод позволит прогнозировать надежность и ресурс оборудования, своевременно выполнить ремонт или замену отдельных элементов механизмов и конструкций и продлить ресурс объекта контроля как минимум до очередного капитального ремонта или обследования.

## Литература

1. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. – М.: ЗАО «ТИССО», 2004. – С. 256–312.
2. РД 102-008-2002 Инструкция по диагностике технического состояния трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом.

УДК 624.014

**С.А. Фоменко, А.В. Танасогло, А.С. Бубнов, Д.Н. Попов, Д.А. Цуканов**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
Макеевка, 286123  
e-mail: s.a.fomenko@donnasa.ru*

### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В данной работе представлена методика проведения вибрационных испытаний ферменных конструкций при помощи вибрационного метода на основе способа вариации масс. Это важно при проведении технической диагностики конструкций неразрушающим методом, т. к. возможно экспериментально определить действующие усилия в стержневых элементах ферменных конструкций.

**Ключевые слова:** вибрационный метод, способ вариации масс, методика испытаний, стержневые элементы.

**S.A. Fomenko, A.V. Tanasoglo, A.S. Bubnov, D.N. Popov, D.A. Tsukanov**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Makeyevka, 286123  
e-mail: s.a.fomenko@donnasa.ru*

### **THE METHODS OF VIBRATION TESTING OF THE TRUSS STRUCTURES**

This paper presents a method for conducting vibration tests of the truss structures using a vibration method based on the method of mass variation. This is important when conducting technical diagnostics of structures by non-destructive method, because it is possible to experimentally determine the acting forces in the rod elements of the truss structures.

**Key words:** vibration method, method of mass variation, test procedure, rod elements.

Идея применения зависимости частоты собственных колебаний элемента от усилия в нем ( $\omega = f(\sigma)$ ) возникла давно. Ранее, когда раскосы мостовых ферм выполнялись одинакового сечения, а расчет производился по приближенным методикам, Журавским был поставлен следующий эксперимент: модель мостовой фермы, выполненной из проволоки, загружалась нагрузкой, и, проводя смычком от скрипки по раскосам фермы, можно было отчетливо зафиксировать, что тяжи (растянутые раскосы) на краях фермы имеют более высокий тон звучания, нежели тяжи, расположенные в середине. Этот факт позволил сделать вывод о различном напряженном состоянии раскосов в середине и концевых частях ферм.

Другим использованием зависимости  $\omega = f(\sigma)$  является так называемый эффект колокола, который заключается в том, что звук, издаваемый стальной деталью, содержащей дефект, более низкий и глухой по сравнению с бездефектной. Широко известным примером применения этого метода является проверка простукиванием узлов подшипников колес железнодорожных вагонов.

Задача применения зависимости  $\omega = f(\sigma)$  для диагностики строительных конструкций решалась в 70-х годах учеными Ленинградского отделения Центрального научно-исследовательского института строительных металлических конструкций (ЛОЦНИИПСК) [1]. Таким образом, возникает необходимость детального описания методики проведения вибрационных испытаний эксплуатируемых стальных стержневых конструкций при помощи вибрационного метода на основе способа вариации масс [2].

Этот метод представляет собой мощный аппарат экспериментального определения действующих усилий в стержневых элементах ферменных конструкций неразрушающим способом, что обуславливает возможность его применения при проведении технической диагностики.

Для практического использования вибрационного метода рекомендуется придерживаться ниже-следующей последовательности операций.

1. *Определение количества элементов для испытаний.* В большинстве случаев достаточно иметь информацию об усилиях в некотором ограниченном количестве элементов, чтобы по ним судить о конструкции в целом. Поэтому при назначении элементов, подлежащих испытаниям, необходимо проанализировать особенности статической схемы всей конструкции, что позволит значительно сократить объем работ. Так, например, для случая плоской 2-опорной фермы количество элементов, необходимых для анализа – 2–3. Менее двух элементов при анализе ферменной конструкции применять не рекомендуется, поскольку в этом случае отсутствует возможность анализа статической адекватности работы конструкции. Для оценки уровня действующей на конструкцию нагрузки рекомендуется принимать не менее четырех стержней. Испытание одного элемента может быть оправдано случаем определения усилий в одиночном стержневом элементе усиления (например, подкосе), где анализ общей статической схемы расчетными методами затруднен.

2. *Определение элементов, подлежащих испытаниям.* Критерии выбора элементов, подлежащих испытаниям, имеют теоретический и практический характер.

Теоретические аспекты выбора изложены в [2] и представляют собой следующие условия:

- напряжения в стержне не должны превышать предела пропорциональности для данного вида материала стержня:  $\sigma \leq \sigma_{\text{пц}}$ ; также применение вибрационного метода для стержней с невысоким уровнем напряжений  $\sigma < 50$  МПа сопряжено с высокой относительной погрешностью полученных результатов;

- гибкость стержня по возможности должна быть как можно большей, рекомендуется не менее 70; испытание стержней гибкостью менее 50 не рекомендуется;

- безразмерные коэффициенты относительной линейной податливости любой из опор динамической модели стержня должны быть не менее 500 ( $S_{\text{дин}} \geq 500$ ). Проверке этого условия в первую очередь подлежат поясные элементы средней части ферм пролетом свыше 18 м (для элементов решетки ферм приведенное условие, как правило, выполняется);

- вид, количество и величина дефектов и повреждений выбранного стержня не должны превышать предельно допустимых: выгиб в плоскости фермы не более  $f \leq \frac{L}{7\lambda + 12}$ , выгиб из

плоскости фермы  $f_u \leq \frac{L}{50}$  и ослабление сечения не более  $\frac{EI_{\text{netto}}}{EI} \geq 0,65$  при суммарной длине ос-

лаблений не более  $\Delta \leq \frac{L}{100}$  ( $L$  – эффективная длина стержня (некоторая часть фактической длины элемента, амплитудами фибровых деформаций которой пренебречь нельзя);  $EI_{\text{netto}}$  – изгибная жесткость ослабленного сечения стержня фермы;  $EI$  – изгибная жесткость стержня фермы;  $\lambda$  – гибкость стержня фермы).

Практические аспекты выбора стержней для испытаний следующие:

- к средней части стержня должен быть доступ для установки на стержень пьезоэлектрических датчиков и закрепления на элементе сосредоточенной массы;

- условия эксплуатации должны позволять приложение к испытываемому элементу ударного воздействия в плоскости фермы.

Очевидно, что теоретические и практические критерии выбора испытываемого элемента требуют предварительных расчетов и освидетельствования элемента. Таким образом, по результатам предварительных расчетов назначаются возможные варианты испытываемых элементов, которые окончательно утверждаются при натурном освидетельствовании.

3. *Натурное освидетельствование элементов, подлежащих испытанию.* Натурное освидетельствование выполняется с целью проверки необходимых критериев для выбранных элементов. Производится измерение стрелы выгиба элемента в плоскости и из плоскости. В случае несовершенств сечения в виде ослаблений производятся замеры их параметров. По полученным величинам окончательно принимается решение об использовании элемента для испытаний.

4. *Обмеры элементов.* Для элементов, подлежащих испытаниям, производятся тщательные обмеры поперечного сечения в 2–3 местах по длине. При этом точность замеров следует принимать не более 0,05 мм, что несложно осуществить в натуре при помощи штангенциркуля. Окончательные размеры определяются как среднее из проделанных измерений. Также измеряется длина элемента «в свету»  $L_0$  между крайними точками крепления стержня в узлах (центрами

крайних болтов, краями сварных швов и пр.) и осевое расстояние  $L$ . Измерения  $L_0$  производятся с точностью до 1 мм,  $L$  – до 5 мм. Помимо испытываемого элемента производится контроль поперечных сечений примыкающих элементов. В этом случае точность измерений не важна, поскольку характеристики сечений для этих элементов впоследствии определяются по соответствующим ГОСТам.

5. *Разметка элемента и установка датчика.* Для закрепления сосредоточенной массы на элементе определяется его середина как середина отрезка между ближайшими точками внешних закреплений элемента. Середина элемента определяется с точностью  $\pm 1$  мм и помечается на элементе специальным строительным маркером либо тонкой полоской мела. От середины откладываются в обе стороны еще два расстояния:  $a = (0,15-0,3)L$ , исходя из удобств закрепления сосредоточенной массы. Расстояние  $a$  рекомендуется принимать как  $a \approx 0,25L_0$ . Отложенные отрезки также замеряются с точностью  $\pm 1$  мм и помечаются на элементе. Установку датчика следует производить в сечении, приближенном к середине элемента. Крепление датчика осуществляется в соответствии с паспортными рекомендациями при помощи клея, воска, магнита и пр. Подготовка поверхности при этом также оговорена в паспорте датчика. Примененные при испытаниях пьезоэлектрические датчики устанавливаются на клей с временем кристаллизации 1–2 мин. При этом особая зачистка поверхности металла не требуется: поверхность должна быть сухой, очищенной от грязи, пыли и от поверхностной коррозии. Удаление всех следов коррозии необязательно, шероховатость поверхности должна быть не более 100–200 мкм.

6. *Настройка виброизмерительной аппаратуры.* Настройка аппаратуры производится путем регистрации шума – процесса отсутствия колебаний и непосредственно процесса колебаний. В случае получения уровня шума, превосходящего в несколько раз уровень шума в лабораторных условиях, следует определить причину и устранить ее. Причинами могут являться отсутствие заземления, нарушения кабеля связи датчика с АЦП, некачественная электроэнергия и пр.

7. *Возбуждение колебаний и запись виброграммы собственных колебаний стержня без сосредоточенной массы.* Возбуждение колебаний рекомендуется приводить ударным способом при помощи специального резинового молотка. При записи одной виброграммы рекомендуется 20–25 ударов с промежутком времени, равным затуханию процесса собственных колебаний при ударе. Угол направления удара в идеале должен совпадать с плоскостью фермы (одной из главных центральных осей инерции сечения элемента). Отклонение угла направления удара возможно в диапазоне  $\pm 15^\circ$ . Записанная виброграмма сохраняется для последующей камеральной обработки.

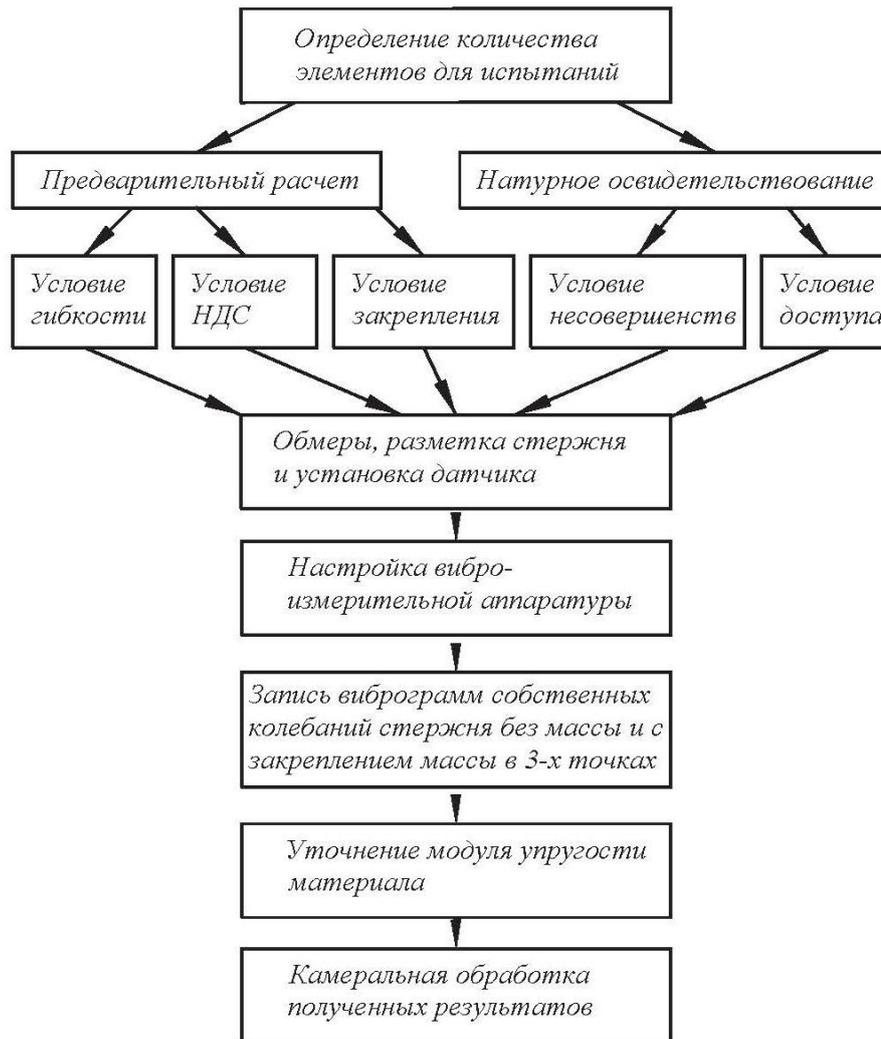
8. *Закрепление на стержне сосредоточенной массы последовательно в трех положениях и запись виброграммы собственных колебаний.* В соответствии со способом вариации масс на стержне размещается сосредоточенная масса  $M = (0,1-0,3)ml$ , где  $ml$  – масса испытываемого элемента. Набор масс подготавливается заранее, при этом рекомендуется использовать тарированный набор масс. Точность закрепленной на стержне массы фиксируется с точностью  $\pm 5$  граммов и не более 0,001  $M$ . Закрепление массы на стержне производится при помощи специальных шпилек и стяжных болтов так, чтобы центр тяжести закрепленной массы совпадал с представленной на стержне засечкой.

Аналогично указаниям п. 7 производится возбуждение колебаний элемента с сосредоточенной массой и запись виброграммы.

9. *Уточнение модуля упругости материала, из которого изготовлены испытываемые элементы.* Уточнение модуля упругости зачастую основывается на изучении проектной документации, в которой указаны марки сталей для испытываемых элементов, актов приемки сооружения и пр. В случае проведения химического или механического анализа стали в процессе диагностики используется эта информация. В последнем случае вероятная погрешность вибрационного метода уменьшается.

10. *Камеральная обработка полученных результатов.* Записанные виброграммы анализируются в соответствии с методикой, представленной в [2]. Полученные частоты используются для определения действующих усилий в испытываемых элементах на основе способа вариации масс.

Приведенная на рисунке последовательность операций может быть представлена в виде сокращенной структурно-логической схемы.



*Структурно-логическая схема последовательности действий при практическом использовании вибрационного метода с использованием способа вариации масс*

Из вышеизложенного сделаны следующие выводы:

1. Полученные усилия на основе приведенной методики в процессе технической диагностики могут использоваться как для количественной оценки НДС испытанных элементов, так и для качественной оценки распределения усилий в конструкции.

2. Количественная оценка усилия особенно важна для случая элементов усиления, установленных в процессе эксплуатации конструкции. Как правило, условия, при которых выполнялось усиление (температура, нагрузки постоянные и эксплуатационные и пр.), и мероприятия по вводу таких элементов «в работу» конструкции при проведении обследования и технической диагностики неизвестны.

3. Качественная оценка, основанная на зависимости усилий друг от друга в статической расчетной схеме конструкции [3], позволяет сделать вывод об адекватности распределения усилий в реальной конструкции с расчетной схемой. Подобный вывод очень важен, поскольку большинство узлов (иногда целых элементов) в процессе эксплуатации закрыты и освидетельствованию не подлежат.

4. При выполнении условия адекватности существует возможность оценить уровень действующих на момент обследования нагрузок на конструкцию. Применяя известные методы дисперсионного анализа, например, на основе  $F$ -критерия Фишера [4], можно получить количественную оценку адекватности. Уровень же действующей нагрузки в случае адекватной расчетной схемы будет представлен средним расчетным значением нагрузки. Подобная схема уточнения нагрузок в несколько ином варианте используется при диагностике мостов [5].

### Литература

1. *Лурье Ф.М., Файнберг И.И.* Применение вибрационного метода при обследовании металлических конструкций. – Ленинград: ЛДНТП, 1975. – 26 с.
2. *Денисов Е.В.* Определение параметров напряженного состояния элементов эксплуатируемых металлических ферменных конструкций усовершенствованным вибрационным методом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01: (защита 12.10.2006). – Макеевка: ДонНАСА, 2006. – 226 с.: ил. – Библиогр.: с. 151–173.
3. *Тимошенко С.П., Янг Д. Х., Уивер У.* Колебания в инженерном деле. – Машиностроение, 1985. – 472 с.
4. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие. для вузов. – Изд. 4-е, доп. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.
5. *Редченко В.П.* Контроль постоянной нагрузки пролетных строений с металлическими главными балками // Металлические конструкции. – Макеевка: ДонГАСА, 2003. – Т. 6, № 1. – С. 65–68.

УДК 001.89:[620.19:629.5.023]

**Д.П. Ястребов<sup>1</sup>, К.И. Ершова<sup>2</sup>, А.С. Летунов<sup>1</sup>, Д.Е. Дуров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, 190005  
e-mail: restart1101@mail.ru

## **О РЕЗУЛЬТАТАХ ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДАХ КАМЧАТСКОГО КРАЯ**

Рыбохозяйственный комплекс – главная отрасль Камчатского края. С целью развития данного комплекса на мореходном факультете КамчатГТУ организована молодежная научная школа «Энергетические установки, электрооборудование и средства автоматики» под научным руководством профессора В.А. Швецова. Молодые исследователи КамчатГТУ принимают участие в приемо-сдаточных испытаниях новых судов, поступающих в рыбохозяйственные организации Камчатского края. Для этого в условиях судоремонта необходимо решить изложенные в данной работе авторами проблемы. Авторы выполнили приемо-сдаточные испытания коррозионной защиты корпуса нового рыбопромыслового судна «Василий Каплюк», поступившего в Рыболовецкий колхоз имени В.И. Ленина в феврале 2021 г., испытания проводили 10.03.2021 г. Они показали, что коррозионная защита корпуса рыбопромышленного судна «Василий Каплюк» соответствует нормативным требованиям и не требует дополнительных ремонтных мероприятий. На основе выполненных исследований авторы считают, что научно-исследовательская работа молодежи мореходного факультета КамчатГТУ способствует развитию рыбохозяйственного комплекса Камчатского края, что, в свою очередь, повышает безопасность мореплавания. Необходимо внедрить на рыбопромысловых судах Камчатского края автоматизированную систему контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов в зимний период времени, снабженную средствами телеметрии для упрощения измерений и увеличения точности результатов контроля.

**Ключевые слова:** приемо-сдаточные испытания судов, потенциал корпуса судна, защита корпуса от коррозии, автоматизированная система, средства телеметрии.

**D.P. Yastrebov<sup>1</sup>, K.I. Ershova<sup>2</sup>, A.S. Letunov<sup>1</sup>, D.E. Durov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003;

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, 190005  
e-mail: restart1101@mail.ru

## **ON THE RESULTS OF THE IMPLEMENTATION OF SCIENTIFIC RESEARCH ON THE FISHING SHIPS OF KAMCHATKA KRAI**

The fishery complex is the main industry of the Kamchatka Territory. With the aim of developing this complex, a youth scientific school “Power plants, electrical equipment and automation equipment” was organized at the nautical faculty of Kamchatka State Technical University under the scientific supervision of Professor V.A. Shvetsov. Young researchers “KamchatGTU” take part in acceptance tests of new vessels arriving in the fishery organizations of the Kamchatka Territory. For this, in the conditions of ship repair, it is necessary to solve the problems outlined in this work by the authors. The authors performed acceptance tests of the corrosion protection of the hull of the new fishing vessel “Vasily Kaplyuk”, which entered the V.I. Lenin in February 2021, tests were carried out on 03.10.2021. Tests have shown that the corrosion protection of the hull of the fishing vessel “Vasily Kaplyuk” meets the regulatory requirements and does not require additional repair measures. On the basis of the research carried out, the authors believe that the research work of the youth of the Kamchatka State Technical University's nautical faculty contributes to the development of the fishery complex of the Kamchatka Territory, which in turn increases the safety of navigation. winter period of time, equipped with telemetry means, to simplify measurements and increase the accuracy of control results.

**Key words:** acceptance tests of ships, potential of the ship's hull, protection of the hull from corrosion, automated system, telemetry means.

Рыбохозяйственный комплекс – главная отрасль Камчатского края. Приоритетным направлением развития рыбохозяйственного комплекса Камчатского края является: «Проведение технической и технологической модернизации рыбоводобывающего и рыбоперерабатывающего производства, способствующей инновационному развитию и привлечению инвестиций в рыбохозяйственный комплекс» [1]. С целью развития данного комплекса на мореходном факультете КамчатГТУ организована молодежная научная школа «Энергетические установки, электрооборудование и средства автоматики» под научным руководством профессора В.А. Швецова. В этой школе царит атмосфера патриотического и экологического воспитания [2]. Это привело к тому, что молодые исследователи рассматривают свою научную деятельность как один из видов добровольческой (волонтерской) деятельности молодежи [3]. Проблема защиты судов и морских сооружений камчатского флота от коррозии является чрезвычайно актуальной, так как интенсивная коррозия корпусов судов приводит к экономическим потерям, измеряемым в миллиардах рублей. К примеру, в 2020 г. потери от разрушения материалов под действием коррозии составляют около 4% ВВП страны. В основном это происходит из-за отсутствия доступных средств и простой методики контроля коррозионной защиты.

Цель статьи – внедрение научных исследований на рыбопромысловых судах до и после судоремонта для развития рыбохозяйственного комплекса Камчатского края, что, в свою очередь, повысит безопасность мореплавания.

### Особенности организации научных исследований на рыбопромысловых судах

Молодые исследователи КамчатГТУ принимают участие в приемо-сдаточных испытаниях новых судов, поступающих в рыбохозяйственные организации Камчатского края [2, 4–6]. Для этого в условиях пандемии необходимо решить следующие проблемы:

- получить доступ на суда;
- создать эффективный комплекс диагностического оборудования для контроля систем защиты от коррозии морских рыбопромысловых судов;
- провести лабораторные испытания комплекса диагностического оборудования.

Предлагаемые научные исследования позволяют осуществлять контроль защищенности корпуса судна от коррозии в процессе эксплуатации, не ставя судно в ДОК, позволяют оценить качества докового ремонта судна, а с помощью автоматизированного метода осуществлять непрерывный контроль, тем самым упростив измерения для операторов и увеличив точность результатов контроля [7].

Авторы выполнили приемосдаточные испытания протекторной защиты корпуса нового рыбопромыслового судна «Василий Каплюк», поступившего в Рыболовецкий колхоз имени В.И. Ленина в феврале 2021 г. Испытания проводили 10.03.2021 г. по методике, изложенной в работах [8–18], в шести контрольных точках с помощью шести электродов (таблица).

### Результаты контрольных измерений коррозионной защиты корпуса судна «Василий Каплюк»

№ контрольной точки	Результаты измерений потенциала корпуса судна, $U_{\text{сред}} =$ , мВ, полученные с помощью электрода					
	№ 1 (ХСЭ)	№ 2 (цинковый электрод № 1)	№ 3 (цинковый электрод № 2)	№ 4 (медный электрод)	№ 5 (графитовый электрод № 1)	№ 6 (графитовый электрод № 2)
Дата	10.03.2021	10.03.2021	10.03.2021	10.03.2021	10.03.2021	10.03.2021
1	880	-15	-18	645	955	954
2	878	-17	-19	643	953	956
3	871	-15	-21	640	953	953
4	875	-16	-19	639	954	952
5	846	-26	-28	627	944	941
6	841	-29	-32	628	941	939

Примечания:

- 1) электрод № 1 – хлорсеребряный электрод сравнения (ХСЭ);
- 2) электрод № 2 – экспериментальный цинковый электрод сравнения, образец № 1;
- 3) электрод № 3 – экспериментальный цинковый электрод сравнения, образец № 2;
- 4) электрод № 4 – экспериментальный медный электрод сравнения;
- 5) электрод № 5 – графитовый электрод, образец № 1 (ДВ-2 № 1);
- 6) электрод № 6 – графитовый медный электрод, образец № 2 (ДВ-2 № 2).

Из результатов исследований, приведенных в таблице, следует, что все использованные в эксперименте электроды сравнения обеспечивают высокую точность результатов контрольных измерений. При этом следует отметить:

- стоимость ХСЭ составляет в рознице в пределах 5 250–5 680 руб.; стоимость экспериментального цинкового электрода сравнения составляет в пределах 545–860 руб.; стоимость экспериментального медного электрода сравнения составляет в пределах 145–250 руб.;
- хранение ХСЭ вызывает затруднения у экипажей судов;
- графитовые электроды не вызывают затруднений при хранении, и стоимость одного электрода составляет около 200 руб., но электроды требуют перед измерениями дополнительной проверки и поправки при отклонении результатов проверки от эталона.

Следует также отметить, что аспиранты и студенты КамчатГТУ, участвовавшие в испытаниях разных электродов сравнения, отдают предпочтение экспериментальному электроду сравнения – медному и цинковым электродам сравнения, т. к. они не вызывают затруднений при хранении и при выполнении измерений.

При выполнении испытаний установили:

- контроль работы протекторной защиты корпусов морских судов в зимний период времени весьма затруднен, что обусловлено обледенением корпуса судна;
- наиболее удобен при выполнении контроля в натуральных условиях графитовый электрод сравнения (ДВ-2) [15, 19], предназначенный для контроля коррозионной защиты судов, при условии выполнения перед натурными измерениями периодических проверок.

Испытания показали, что протекторная защита корпуса судна «Василий Каплюк» соответствует нормативным требованиям [20, 21]. Результаты измерений защитного потенциала корпуса данного судна находятся в интервале значений 841–880 мВ.

По результатам проведенных исследований сделаны выводы:

1. Научно-исследовательская работа молодежи мореходного факультета КамчатГТУ способствует развитию рыбохозяйственного комплекса Камчатского края, что, в свою очередь, повышает безопасность мореплавания.
2. Необходимо внедрить на рыбопромысловых судах Камчатского края автоматизированную систему контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов [7], снабженную средствами телеметрии и удаленным доступом для упрощения измерений и увеличения точности результатов контроля за счет непрерывного контроля.

Авторы выражают благодарность научному руководителю профессору В.А. Швецову за ценные консультации, а также заведующему кафедрой ЭУЭС О.А. Белову и начальнику механико-судовой службы Рыболовецкого колхоза им. В.И. Ленина А.А. Македонскому за организацию испытаний на судне «Василий Каплюк».

### Литература

1. Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ от 12 апреля 2020 г. № 993-р // Собрание законодательства. – 2020. – Ст. 28.
2. *Ястребов Д.П.* О создании студенческих отрядов на судах камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы IX Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2018. – С. 146–148.
3. О молодежной политике в Российской Федерации: Федеральный закон от 30 декабря 2020 г. № 489-ФЗ. Одобрен Советом Федерации 25 декабря 2020. – Ст. 22.
4. *Зобочев Ю.Е., Солинская Э.В.* Защита судов от коррозии и обрастания. – М.: Транспорт, 1984. – 174 с.
5. Контроль систем протекторной защиты стальных судов и кораблей: Монография / *В.А. Швецов, О.А. Белов, П.А. Белозеров, Д.В. Шунькин.* – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2016. – 109 с.
6. *Коробцов И.М.* Техническое обслуживание и ремонт флота. – М.: Транспорт, 1975. – 195 с.
7. Разработка автоматизированной системы контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов / *О.А. Белов, Д.П. Ястребов, А.О. Рогожников, В.А. Швецов, С.А. Зайцев,*

*Б.В. Тарабанов* // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XI Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 82–85.

8. *Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П.* Обоснование оптимальной периодичности контроля работы протекторной защиты стальных корпусов судов // Эксплуатация морского транспорта. – Новороссийск, 2017. – № 1 (82). – С. 41–48.

9. Внедрение усовершенствованного способа контроля систем протекторной защиты стальных корпусов судов камчатского флота / *О.А. Белов, В.А. Швецов, Д.П. Ястребов, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – Вып. 39. – С. 6–11.

10. Обоснование возможности исключения внешнего осмотра систем протекторной защиты стальных корпусов судов / *В.А. Швецов, О.А. Белов, О.А. Белавина, Д.П. Ястребов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, 2017. – Вып. 1. – С. 29–38.

11. Обоснование способа выбора контрольных точек для измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / *П.А. Белозеров, В.А. Швецов, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин, Д.В. Коростылёв, В.А. Пахомов, С.А. Малиновский* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2014. – Вып. 28. – С. 6–11.

12. Влияние квалификации оператора на результаты измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / *В.А. Швецов, П.А. Белозеров, Н.В. Адельшина, О.А. Белавина, О.Е. Петренко, Д.В. Шунькин, В.В. Кириносенко* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2014. – Вып. 30. – С. 46–54.

13. Обоснование выбора необходимого числа параллельных измерений защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов в контрольной точке / *В.А. Швецов, П.А. Белозеров, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин, С.А. Малиновский* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 35. – С. 40–46.

14. Обоснование необходимости подготовки операторов для измерения потенциала стальных корпусов судов и кораблей / *В.А. Швецов, О.А. Белов, П.А. Белозеров, О.А. Белавина, В.В. Кириносенко* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 37. – С. 19–24.

15. О выборе электродов для контроля систем протекторной защиты стальных судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина* // Вестник Астраханского государственного технического университета. – Астрахань, 2019. – Вып. 4. – С. 39–45.

16. О целесообразности использования хлорсеребряных электродов для контроля систем протекторной защиты стального корпуса судна / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 121–124.

17. К вопросу использования стальных пластин для контроля протекторной защиты корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина, С.А. Зайцев* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 125–129.

18. К вопросу использования электродов из судокорпусной стали для контроля защищенности от коррозии корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, Б.В. Тарабанов, С.А. Зайцев* // Вестник Астраханского государственного технического университета. – Астрахань, 2020. – С. 15–21.

19. Пат. 153280 Российская Федерация, U1 МПК G01N 17/02 (2006.01). Устройство для измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / *Швецов В.А., Белозёров П.А., Шунькин Д.В., Диденко А.А., Луценко А.А., Коростылёв Д.В., Белавина О.А.* Заявитель и патентообладатель Камчатский государственный технический университет (RU). – № 2014142289/28; заявл. 20.10.2014. опубл. 10.07.2015, бюл. № 19.

20. ГОСТ 9.056-75. Стальные корпуса кораблей и судов. Общие требования к электрохимической защите при долговременном стояночном режиме. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 12 с.

21. ГОСТ 26501-85. Корпуса морских судов. Общие требования к электрохимической защите. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.

## СЕКЦИЯ 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 371.693.4:629.5.02

**Р.А. Гараев, С.Ю. Труднев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: Yesproinpast@gmail.com*

### РАЗРАБОТКА СУДОВОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ АДАПТАЦИИ ЧЛЕНОВ ЭКИПАЖЕЙ МОРСКИХ СУДОВ

В данной статье рассматривается проблема адаптации членов экипажей к новым кораблям и способы ее решения. Поскольку в данный период времени идет активное переоснащение морского флота Российской Федерации, экипаж переходит от старых морских судов к новым, что зачастую снижает эффективность действий и требует дополнительного времени на адаптацию и освоение. Для этого был разработан метод адаптации с использованием виртуального пространства.

**Ключевые слова:** образование, цифровая модель, судовой тренажер, адаптация экипажа, повышение квалификации.

**R.A. Garaev, S.Y. Trudnev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia  
e-mail: Yesproinpast@gmail.com*

### DEVELOPMENT OF A SHIP TRAINING SIMULATOR FOR ADAPTING MEMBERS OF SEA CREWS

This article discusses the problem of adaptation of crew members to new ships and ways of solving it. Since at this period of time there is an active re-equipment of the Russian Navy, the crew is moving from old sea vessels to new ones, which often reduces the effectiveness of actions and requires additional time for adaptation and development. For this, an adaptation method was developed using virtual space.

**Key words:** education, digital model, ship simulator, crew adaptation, professional development.

В данной статье рассматривается проблема адаптации членов экипажа к новым судам, а также метод ее решения. Создание виртуальной модели корабля позволит заранее, еще до входа на судно посетить его дистанционно, изучить его основные судовые помещения и механизмы, а также их характеристики и особенности. Экипаж будет иметь представление, знать строение судна и расположение основных судовых зон, что значительно скажется на стартовой эффективности и продуктивности всех членов экипажа.

В настоящее время благодаря приказу правительства и стратегии развития гражданского, транспортного и рыболовецкого флота Российской Федерации различные компании, находящиеся в морской отрасли, осуществляют активное проектирование, разработку и закупку новых судов. Стремительно развиваются технологии, и с каждым годом то, что вчера было невозможно либо осуществлялось в немногочисленном количестве, сейчас уже выходит в массовое производство. Меняется концепция кораблей, внутренний порядок и состав машинного, корабельного, котельного и прочих отделений. Сам по себе проект судна может быть не типовым, то есть не соответствовать стандартному представлению экипажа о строении и свойствах. Происходит постоянный рост автоматизации, и повышаются требования к ней, меняется оборудование, его

характеристики, типовые размеры, от этого меняется и сам размер судна. В зависимости от типа судна различаются и типы оборудования, характерные только для него, и именно на это делается основной упор. Поэтому одним из главных параметров как для судна, так и для предприятия, которому это судно принадлежит, остается эффективность работы.

Каждый год разрабатывается все более и более эффективное судно, способное вмещать в себя больше товаров, контейнеров, холодильных установок, содержащее более совершенные энергетические и котельные установки для оптимизации и экономии для поддержания плавучести и маневренности судна. Однако если же с каждым более технологически оснащенным кораблем происходит повышение эффективности, а также увеличение экономической выгоды путем снижения затрат на различные расходные материалы и логистику вследствие установки более продвинутого и технологически оснащенного оборудования, то членам экипажа становится все сложнее и сложнее адаптироваться к такой быстрой смене оборудования и технического обеспечения.

Обучающимся, в первый раз попавшим на судно, крайне сложно адаптироваться к работе, поскольку нет четкого и ясного понятия строения судна и расположения его основных отсеков и механизмов. Но эта проблема касается не только обучающихся, но уже и бывалых моряков. Зачастую от заселения экипажа на судно до полноценного выхода в рейс проходит очень мало времени, и адаптироваться к кораблю, а также запоминать его строение приходится уже непосредственно в открытом море. Экипаж начинает привыкать к новым механизмам и системам уже в условиях рейса, что довольно опасно и может привести к серьезным проблемам, а в ряде случаев и к чрезвычайным ситуациям, которые грозят большими убытками как самому экипажу, так и исполнительной компании.

**Метод адаптации.** В данный момент обучение персонала проходит по морально устаревшим схемам, фотографиям и картинкам, которые не способны в полной мере отразить особенности строения, расположение отсеков и механизмов судна. Данный способ не является универсальным и эффективным, поскольку показывает корабль только в общем виде и с определенного ракурса. Это не позволяет заранее приспособиться к особенностям судна и более быстро и эффективно действовать в стандартных ситуациях, а также в случае чрезвычайной ситуации и во время борьбы за живучесть корабля. Для решения проблемы адаптации членов экипажей к новым судам была создана виртуальная модель судового пространства. Данная модель представляет из себя цепочку 360-градусных панорам с возможностью полного осмотра не только в одной стороне, но и по всей области целиком. Это позволит наглядно прогуляться по судну дистанционно, изучить его составляющие и расположение основных судовых зон, как, например, показано на рис. 1.



Рис. 1. Пример интерфейса

Данная модель не имеет ограничений и может быть создана совершенно по любому судну: будь то рефрижераторное судно, танкер, ролкер или любое другое. Для удобства и расширения возможностей доступа данная среда находится на специально выделенном для нее сервере, на котором проведена дополнительная оптимизация в пользу обычного пользователя, чтобы доступ был возможен практически с любого устройства. Однако предполагается и автономная версия, поскольку подключение к Интернету в некоторых случаях может быть довольно проблематичным.

Основным преимуществом данного метода адаптации является простота навигации и наглядность, поскольку человек будет видеть не отдельные картинки и схемы строения, а все судно целиком с возможностью легкого и удобного перехода между его отделениями, с удобными текстовыми и визуальными подсказками, а также разделением меню на основные корабельные зоны для быстрого перехода от одной зоны к другой.

Текстовые и визуальные подсказки будут включать в себя как общую информацию о судне, так и специализированную о каком-то объекте, будь то двигатель, котел, главный распределительный щит [1–3] и т. д., его более близкие и подробные фотографии, характеристики, особенности строения для более углубленного изучения уже по профессии [2–3]. К примеру, инженеру-электромеханику будет намного важнее знать расположение и назначение устройств именно в машинном отделении, а не на капитанском мостике, именно поэтому подробная информация о каком-либо отделении будет располагаться именно на нем.

Немаловажной возможностью является интеграция различного аудио-, фото- и видеоконтента, что позволит интегрировать напрямую в виртуальную среду различные обучающие и поясняющие материалы.

Также данный проект можно использовать как альтернативу тренажеров, показывающих внутреннее и внешнее строение судов (рис. 2). Преимуществами в данном случае является отсутствие расходов на содержание тренажера. Помимо этого, создание виртуальной модели судна



Рис. 2. Тренажер электростанции

обойдется значительно дешевле полноценной физической модели тренажера и также не требует помещения для размещения. Достаточно будет лишь доступа в Интернет для просмотра и виртуальной прогулки, а при установке непосредственно на устройство, им и вовсе можно будет пользоваться автономно, не имея доступа к Интернету.

Данный метод поможет решить проблему адаптации персонала к новым судам, однако сейчас проект находится на начальной стадии и требует большого количества инвестиций и доработок. Имеется множество раз-

ных вариаций и концепций по решению различных проблем и созданию навигации, которая бы была интуитивна, понятна и доступна людям с различным уровнем пользовательского опыта. На данный момент существуют следующие ошибки: отсутствие доступа с устройств под управлением старых операционных систем, накладка и дублирование интерфейса на устройствах с маленькой диагональю экрана, стабильная работа без непреднамеренных закрытий и перезагрузок.

На данный момент проводятся анализ устройств и определение основного сектора направлений, а также основных ошибок и проблем, которые критическим образом влияют как на саму модель, так и опыт использования. По мере развития модели планируется ее полное портирование на стационарные и мобильные устройства для реализации автономной работы без использования глобальной сети.

## Литература

1. Богомолов В.С. Судовые электроэнергетические системы и их эксплуатация – М.: Мир, 2006. – 321 с.
2. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 г. (ПДМНВ-78) с поправками (консолидированный текст). – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. – 806 с.
3. Учебные тренажеры и симуляторы [Электронный ресурс] // Морской софт. – URL: <https://deckofficer.ru/seasoft/category/trainers>, свободный (дата обращения: 21.11.2021)

УДК 621.3.048.1

**Е.В. Глебова, А.А. Дочкин**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: lena.glebova180397@gmail.com*

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В СУДОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМАХ**

Применение высоковольтных систем на морских судах в значительной мере повышает требования надежности и безопасной эксплуатации судового электрооборудования. Эти требования отражены в ряде международных морских документов, в том числе в стандартах компетенции судового персонала в отношении безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования. Основу безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования обеспечивает изоляция и изолирующие устройства, называемые изоляторами. В статье произведен обзор современных изоляторов высокого напряжения с анализом недостатков и преимуществ основных видов современных изоляторов. Также рассмотрены перспективы применения полимерных изоляторов в судовых условиях.

**Ключевые слова:** высоковольтное оборудование, электрическая изоляция, электрическая прочность, надежность, безопасность.

**E.V. Glebova, A.A. Dochkin**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: lena.glebova180397@gmail.com*

## **ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING POLYMER INSULATORS IN MARINE HIGH-VOLTAGE SYSTEMS**

The use of high-voltage systems on ships significantly increases the requirements for reliability and safe operation of marine electrical equipment. These requirements are reflected in a number of international maritime documents, including the standards of competence of ship personnel in relation to the safe operation of high-voltage equipment. The basis for the safe operation of high-voltage equipment is provided by insulation and insulating devices called insulators. The article provides an overview of modern high-voltage insulators, with an analysis of the disadvantages and advantages of the main types of modern insulators. The prospects of using polymer insulators in ship conditions are also considered.

**Key words:** high-voltage equipment, electrical insulation, electrical strength, reliability, safety.

На современных морских судах все шире применяются мощные электроприводы в системах электродвижения, в подруливающих устройствах, в грузовых комплексах и других механизмах. В связи с этим наблюдается рост энерговооруженности морских судов, и важными критериями при выборе значения питающего напряжения становятся величина падения напряжения и потери в линии. Все это требует рассматривать возможность перспективного перехода к судовым электроэнергетическим высоковольтным системам.

Основу безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования в судовых условиях составляет изоляция токоведущих частей. Обеспечить реализацию данных требований с учетом особенностей судовых корпусных конструкций и особенностей эксплуатации судов представляется достаточно сложной задачей [1–4].

Основу изоляции высоковольтных линий составляют полимеры (пластмасса, биоматериалы, эластомеры и т. д.) [5]. Одним из последних достижений науки стало применение высоковольтных полимерных изоляторов, от которых зависит в том числе и бесперебойная поставка электроэнергии к потребителю. Первые полимерные изоляторы стали использоваться в конце 60-х годов,

состояли они, как правило, из эпоксидных смол. Срок службы таких изоляторов составлял от 5 до 7 лет. Под действием солнечных лучей и высокой температуры эпоксидные изоляторы разрушались и теряли свои свойства [6–9].

В конце 70-х годов был разработан изолятор из полиорганосилоксанов, в состав которого входил каучук, полученный путем его вулканизации. Для улучшения электротехнических свойств в эластичный каучук добавляли активный усиливающий наполнитель, как правило, двуокись кремния. Внешний вид такого полимерного изолятора представлен на рис. 1.

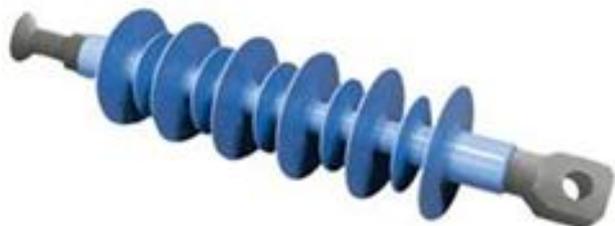


Рис. 1. Внешний вид полимерного изолятора

На сегодняшний день наряду с традиционными стеклянными и фарфоровыми изоляторами в высоковольтных системах все шире применяются конструкции на основе высококачественных полимеров. Развитие полимерных изоляторов проходило поэтапно, в связи с чем различают три основных типа высоковольтных изоляторов:

1. Полимерные изоляторы первого поколения. Изолятор собирается вручную с клееной кремнийорганической оболочкой через проклейку.

2. Полимерные изоляторы второго поколения представляют собой модернизированную конструкцию изолятора первого поколения путем герметизации узла оконцевателя.

3. Полимерные изоляторы третьего поколения представляют собой изолятор с цельнолитой кремнийорганической оболочкой, наносимой под большим давлением. Производятся такие изоляторы по бесшовной технологии, полностью автоматически.

Изоляторы третьего поколения имеют гарантию от производителя не менее пяти лет, а общий срок службы таких изоляторов составляет до 50 лет. Кроме того, данные изоляторы имеют лучшие массогабаритные характеристики, поэтому изоляторы третьего поколения пользуются высоким спросом как в России, так и во всем мире. Процесс изготовления полимерных изоляторов не требует больших помещений и сложного оборудования, поэтому его производство расширяется и качество конструкции постоянно улучшается.

Изолятор в своей основе имеет стеклопластиковый стержень, который заканчивается оконцевателем и покрывается слоем из полимерных материалов определенной толщины. Стеклопластиковый стержень предназначен для обеспечения механической и электрической стойкости изоляционного материала и несет на себе основную механическую нагрузку. Благодаря оконцевателю высоковольтный изолятор фиксируется к опорам или несущим корпусным конструкциям, при этом обеспечивая изоляцию от них токоведущих частей. Полимерный слой защищает стержень высоковольтного изолятора от жестких климатических влияний. Конфигурация поверхности изолятора определяется таким образом, чтобы увеличить его электрическую прочность и снизить вероятность пробоя изолятора при эксплуатации. Свойства полимерных материалов, используемых в серийном производстве, позволяют без особых усилий придать изолятору необходимую форму с высоким качеством поверхности.

Основными материалами, используемыми в производстве полимерных изоляторов, являются разные каучуки, в основном бутадиен-стирольные, кремнийорганические, натуральные, этиленпропиленовые. В качестве вулканизирующей добавки применяется кремний с различными технологиями производства. Так, на основе кислорода получают силоксановый кремний, на основе азота производится боросилоксановый кремний, и на основе углерода изготавливается силкарбонный кремний.

Устройство типового полимерного изолятора представлено на рис. 2.

Основными преимуществами высоковольтных полимерных изоляторов являются:

- механическая прочность;
- устойчивость к загрязнениям и солнечному свету;
- не деформируются при высоких температурах;
- гидрофобность, лиофобность;
- высокая стойкость к перенапряжению.

Вместе с тем следует отметить недостатки данных устройств, особенно связанные с эксплуатацией в морских условиях [10–12]:

- активизация процессов старения при воздействии ультрафиолета;
- при старении уменьшается механическая и электрическая прочность;
- пожароопасность;
- подверженность грибковому загрязнению;
- невозможность монтажа и ремонта под напряжением.

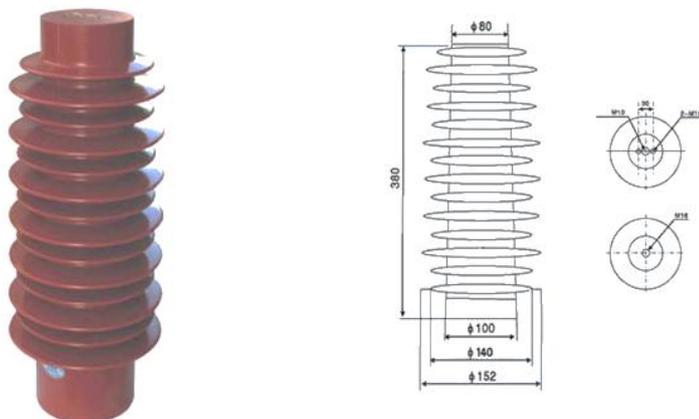


Рис. 2. Устройство типового полимерного изолятора

Поэтому следует тщательно изучать и анализировать опыт эксплуатации полимерных изоляторов, в том числе за рубежом. Наиболее широкий опыт в эксплуатации данных элементов наблюдается в Северной Америке. В частности, на территории США 25% всех установленных изоляторов относятся к полимерным системам третьего поколения. В Китае широкое применение нашли изоляторы на основе силикона, так как они более устойчивы к солнечному свету. Из-за высокой солнечной активности и влажности в Италии было внедрено несколько типов изоляторов. В Египте, Австралии и Индии используются изоляторы с бустерной юбкой. В странах Азии, Африки и Латинской Америки испытывается трудность в использовании традиционных изоляторов, как, например, в России, поэтому там распространены изоляторы третьего поколения, так как мировое производство их находится именно там. Также в этих странах выполнено большое количество исследования и публикаций по данной тематике.

За последние 20 лет полимерные изоляторы стали производиться технологически более качественными. Производство и внедрение именно полимерных изоляторов имеет высокий экономический эффект. В первое время использование полимерных изоляторов было дороже, чем стеклянных или фарфоровых, и экономия складывалась за счет монтажных и транспортных расходов при эксплуатации. Сегодня же, благодаря увеличению темпов производства и объема продаж, стоимость полимерных изоляторов стала гораздо ниже традиционных. Наиболее выгодным и дешевым стало производство изоляторов напряжением выше 220 кВ.

Высоковольтные изоляторы из полимера имеют большие перспективы на российском рынке. По предварительным прогнозам, рынок освоения таких изоляторов к 2025 г. вырастет на пять процентов. Единственным спорным недостатком данных изоляторов остается фактор старения. Высоковольтные изоляторы из полимера в необозримом будущем полностью заменят стеклянные изоляторы, так как они наиболее экологичны, дешевле, качественнее, энергоэффективнее и удобнее в монтаже.

Таким образом, применение изоляторов из полимеров будет расширяться, в том числе при доработке конструкции и локализации отдельных недостатков возможно их использование в судовых высоковольтных системах [13–15].

Несмотря на то что низковольтное судовое оборудование дешевле, проще в монтаже и эксплуатации, не требует такого высокого уровня квалификации от персонала, повышение номинального напряжения судовых сетей неизбежно. Однако следует учесть все особенности эксплуатации высоковольтных сетей в судовых условиях, в первую очередь связанные с безопасностью эксплуатации.

Поэтому исследования в области совершенствования высоковольтной изоляции остаются актуальными и требуют не только изучения свойств новых изоляционных материалов, но и анализа опыта эксплуатации используемых полимерных изоляторов [16].

## Литература

1. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 80–83.
2. Белов О.А. Общий алгоритм развития опасных ситуаций в судовых условиях // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 51–54.
3. Белов О.А., Парфенкин А.И. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2016. – № 35. – С. 11–14.
4. Белов О.А. Процесс формирования постепенного отказа в технических системах // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Шестой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2015. – С. 44–49.
5. ГОСТ 28856-90 Изоляторы линейные стержневые полимерные. Технические требования. Методы испытаний.
6. Гутман И.Ю., Кравченко В.А., Соломоник Е.А. Исследования и опыт эксплуатации подвесных полимерных изоляторов // Электрические станции. – 1995. – № 12. – С. 56–64.
7. Белов О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 96–102.
8. Белов О.А., Богославский И.С., Преданцев Э.А. Оптимизация элементной базы системы автоматизации золотоизвлекающей фабрики ЗАО «Тревожное зарево» // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Седьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – С. 112–114.
9. Кротенко Д.С., Белов О.А. Моделирование процессов оптимизации режимов судовой электроэнергетической системы при электропитании от береговой сети // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 77–80.
10. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 5–9.
11. Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6–19.
12. Сивоконь В.П., Латишов Д.В., Белов О.А. Диагностические признаки нестандартного проявления нелинейности в электрических сетях // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2019. – № 48. – С. 18–27.
13. Пантина А.И., Белов О.А. Перспективы методики инфракрасной диагностики силовых трансформаторов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 102–104.
14. Пантина А.И., Белов О.А. Контроль технического состояния судовых асинхронных двигателей на основе характеристик внешнего электромагнитного поля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 32–36.
15. Белов О.А., Мясников Г.С. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 73–76.
16. Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.

УДК 621.313.2

**Ю.А. Кузьмина, С.Ю. Труднев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: 89638321247kuz@gmail.com*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ХОЛОСТОМ ХОДУ**

Материал посвящен исследованию работы двигателя постоянного тока. Представлено математическое описание работы двигателя постоянного тока, согласно которой на основе преобразований Лапласа собрано передаточное звено. На основе звена построена компьютерная модель двигателя постоянного тока, построены и проанализированы зависимости входного напряжения и частоты вращения двигателя постоянного тока. Доказана целесообразность модели.

**Ключевые слова:** двигатель, напряжение, частота вращения, модель.

**Yu.A. Kuzmina, S.Yu. Trudnev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: 89638321247kuz@gmail.com*

### **INVESTIGATION OF THE OPERATION OF A DC MOTOR AT IDLE**

The material is devoted to the study of the operation of a DC motor. A mathematical description of the operation of a DC motor is presented, according to which a transmission link is assembled on the basis of Laplace transformations. Based on the link, a computer model of a DC motor is constructed, the dependences of the input voltage and the frequency of rotation of the DC motor are constructed and analyzed. The expediency of the model is proved.

**Key words:** engine, voltage, speed, model.

Двигатели постоянного тока нашли широкое применение в автономных системах питания, а также в устройствах электроинструментов.

По способу создания магнитного потока различают электродвигатели с постоянными магнитами и электромагнитами.

Электродвигатели с постоянными магнитами в силу относительно слабого магнитного потока изготовляют только небольшой мощности. Их используют в системах управления в качестве серводвигателей.

Для привода рабочих машин применяются двигатели с электромагнитами, которые по способу включения обмоток, называемых обмотками возбуждения, подразделяются на двигатели с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Широкий диапазон применения электродвигателей совершенно в разных системах создает небольшие трудности при испытаниях таких систем на натуральных макетах, однако моделирование электрических машин позволят решить данную проблему, так как все недостатки можно устранить на этапах моделирования электропривода постоянного тока.

Одним из анализов работы машины постоянного тока является анализ механической характеристики. Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость частоты вращения от вращающего момента на его валу при неизменной схеме включения и постоянных параметрах питающей сети и элементов цепей якоря и возбуждения.

Аналитическое выражение механической характеристики двигателя может быть получено из соотношений, приведенных в курсе общей электротехники.

Двигатель постоянного тока работает по закону Фарадея:

$$E = K\Phi\omega.$$

С другой стороны, по закону Кирхгофа

$$U_B = i_B R_B + (L_B di_B) / dt; \tag{1}$$

$$U_A = i_A R_A + (L_A di_A) / dt; \tag{2}$$

$$M = K\Phi i_A. \tag{3}$$

Имеем два дифференциальных уравнения, решение которых проще всего найти через моделирование передаточной функции в Matlab. На основании уравнений (1–3) составляем передаточное звено и структурную схему работы двигателя постоянного тока (рис. 1).

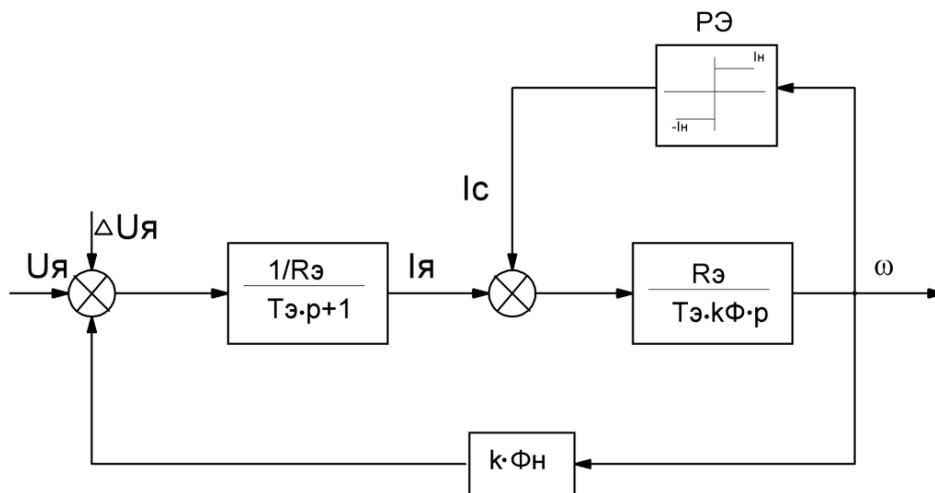


Рис. 1. Структурная схема двигателя постоянного тока

Для построения характеристик зависимости входного и выходного сигнала ( $U$  от  $\omega$ ) воспользуемся программой Matlab.

На рис. 2 изображена модель работы двигателя постоянного тока, можно проанализировать механическую характеристику двигателя постоянного тока.

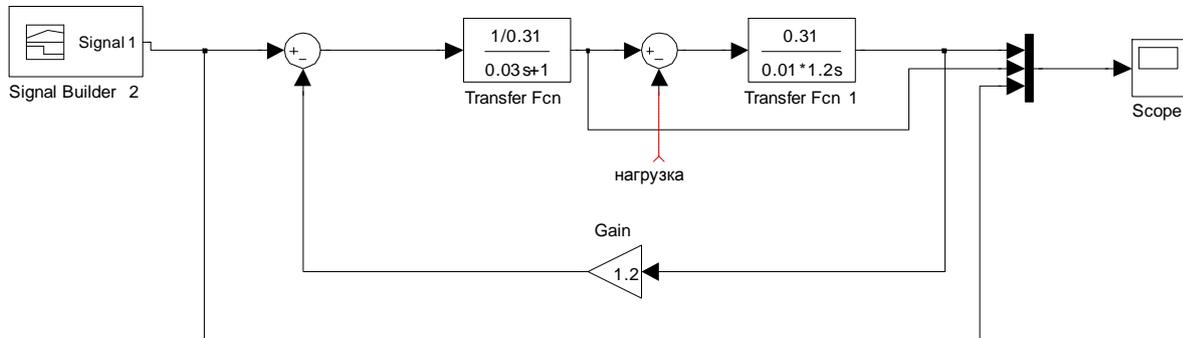


Рис. 2. Компьютерная модель работы двигателя постоянного тока

Как видно на рис. 2, компьютерная модель двигателя постоянного тока работает на холостом ходу. При запуске модели были получены результаты, представленные на рис. 3.

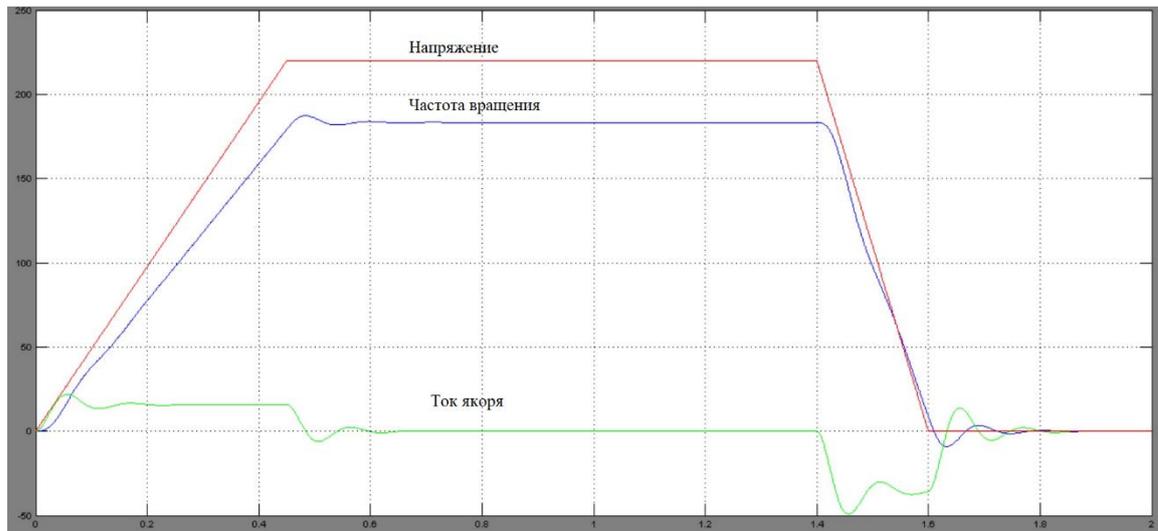


Рис. 3. Результаты моделирования

Имитационное моделирование было разделено на три временных промежутка. В первый промежуток времени (от 0 с до 0,45 с) напряжение на входе двигателя повышалось, затем во втором промежутке времени (от 0,45 с до 1,4 с) напряжение на входе оставалось постоянным, и на третьем участке напряжение начало снижаться. Как показывают результаты имитационного моделирования (на рис. 3), частота вращения двигателя изменялась пропорционально напряжению, что подтверждает закон регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока, а значит – адекватность компьютерной модели.

Процесс имитационного регулирования в программе Matlab путем создания моделей передаточных звеньев, полученных через преобразования Лапласа, позволяет значительно упростить схему моделирования. Применение звеньев в системах электропривода позволит получить полное представление о выходных характеристиках двигателя постоянного тока.

### Литература

1. *Важнов А.И.* Электрические машины. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 362 с.
2. *Абакумов А.М., Тулупов П.В., Чабанов Ю.А.* Электрический привод. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока: Учеб. пособ. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010 – 123 с.
3. *Марченко А.А., Онищенко О.А., Труднев С.Ю.* Исследование модели асинхронного двигателя // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. – 2014. – № 29. – С. 17–24.

УДК 621.313:629.5.064.5

**Н.А. Марков, А.А. Марченко**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: marchenko\_alx@inbox.ru*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОЙ МОДЕЛИ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

В данной статье рассмотрен процесс моделирования гребной электрической установки на основе системы генератор – двигатель. Первоначально автором представлена математическая модель одноконтурной гребной электрической установки. Далее путем компьютерного моделирования была создана рабочая модель, параметры которой соответствуют реальной системе. После этого был проведен эксперимент по регулированию частоты вращения модели гребного электродвигателя при изменении исходных параметров системы, а именно тока возбуждения главного генератора. Результаты моделирования подтверждены соответствующими диаграммами, приведенными в статье. На основании эксперимента можно делать выводы о правильном направлении в дальнейшем моделировании таких систем.

**Ключевые слова:** гребной двигатель, электрический ток, механическая мощность, момент, частота сети.

**N.A. Markov, A.A. Marchenko**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: marchenko\_alx@inbox.ru*

### **INVESTIGATION OF THE SINGLE-CIRCUIT MODEL OF ELECTRICAL PROPULSION INSTALLATION**

This article describes the process of modeling the electrical propulsion installation based on the voltage-control system. Initially, the author presents a mathematical model of a single-circuit electric propulsion installation. Further, by computer modeling, a working model was created, the parameters of which correspond to the real system. After that, an experiment was conducted to regulate the speed of the propulsion motor model when changing the initial parameters of the system, namely the excitation current of the main generator. The results of the simulation are confirmed by the corresponding diagrams given in the article. Based on the experiment, it is possible to draw conclusions about the right direction in the further modeling of such systems.

**Key words:** propeller motor, electric current, mechanical power, torque, mains frequency.

Господство в Арктике является на сегодняшний день очень важной задачей для ледокольного флота России. Для этих целей создаются специализированные суда, предназначенные для работы в северных широтах. Отличием электроэнергетической системы таких судов является электродвижение. На таких судах применяется гребная электрическая установка, которая имеет множество преимуществ. Такие установки в первую очередь способны обеспечить плавное регулирование скорости в широких пределах. Развитие полупроводниковой и микропроцессорной техники на сегодняшний день позволяет применять в роли гребных электродвигателей как двигатели постоянного, так и переменного тока. Основное распространение получили системы на постоянном токе. В мощных ледоколах в составе гребной установки использовалась система *генератор – двигатель*. В составе новейших современных систем электродвижения применяются двигатели переменного тока с частотным управлением, но система *генератор – двигатель* сегодня все еще является актуальной [1].

Изменение частоты вращения гребного винта достигается изменением напряжения на его якоре путем изменения напряжения генератора. Реверс электродвигателя может осуществляться при изменении магнитного потока двигателя или направления тока в якоре.

Моделирование электротехнических процессов позволяет более подробно изучать электро-энергетические системы. При имеющейся математической и компьютерной модели возможно введение возмущений в систему и по полученным характеристикам в процессе моделирования данного процесса можно делать выводы об устойчивости представленной системы. Данные условия требуют создание модели гребной электрической установки, рабочие параметры которой не отличаются от реальной.

На первом этапе проводилось моделирование системы *генератор – двигатель*. В процессе моделирования были приняты следующие допущения:

1. Пренебрегается влияние вихревых токов, гистерезиса, изменение коэффициента самоиндукции.
2. Учет механических потерь не производился, а также не учитывались упругие деформации и зазоры в механических соединениях.
3. Зависимость магнитного потока от тока возбуждения была принята линейной.
4. Механическая характеристика гребного винта была принята как квадратичная.
5. Реакция якоря не учитывалась.
6. Магнитный поток электродвигателя не изменялся в процессе работы системы.
7. Магнитный поток электродвигателя был равен номинальному.

Процессы в обмотке возбуждения генератора описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$u_b(t) = i_b(t) \cdot R_b + L_b \cdot di_b(t) / dt, \quad (1)$$

где  $u_b(t)$  – напряжение;

$i_b(t)$  – ток;

$R_b$  – активное сопротивление;

$L_b$  – индуктивность в обмотке возбуждения;

$t$  – время.

Дифференциальное уравнение, описывающее процессы в якорной цепи.

Процессы в якорной цепи описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$e_r t - e_{ГЭД} t = i(t) \cdot R + L \cdot di(t) / dt, \quad (2)$$

$$e_r(t) = k_{в.г} \Phi_r(t) \cdot \omega_r(t) - \text{ЭДС генератора}; \quad (3)$$

$$t = k_{в.ГЭД} \cdot \omega_{ГЭД}(t) - \text{ЭДС}_{ГЭД}, \quad (4)$$

где  $i(t)$  – ток,

$R$  – суммарное активное сопротивление;

$L$  – суммарная индуктивность якорной цепи.

Уравнение движения дизель-генератора:

$$M_{диз}(t) - M_r(t) = J_{диз} \cdot d\omega_r(t) / dt, \quad (5)$$

где  $M_{ГЭД}(t) = k_{мГЭД} \cdot \Phi_{ГЭД}(t) \cdot i(t)$  – момент генератора постоянного тока, (6)

$M_{диз}(t)$  – момент дизеля;

$J_{диз}$  – момент инерции дизель-генератора;

$\omega_r(t)$  – скорость дизель-генератора.

Уравнение движения ГЭД:

$$M_{ГЭД}(t) - M_b(t) = J_{ГЭД} \cdot d\omega_{ГЭД}(t) / dt, \quad (7)$$

где  $M_{ГЭД}(t) = k_{мГЭД} \cdot \Phi_{ГЭД}(t) \cdot i(t)$  – электромагнитный момент электродвигателя; (8)

$M_b(t) = k_b \cdot \omega_{ГЭД}^2(t)$  – момент сопротивления; (9)

$k_b$  – конструктивный коэффициент гребного винта;

$J_{ГЭД}$  – суммарный момент инерции на валу электродвигателя;

$\omega_{ГЭД}(t)$  – скорость электродвигателя.

Далее переписываем уравнения (1), (2), (5), (7) в форме Коши с учетом уравнений (3), (4), (6), (8), (9):

$$\begin{cases} di_{в.г}(t) / dt = (u_{в.г}(t)R_{в} - i_{в.г}(t)) \cdot 1 / T_{в.г}, \\ di_{в.гэд}(t) / dt = (u_{в.гэд}(t)R_{в} - i_{в.гэд}(t)) \cdot 1 / T_{в.гэд}, \\ di(t) / dt = (k_{е.г} \cdot \Phi_{г}(t) \cdot \omega_{г}(t) - k_{е.гэд} \cdot \Phi_{гэд}(t) \cdot \omega_{гэд}(t) \cdot 1 / L_{в} - i(t) \cdot 1 / T, \\ \omega_{г}(t) / dt = M_{диз} t - k_{м.г} \cdot \Phi_{г}(t) \cdot i(t) \cdot 1 / J_{диз}, \\ d\omega_{гэд}(t) / dt = (k_{м.гэд}(t) \cdot \Phi_{гэд}(t) \cdot i(t) - k_{в} \cdot \omega_{гэд}^2(t)) \cdot 1 / J_{гэд}. \end{cases} \quad (10)$$

Приводим параметры ГЭУ относительно их номинальных значений. Для этого каждая переменная умножается и делится на свое номинальное значение. Далее получаем систему уравнений в относительных единицах:

$$\begin{aligned} di_{в.г}(t) / dt &= u_{в.г}(t) \cdot k_1 - i_{в.г}(t) \cdot 1 / T_{в.г}, \\ di_{в.гэд}(t) / dt &= u_{в.гэд}(t) \cdot k_1 - i_{в.гэд}(t) \cdot 1 / T_{в.гэд}, \\ di(t) / dt &= k_2 \cdot i_{в.г}(t) \cdot \omega_{г}(t) - k_3 \cdot i_{в.гэд}(t) \cdot \omega_{гэд}(t) \cdot 1 / L_{в} - i(t) \cdot 1 / T, \\ d\omega_{г}(t) / dt &= k_4 \cdot M_{диз}(t) - k_5 \cdot i_{в.г}(t) \cdot i(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$k_1 = U_{в.н} / (I_{в.н} \cdot R_{в}), \quad (12)$$

$$k_2 = (U_{н} + I_{н} \cdot R) / I_{н}, \quad (13)$$

$$k_3 = (U_{н} - I_{н} \cdot R) / I_{н}, \quad (14)$$

$$k_4 = M_{диз.н} / (\omega_{г.н} \cdot J_{диз}), \quad (15)$$

$$k_5 = M_{г.н} / (\omega_{г.н} \cdot J_{диз}), \quad (16)$$

$$k_6 = M_{гэд.н} / (\omega_{гэд.н} \cdot J_{гэд}), \quad (17)$$

$$k_7 = k_{в} \omega_{гэд.н}^2 / J_{диз}, \quad (18)$$

$$T_{в} = L_{в} / R_{в}; T = L / R \quad (19)$$

– постоянные времени в цепи якоря.

В результате полученная математическая модель была построена в среде Matlab Simulink [2]. Полученная модель представлена на рис. 1.

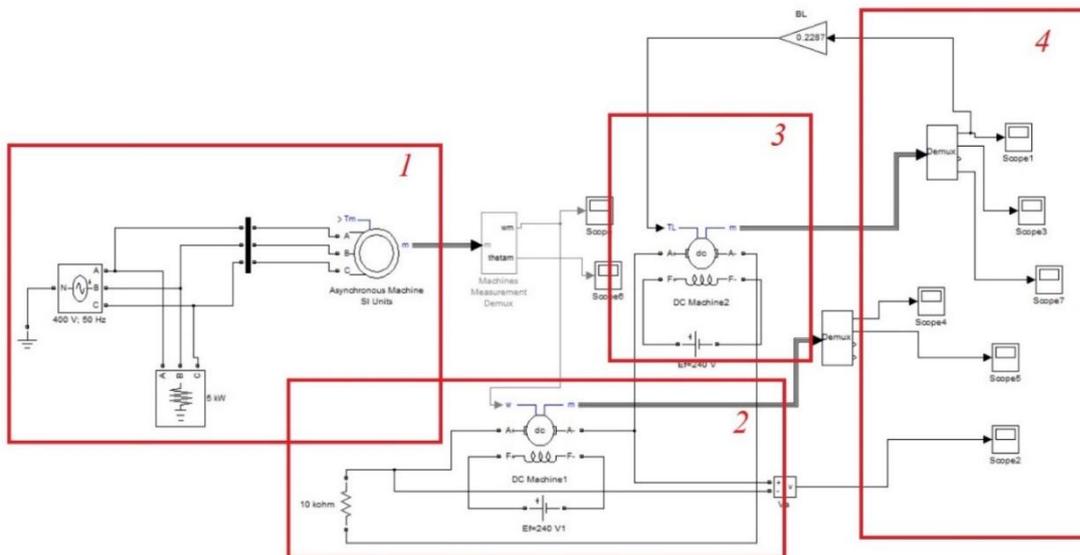


Рис. 1. Компьютерная модель системы

Модель состоит из четырех основных частей. Приводной дизель здесь представлен в виде асинхронного электродвигателя 1. Так как преимуществом гребной электрической установки является неизменная частота работы дизель-генератора, то электродвигатель поддерживает постоянство оборотов путем подключения к неизменному бесконечному источнику напряжения заданной частоты. Генератор постоянного тока 2 механически соединен с электродвигателем. Гребной электродвигатель постоянного тока 3 получает питание от генератора 2. Так как данная модель представляет собой систему *генератор – двигатель*, то изменение тока возбуждения генератора 2 приводит к изменению его напряжения и частоты вращения гребного электродвигателя 3. Полученные диаграммы фиксируются блоком измерений 4. Здесь производится замер напряжения, момента 2; момента, тока, частоты вращения 3.

Для проведения полноценного эксперимента по регулированию частоты вращения гребного электродвигателя в системе *генератор – двигатель* необходимо выполнение нескольких последовательных задач. Первой задачей является настройка модели таким образом, чтобы ее характеристики соответствовали реальной установке. Второй задачей является введение возмущений в систему и фиксация изменения параметров. Третья задача – отследить изменения характеристик системы и сделать соответствующие выводы.

Так как параметры гребной электрической установки не находятся в открытом доступе, то сравнение производилось с каталожными параметрами электродвигателя. После запуска модели электродвигатель 3 вышел на свои номинальные обороты, погрешность в расчете момента и тока моделью составили 12%. Выполнение второй задачи сводится к изменению тока возбуждения генератора 2.

Результаты расчета представлены на рис. 2.

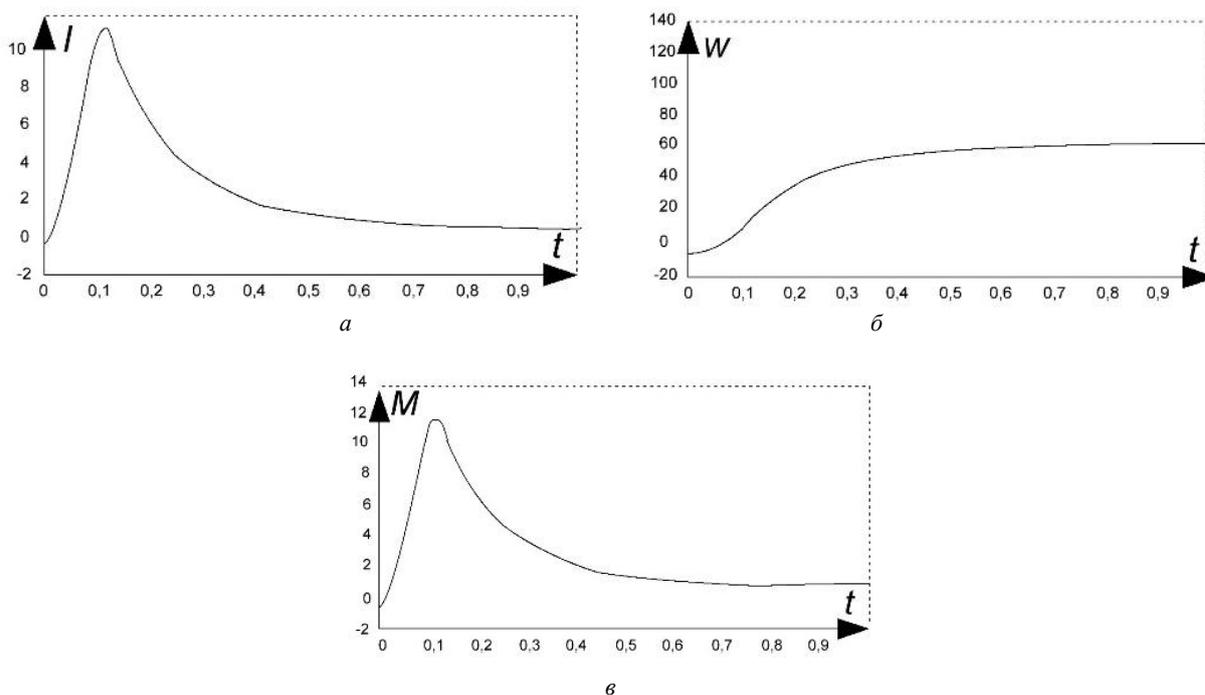


Рис. 2. Результаты эксперимента: а – ток электродвигателя; б – скорость электродвигателя; в – момент электродвигателя

Введение возмущения в систему приводит к возникновению переходных процессов и броску тока как следствие (рис. 2, а). Также происходит резкий скачок момента электродвигателя (рис. 2, б), уменьшение частоты вращения происходит пропорционально снижению тока возбуждения 2 (рис. 2, в) согласно механическим характеристикам электродвигателя. Отклонение составляет 18%.

Для дальнейшего улучшения показателей необходимо провести некоторую корректировку модели. Во-первых, необходимо учитывать изменение тока возбуждения возбудительных агрегатов. В представленной модели возмущение было внесено только в пределах одного контура, так как в пределах эксперимента не проводилось моделирование возбудительных агрегатов.

Эти упрощения планируется убрать при дальнейшем исследовании системы и построения модели ГЭУ на основе нескольких контуров, а также с возможностью последовательного подключения главных генераторов.

Во-вторых, первоначально при расчете математической модели были введены некоторые допущения: пренебрежение влиянием вихревых токов, гистерезиса, изменением коэффициента самоиндукции, пренебрежение механическими потерями, а также потерями в стали напрямую привели к отклонению полученных характеристик от каталожных данных электродвигателя.

В-третьих, построенная модель изначально имела погрешность 12%, далее при введении возмущения эти отклонения только усиливались.

Несмотря на существенные недостатки, данная модель соответствует реальной системе с некоторой погрешностью. Также представленная модель может быть скорректирована на любую мощность электростанции и может имитировать гребные установки различных судов. Нужно отметить, что представленная модель является исходной и в дальнейшем может модернизироваться в многоконтурную схему с различным количеством электрических машин.

### Литература

1. *Акулов Ю.И.* Гребные электрические установки: Учебник. – М.: Транспорт, 1982. – 264 с.
2. *Труднев С.Ю.* Разработка компьютерной модели параллельной работы генераторного агрегата и трехфазного безынерционного источника питания // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2015. – Т. 30, № 2. – С. 191–197.
3. *Труднев С.Ю.* Компьютерное моделирование полупроводниковых преобразователей // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – №. 52. – С. 18–26.
4. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учеб. пособ. – СПб.: КОРОНА Принт, 2001. – С. 233–239.
5. *Марченко А.А., Портнягин Н.Н.* Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя // Современные проблемы науки и образования. – Пенза, 2012. – № 6. – С. 125–125.

УДК 621.313.333

**А.А. Марченко, С.В. Столетов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: marchenko\_alx@inbox.ru*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

В основе динамического нагружения электродвигателей может быть любой динамический режим, при котором электродвигатель работает в номинальном режиме без механической нагрузки. В рамках исследования использовался генераторный режим электродвигателя с возможностью получения номинального тока и момента электрической машины. Для этого была разработана математическая модель электродвигателя. Далее на ее основе была составлена имитационная модель в среде Matlab Simulink и проведены компьютерные эксперименты с определением параметров динамического нагружения.

**Ключевые слова:** электрический ток, механическая мощность, момент, механическая характеристики, частота сети.

**A.A. Marchenko, S.V. Stoletov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: marchenko\_alx@inbox.ru*

### **ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR AT GENERATIVE BRAKING**

The dynamic loading of the motors can be based on any dynamic mode in which the motor operates in a nominal mode without mechanical load. As part of the study, the generator mode of the electric motor was used with the possibility of obtaining a nominal current and a moment of the electric machine. For this, a mathematical model of an electric motor was developed. Further, a simulation model in the Matlab Simulink environment was compiled on the basis of it and computer experiments were conducted to determine the parameters of dynamic loading.

**Key words:** electric current, mechanical power, torque, mechanical characteristics, mains frequency.

На сегодняшний день асинхронный электродвигатель является самой распространенной электрической машиной в составе судового электропривода. Более 80% таких машин уже подвергались ремонту на судоремонтных предприятиях Камчатского края. В данных условиях отремонтированные машины имеют срок службы гораздо меньше, чем новые. Сегодня существует проблема с повторным выходом из строя электродвигателей переменного тока. Это связано с некачественной проверкой электрических машин после ремонта.

Основной проблемой является некачественная проверка электродвигателей, подвергавшихся ремонту. Проверка электродвигателя в номинальном режиме является затруднительной, так как может обеспечиваться только при включении в регламент проверки электродвигателей под нагрузкой. Для этого применяется механическая нагрузка в виде генератора постоянного тока с подключенным в цепь переменным резистором или электромеханический тормоз. Тормоз не применяется, так как времени торможения недостаточно для получения диагностических данных. Применение генератора затруднено, так как предполагает механическое соединение электрических машин, которые отличаются габаритами, мощностью и другими характеристиками. Данная специфика обязывает применять достаточно большой диапазон электрических машин в качестве нагрузочных элементов. Также частое соединение электрических машин и центровка их валов значительно усложняют процесс диагностики.

Существуют автоматизированные стенды для проведения испытаний электрических двигателей. Такие устройства являются многофункциональными, они включают в себя элементы компьютерной диагностики. Наряду с преимуществами такие системы обладают и недостатками. Высокая стоимость и сложность в настройке, эксплуатации и ремонте сделали их невостребованными на судоремонтных предприятиях Дальнего Востока.

Сегодня существует проблема в точном техническом диагностировании. Решением может быть система, основанная на динамическом нагружении.

При данном типе нагружения не используется механическая нагрузка, применяется только электрическое соединение электрических машин.

Более шестидесяти процентов неисправностей электродвигателей переменного тока связаны с неполадками в статорной обмотке, остальные приходится на подшипниковый узел, менее пяти процентов связаны с неисправностями ротора.

В основе динамического нагружения электродвигателей может быть любой динамический режим, при котором электродвигатель работает в номинальном режиме без механической нагрузки. В рамках исследования использовался генераторный режим электродвигателя с возможностью получения номинального тока и момента электрической машины. Для этого была разработана математическая модель электродвигателя. Далее на ее основе была составлена имитационная модель в среде Matlab Simulink и проведены компьютерные эксперименты с определением параметров динамического нагружения.

Моделирование асинхронных электродвигателей подразумевает использование уравнения Парка – Горева. Для построения модели динамического нагружения эти уравнения не совсем подходят, так как они являются обобщенными и не учитывают некоторые важные процессы. Например, не учитываются потери в стали и вытеснение тока в стержнях ротора. Все эти процессы имеют место в реальной системе, поэтому полученные параметры при испытаниях модели на основе таких уравнений будут значительно отличаться от параметров электродвигателя, прописанных в паспортных данных машины [1].

В рамках первого этапа исследования в среде Simulink/Matlab была разработана математическая модель асинхронного двигателя. Оцениваем эффекты насыщения магнитной системы основным магнитным потоком, вытеснение тока в стержнях ротора, значение потерь в стали. Далее уточняем параметры схемы замещения. Затем в математическую модель электродвигателя, уже имеющую все неизвестные ранее номинальные параметры, вводим нелинейные зависимости  $L_m(\Psi)$  и  $R'_2(\omega_2)$  и учитываем потери в стали.

Как общепринято, уравнения АД с короткозамкнутым ротором представляем через обобщенные векторы – в системе координат, вращающейся с произвольной угловой скоростью  $\omega_k$ :

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \cdot \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{d\tau} + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_1; \\ 0 = R'_2 \cdot \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{d\tau} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_2; \\ M = p \cdot L_m \cdot [\bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2]; \\ J \frac{d\omega}{d\tau} = M - M_c. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}_2; \bar{i}_1 = (L_2 \cdot \bar{\Psi}_1 - L_m \cdot \bar{\Psi}_2) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ \bar{\Psi}_2 = L_m \cdot \bar{i}_1 + L_2 \cdot \bar{i}_2; \bar{i}_2 = (L_1 \cdot \bar{\Psi}_2 - L_m \cdot \bar{\Psi}_1) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2). \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{1x} = i_{n.cm} + (L_2 \cdot \Psi_{1x} - L_m \cdot \Psi_{2x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \dot{i}_{1y} = (L_2 \cdot \Psi_{1y} - L_m \cdot \Psi_{2y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ \dot{i}_{2x} = (L_1 \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot \Psi_{1x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \dot{i}_{2y} = (L_1 \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot \Psi_{1y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2). \end{cases}$$

Системы уравнений (1) и (2) записаны в координатах  $x - y - 0$ . Это позволяет использовать производные потокоцеплений и следующие алгебраические выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{1x}}{d\tau} = u_{1x} - \frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \Psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \Psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \omega_k \cdot \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{d\tau} = -\frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \Psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \Psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} - \omega_k \cdot \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{d\tau} = -\frac{R_2 \cdot L_1 \cdot \Psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_2 \cdot L_m \cdot \Psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{d\tau} = -\frac{R_2 \cdot L_1 \cdot \Psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_2 \cdot L_m \cdot \Psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \Psi_{2x}; \\ M = \frac{p \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\Psi_{1y} \cdot \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \cdot \Psi_{2y}); \\ J \frac{d\omega}{d\tau} = M - M_c. \end{array} \right. \quad (3)$$

Из векторной диаграммы следует:

$$\bar{i}_m = \bar{i}_1 + \bar{i}_2. \quad (4)$$

Обозначаем:

– индуктивности рассеяния статорной и роторной обмоток

$$L_{1\sigma} = L_1 - L_m \text{ и } L_{2\sigma} = L_2 - L_m; \quad (5)$$

– векторы потокоцеплений:

$$\bar{\Psi}_1 = L_{1\sigma} \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}_m; \quad \bar{\Psi}_2 = L_{2\sigma} \cdot \bar{i}_2 + L_m \cdot \bar{i}_m. \quad (6)$$

Для представленной модели возможны в координатных осях  $x - y - 0$  уравнения для потокоцеплений и токов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{1x} = L_1 \cdot i_{1x} + L_m \cdot i'_{2x}; \quad \Psi_{1y} = L_1 \cdot i_{1y} + L_m \cdot i'_{2y}; \\ \Psi_{2x} = L_m \cdot i_{1x} + L_2 \cdot i'_{2x}; \quad \Psi_{2y} = L_m \cdot i_{1y} + L_2 \cdot i'_{2y}; \quad \Psi = \sqrt{\Psi_{1x}^2 + \Psi_{1y}^2}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Влияние потерь в стали в представленной модели учтено увеличением активной составляющей  $i_{1x}$  тока статора на предварительно принятое значение тока потерь в стали  $i_{п.ст.}$

При условии, что  $i_{1R} = \sqrt{i_{1x}^2 + i_{1y}^2} \Leftrightarrow$  и  $i'_{2R} = \sqrt{i'_{2x}^2 + i'_{2y}^2} \Leftrightarrow$ , коэффициент мощности будет определяться выражением

$$\cos \phi = |i_{1x} / i_{1R}|, \quad (8)$$

действующие значения токов фаз статора и ротора:

$$I_1 = i_{1R} / \sqrt{3} \text{ и } I_2 = i'_{2R} / \sqrt{3}, \quad (9)$$

КПД:

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + \Delta P_{cm} + (i_{1R}^2 \cdot R_1 + i'_{2R} \cdot R_2)}. \quad (10)$$

Первоначально мощность потерь в стали  $\Delta P_{ст} \approx (P_{2н} / \eta_n - P_{2н}) \cdot 0,25$  и соответствующее ей значение тока  $i_{п. ст} = \Delta P_{ст} / (\sqrt{3} \cdot U_{1н})$ , которое ей соответствует, необходимо определять в номинальном режиме. Для этого следует получить номинальную мощность  $P_{2н}$  и КПД  $\eta_n$  двигателя.

Для проверки представленной математической модели в программе Simulink была создана модель асинхронного электродвигателя.

Для уточнения параметров модели проводилось определение параметров схемы замещения (ЗМ). В таблице указаны значения для электродвигателя серии 4А80А4.

**Параметры схемы замещения**

Параметр схемы замещения	Паспортные данные параметров СЗ, Ом	Полученные данные параметров СЗ, Ом
		4А80А4
$R_1$	9,21	8,1
$R_2'$	5,20	5,8
$X_1$	6,0	6,5
$X_2'$	8,73	8,3
$X_m$	135	154

Для определения параметров нагружения проводились испытания в номинальном режиме.

Полученная модель представлена на рис. 1. Здесь учитываются трение и нагрузка. Кроме того, модель содержит измерительные блоки для определения скорости ротора, момента двигателя, тока в статоре, а также его КПД и  $\cos \phi$ .

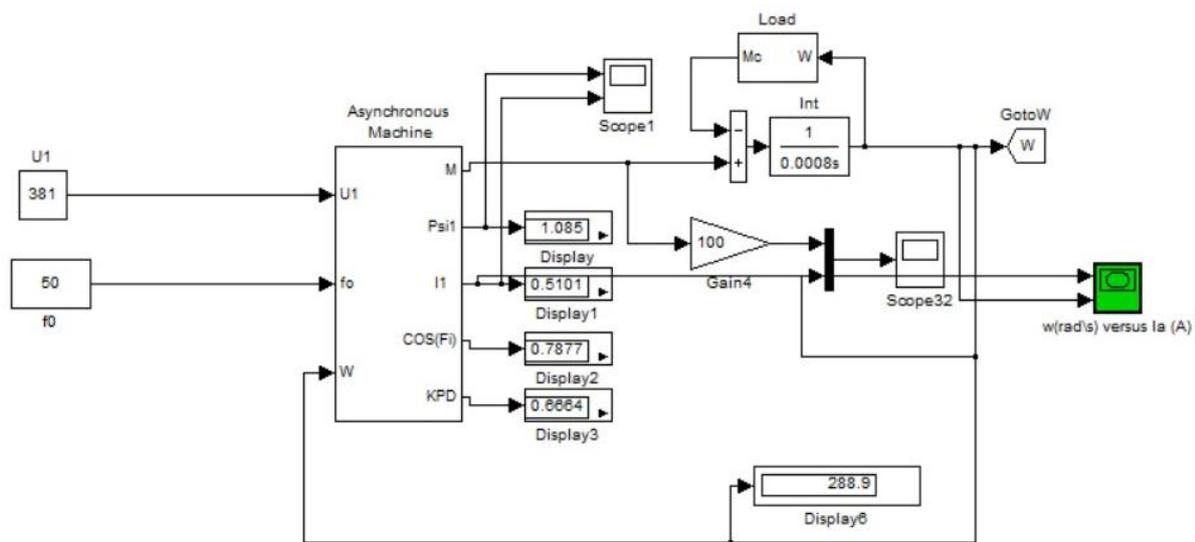


Рис. 1. Модель асинхронного двигателя с искусственным нагружением

Результаты моделирования представлены на рис. 2. Анализ полученной диаграммы показал, что отклонения момента двигателя, его скорости вращения, номинального тока, номинальной скорости, полученные в результате моделирования системы, отличаются от паспортных значений электродвигателя менее чем на 9%. На рис. 3 представлена механическая характеристика электродвигателя в процессе генераторного торможения.

Основным требованием, предъявляемым к модели в рамках исследования, является корректное изменение значений координат электродвигателя при изменении частоты и напряжения [2].

Нагрузочный режим электрической машины может быть получен различными способами. Изменение параметров электродвигателя возможно при введении возмущения в его работу. Такими способами могут быть противовключение или торможение. Рекуперативное торможение является довольно перспективным и экономичным методом. Кроме того, его получение может быть связано с использованием современных преобразователей частоты. По этим причинам в рамках данного исследования проводились компьютерные эксперименты по переводу электро-

двигателя в режим генератора и исследования его характеристик. Главными характеристиками, на основании которых можно сделать вывод о возникновении нагрузочного режима, соответствующего номинальному, являются мощность на валу двигателя и его ток.

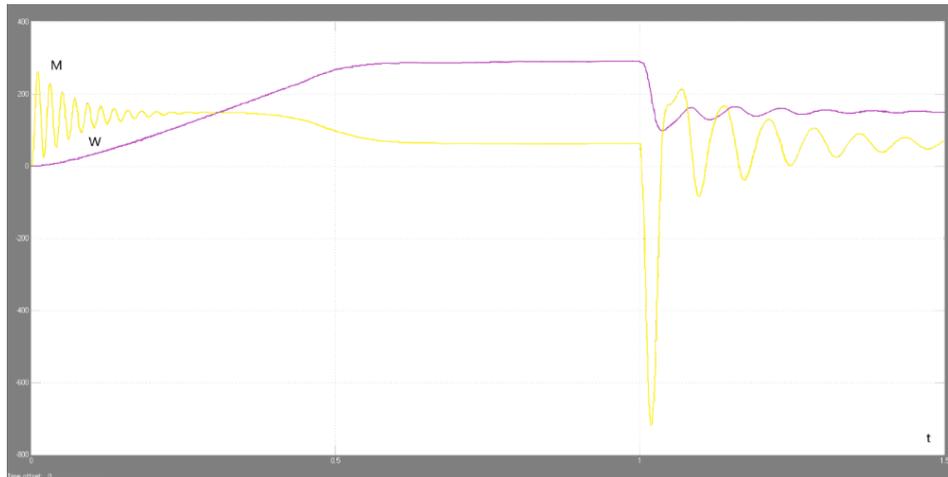


Рис. 2. Результаты моделирования

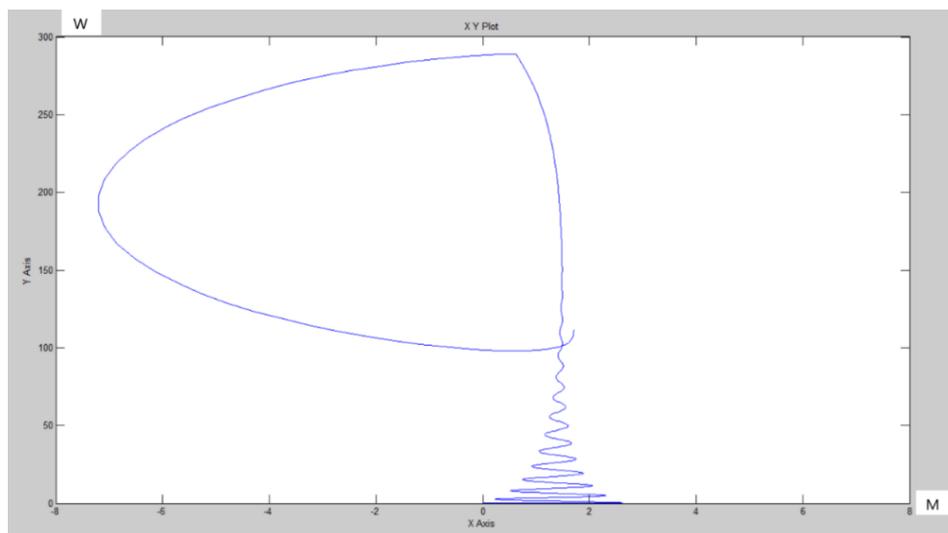


Рис. 3. Механическая характеристика в процессе моделирования

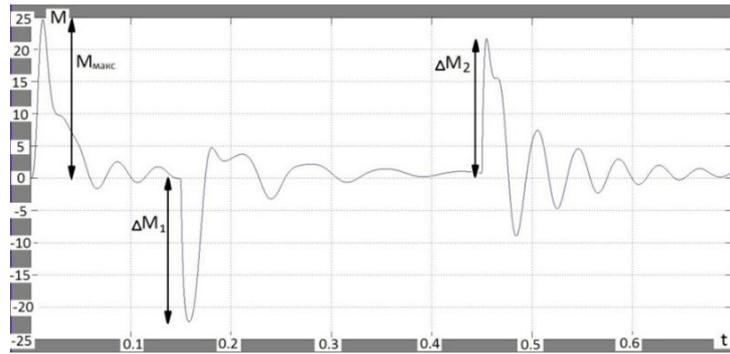
На рис. 4, а представлена диаграмма изменения момента двигателя. Также на рисунке указано максимальное значение момента  $M_{\text{макс}}$ . Значения  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$  соответствуют таковым на рис. 4. Главным показателем получения номинального режима является ток электродвигателя [3].

Диаграмма тока при циклическом переводе электродвигателя в генераторный режим при помощи рекуперативного торможения показана на рис. 5.

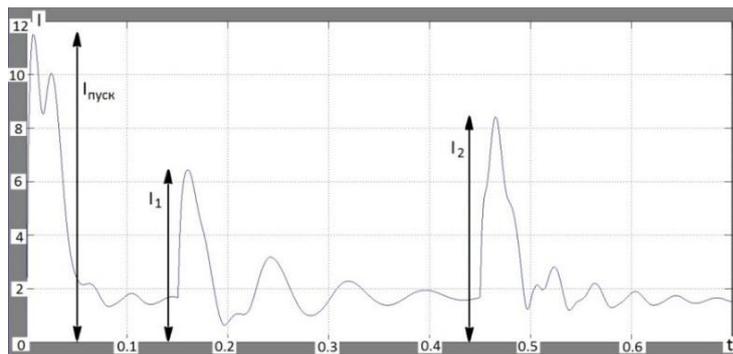
Результаты проведенного на имитационной модели эксперимента свидетельствуют о возникновении и протекании в устойчивом режиме процесса нагружения электродвигателя.

Полученный эквивалентный ток при правильной настройке и подборе частот напряжения соответствует току двигателя в номинальном режиме. Получение такого режима является необходимым условием испытаний электродвигателей переменного тока.

Результаты могут быть использованы для проектирования установки для испытания электрических двигателей после ремонта, которые позволят проверять исправность электрических машин без применения механической нагрузки. При правильном использовании ЭВМ такая система может обладать высокой степенью информативности и точности.

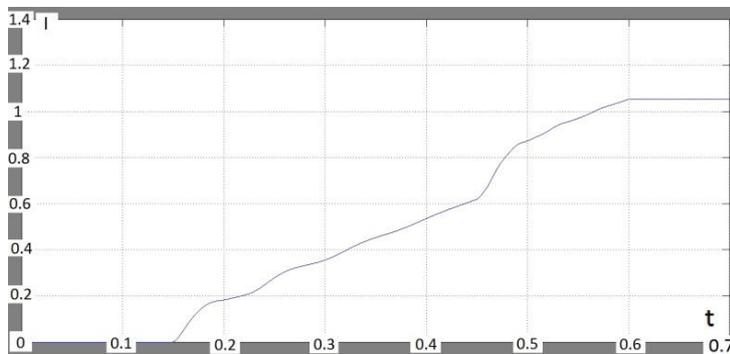


*a*

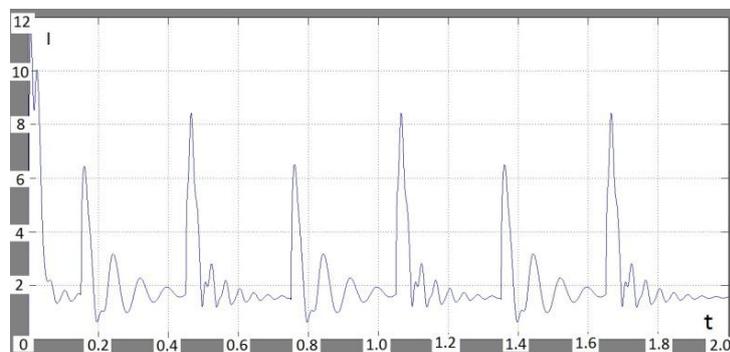


*б*

Рис. 4. Результаты моделирования при переводе электродвигателя в режим нагрузки:  
*a* – момент асинхронного двигателя; *б* – значение тока асинхронного двигателя



*a*



*б*

Рис. 5. Результаты эксперимента по искусственному нагружению:  
*a* – значение эквивалентного тока; *б* – диаграмма токов при переключении

Данная система может быть построена на основе частотного электропривода. Сегодня частотные преобразователи с непосредственной коммутацией предусматривают рекуперативное торможение с отдачей электрической энергии в сеть.

В представленной статье рассмотрены результаты испытаний электродвигателя 4А80А4. В ходе экспериментов были выявлены оптимальные значения частот и амплитуд напряжений для данного двигателя. Нужно отметить, что сегодня своевременного точного диагностирования требуют множество двигателей самых разных параметров. Для этого на основе полученной математической модели необходимо проводить идентификацию схемы замещения электродвигателей и в дальнейшем опытным путем определять оптимальные характеристики нагружения. Также получение оптимальных нагрузочных характеристик возможно не только путем рекуперативного торможения, но и других видов торможения.

Одним из возможных решений является торможение противовключением. Применение данного способа не требует механической нагрузки, что делает его также одним из видов динамического торможения. Этот способ требует также детальной проработки.

### Литература

1. *Марченко А.А., Портнягин Н.Н.* Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя // *Фундаментальные исследования.* – 2013. – № 1–2. – С. 408–412.
2. *Вольдек А.И.* Электрические машины: Учебник для высш. техн. заведений. 3-е изд. – Ленинград: Энергия, 1978. – С. 510–514.
3. *Марченко А.А., Портнягин Н.Н.* Энергоэффективное нагружение асинхронных электродвигателей в процессе послеремонтных испытаний // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова.* – СПб.: ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2014. – Вып. 6. – С. 76–84.

УДК 629.5.023

**Г.С. Мясников, Б.И. Новосадов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: ktksigma@mail.ru*

### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНТАКТНОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Основной задачей системы технической эксплуатации является поддержание и восстановление технического состояния судна и его элементов. Контактная аппаратура является одним из ответственных элементов судовой электроэнергетической системы и обеспечивает функции управления, контроля и защиты. Техническое состояние и работоспособность контактной аппаратуры существенно влияют на устойчивость самой электроэнергетической системы и ее силовых сетей, а также на обеспечение надежности и безопасности функционирования общесудовых систем, устройств и механизмов, в том числе и на эффективную эксплуатацию судна в целом. В процессе эксплуатации судна и его электроэнергетической системы неизбежно изменяются не только параметры электрической энергии, но и параметры, определяющие качество электроэнергии, которые колеблются в широких пределах, что существенно влияет на эксплуатацию контактной аппаратуры. Для снижения этого влияния и стабилизации фактора качества электрической энергии особое внимание уделяется системе технической эксплуатации контактной аппаратуры. В статье рассматриваются основные требования и нормы эксплуатации контактной аппаратуры и особенности их реализации в судовых условиях.

**Ключевые слова:** техническая эксплуатация, техническое обслуживание, контактная аппаратура, надежность, безопасность.

**G.S. Mjasnikov, B.I. Novosadov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: ktksigma@mail.ru*

### **INCREASING THE RELIABILITY OF CONTACT EQUIPMENT IN IMPLEMENTATING THE MAINTENANCE REQUIREMENTS**

The main task of the technical operation system is to maintain and restore the technical condition of the vessel and its elements. Contact equipment is one of the critical elements of the ship's electrical power system and provides control, monitoring and protection functions. The technical condition and operability of the contact equipment significantly affect the stability of the electric power system itself and its power networks, as well as ensuring the reliability and safety of the operation of general ship systems, devices and mechanisms, including the efficient operation of the ship as a whole. During the operation of the vessel and its electric power system, not only the parameters of electrical energy inevitably change, but also the parameters that determine the quality of electricity, which fluctuate in wide ranges, which significantly affects the operation of contact equipment. To reduce this influence and stabilize the quality factor of electrical energy, special attention is paid to the system of technical operation of contact equipment. The article discusses the basic requirements and standards for the operation of contact equipment and the features of their implementation in ship conditions.

**Key words:** technical operation, maintenance, contact equipment, reliability, safety.

Основными задачами технической эксплуатации является обеспечение высокой степени технической готовности, поддержание требуемого уровня надежности, содержание в исправном состоянии, увеличение эксплуатационного периода, а также снижение затрат на техническую эксплуатацию. Все эти требования в полной мере относятся к судовой контактной аппаратуре и находят свое отражение в нормативной и эксплуатационной документации [1–4].

В соответствии с этими требованиями для поддержания контактной аппаратуры и автоматических выключателей в работоспособном состоянии необходимо выполнять комплекс мероприятий по техническому обслуживанию, направленных на повышение надежности и безотказности судовой контактной аппаратуры. Данные мероприятия регламентируются различными руководящими документами, в том числе Правилами морского регистра, где уточняются и дополняются требования и нормы эксплуатации судового электрооборудования [5].

Основным элементом контактной аппаратуры, испытывающим наибольшие механические и термические нагрузки, являются контактные группы различного исполнения. Основные их виды представлены на рис. 1.

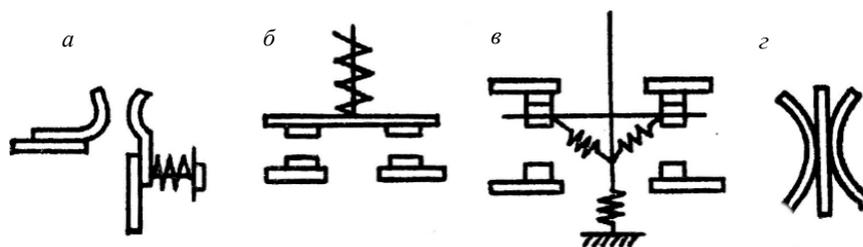


Рис. 1. Варианты исполнения контактов: а – пальцевого типа; б – мостикового типа; в – шагового типа; г – клинового типа

Другим важным элементом контактной аппаратуры, определяющим ее работоспособность, является магнитная система, состоящая из неподвижного магнитопровода, называемого ярмом, подвижного магнитопровода – якоря и втягивающей катушки. Варианты исполнения магнитных систем представлены на рис. 2.

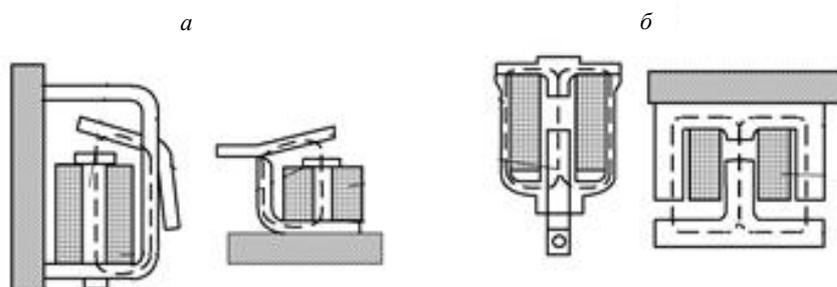


Рис. 2. Варианты исполнения магнитных систем: а – клапанная; б – прямоходовая

В отношении эксплуатации контактной аппаратуры, входящей в состав защитных устройств и реализующих функции контроля и защиты, правила Регистра регламентируют, что цепи, отходящие от распределительных щитов, должны быть надежно защищены от токов короткого замыкания и перегрузок с помощью автоматических выключателей, устанавливаемых в начале каждой цепи, по возможности ближе к зажимам питания. Обеспечение защиты цепи от перегрузок не требуется, если питаемые от этого щита потребители имеют индивидуальные устройства защиты от перегрузок, а кабель цепи питания щита выбран на максимальный рабочий ток.

Также защитные устройства должны соответствовать характеристикам защищаемого оборудования таким образом, чтобы они срабатывали при недопустимых перегрузках. При этом система защиты должна быть селективной (избирательной) как по токам перегрузки, так и по токам короткого замыкания. Именно свойство селективности является определяющим в элементах контактного оборудования судовых защитных устройств [6, 7].

Защита от тока короткого замыкания должна быть установлена на каждом изолированном полюсе системы постоянного тока, а также на каждой фазе системы переменного тока. Настройки устройств защиты от токов короткого замыкания должны быть выбраны в соответствии с расчетом, но не менее 200% от номинального тока потребителей. Для защиты от коротких замыканий электрических цепей (кабелей) и потребителей допускается использование одних и тех же защитных устройств.

Если на некоторых участках силовой цепи наблюдается уменьшение сечения кабеля, то для каждого кабеля с меньшим сечением необходимо установить дополнительную защиту, если защита выше не защищает кабель меньшего сечения. Для обеспечения требуемого уровня надежности электрической защиты производится выбор и установка автоматического выключателя с оптимальными значениями рабочих характеристик.

В цепях питания аварийного распределительного щита от главного распределительного щита не должны использоваться защитные устройства, исключающие возможность немедленного перезапуска после срабатывания защиты. Реализация данного требования обеспечивает необходимую надежность электроснабжения основных судовых потребителей в аварийных режимах [8, 9].

Использование защитных устройств в электрических цепях зависит от типа тока и типовой схемы построения этих цепей. Таким образом, защитные устройства не должны устанавливаться в выравнивающий кабель генераторов постоянного тока. При двухпроводной системе защита от перегрузки должна быть установлена по крайней мере на одном полюсе или фазе. В цепях переменного тока с изолированной четырехпроводной системой трехфазного тока защитные устройства предусмотрены на всех фазах, а в изолированной трехпроводной системе трехфазного тока защитное оборудование должно присутствовать по крайней мере в двух фазах.

Для обеспечения безопасности персонала и повышения чувствительности электрической защиты применяются контактные устройства защитного отключения. Правила морского Регистра устанавливают дополнительные требования к использованию данных устройств.

Устройства защитного отключения (УЗО), применяемые для защиты персонала от поражения электрическим током и защиты отдельных видов электрического оборудования от однофазных замыканий на корпус, должны применяться во всех цепях, где присутствует высокая степень опасности поражения электрическим током. Эти устройства рекомендуется устанавливать в цепях питания розеток, предназначенных для питания переносного оборудования и в цепях питания каютных розеток, а также розеток в общественных и иных помещениях с напряжением выше безопасного (50 В).

Также для устройств защитного отключения регламентированы уставки срабатывания по току нулевой последовательности, которые должны находиться в пределах 10–30 мА. Для электрического оборудования ответственного назначения установка устройств защитного отключения не допускается.

Контактное оборудование широко применяется не только в силовых цепях, но и в цепях управления. В частности, такие типы устройств комплектуются в цепях автоматизированного управления судовой энергетической установкой. Отличительной особенностью функционирования цепей управления являются небольшие значения отклонений тока. При этом Правила морского регистра предусматривают, что переключатели в цепях управления, а также в цепях освещения должны быть двухполюсными. В сухих жилых и офисных помещениях допускается применение однополюсных выключателей в цепях, отключающих одиночные лампы или группы ламп номинальным током не более 6 А, а также лампы с безопасным напряжением.

Для стационарных светильников наружного освещения должны быть предусмотрены устройства для централизованного отключения всех фонарей от рулевой рубки или от другого постоянного вахтенного поста на верхней палубе. Выключатели, цепи освещения помещений пунктов пожаротушения должны располагаться снаружи этих помещений. Выключатели освещения за отдельно стоящими распределительными щитами следует устанавливать на каждом входе за распределительным щитом.

Местные выключатели света не следует использовать в цепях аварийного освещения. Допускается использование местных выключателей в цепях светильников аварийного освещения, которые в нормальных условиях являются основными осветительными приборами. Аварийное освещение в рулевой рубке должно быть оборудовано индивидуальным выключателем. Светильники аварийного освещения мест посадки в спасательных машинах, которые в нормальных условиях являются основными осветительными приборами, должны включаться автоматически при обесточивании судна [10, 11].

Эксплуатация автоматических выключателей на береговых объектах регулируется Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), которые учитывают защиту электрических сетей, регламентируют выбор защиты, определяют места и правила установки оборудования [12].

Особые требования предъявляются к эксплуатации коммутационных аппаратов. ПУЭ разработаны с учетом обязательности проведения в условиях эксплуатации планово-предупредительных и профилактических испытаний, ремонтов электроустановок и их электрооборудования.

Содержание мероприятий по технической эксплуатации электроустановок определяется Правилами технической эксплуатации (ПТЭ). Этот нормативный документ имеет целью обеспечить надежную, безопасную и рациональную эксплуатацию электроустановок и содержание их в исправном состоянии [13]. Объем технического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов контактной аппаратуры должен определяться необходимостью поддержания работоспособности электрооборудования, периодического его восстановления и приведения в соответствие с меняющимися условиями работы [14, 15].

В судовых электроэнергетических системах среди контактной аппаратуры наиболее распространены автоматические выключатели, из которых большое применение находят автоматические выключатели с полупроводниковым расцепителем. Контроль работоспособности таких выключателей должен производиться на специальном стенде, позволяющем пропустить через главную цепь ток требуемого значения [16].

Надежность автоматических выключателей во многом связана с условиями их эксплуатации. Влияние неблагоприятных факторов, как и нарушение требований и норм эксплуатации, снижает надежность контактной аппаратуры, в том числе и автоматических выключателей. Рабочие параметры автоматических выключателей, принцип срабатывания которых основан на деформации при нагревании контактной биметаллической пластины протекающим через нее током, очень зависят от внешних факторов. Температура окружающего воздуха является одним из факторов, влияющих на охлаждение аппарата, соответственно на его технические характеристики. Также следует учитывать неизбежные процессы механического изнашивания и термического старения элементов. При совокупном воздействии всех этих факторов рабочие параметры электрических аппаратов отклоняются от номинальных значений, и, следовательно, существенно снижаются показатели надежности и безотказности всей системы.

Как правило, изготовитель оговаривает условия монтажа в своей документации. Практически же можно считать, что каждый дополнительно установленный модуль, если речь идет об автоматических выключателях, способствует снижению номинального тока срабатывания приблизительно на 2,25%, и при установке 10 автоматических выключателей в модуле поправочный коэффициент составит 0,8, а при увеличении общего количества контактных модулей величина коэффициента может снизиться до критического значения, составляющего 0,5 от номинального тока срабатывания.

Основными эксплуатационными факторами, влияющими на надежность работы сетевого автоматического выключателя, являются отклонение напряжения, отклонение частоты, несимметрия по фазам и другие параметры, определяющие качество электрической энергии. Это позволяет сделать закономерный вывод о зависимости показателей надежности, долговечности и безопасности от обеспечения показателей качества электрической энергии. Качество электрической энергии регламентируется основным нормативным документом ГОСТ 32144-2013, который устанавливает показатели нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего значения и их численные значения в допустимых режимах эксплуатации.

Таким образом, повышение надежности контактной аппаратуры в условиях неизбежного влияния внешних факторов требует обеспечения двух взаимосвязанных критериев. Во-первых, требуется обеспечение качества электрической энергии во всех режимах работы электроэнергетической системы. Снижение качества электрической энергии способствует разбалансировке электрических параметров контактного аппарата, что снижает его надежность, а также качество и безопасность выполняемых им функций управления, контроля и защиты.

Вторым критерием является соблюдение требований и норм технической эксплуатации, в том числе при проведении всех видов технического обслуживания. Данный критерий направлен на поддержание заданного уровня технической готовности как отдельных элементов, так и всей системы в течение всего периода эксплуатации электроэнергетической системы. Важную роль в решении этих задач, несомненно, играет профессиональная подготовка персонала как неотъемлемая часть системы технического обслуживания [17]. Комплексное обеспечение этих условий позволяет обеспечить безопасную и эффективную эксплуатацию.

## Литература

1. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 80–83.
2. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 5–9.
3. Белов О.А. Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – № 30. – С. 11–16.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Том 2. – 2007. – 679 с.
5. Белов О.А., Богославский И.С., Преданцев Э.А. Оптимизация элементной базы системы автоматизации золотоизвлекающей фабрики ЗАО «Тревожное зарево» // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Седьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – С. 112–114.
6. Белов О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 96–102.
7. Кротенко Д.С., Белов О.А. Моделирование процессов оптимизации режимов судовой электроэнергетической системы при электропитании от береговой сети // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 77–80.
8. Сивоконь В.П., Лашиов Д.В., Белов О.А. Диагностические признаки нестандартного проявления нелинейности в электрических сетях // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2019. – № 48. – С. 18–27.
9. Белов О.А., Мясников Г.С. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 73–76.
10. Белов О.А., Парфенкин А.И. Системная интеграция контроля электрооборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 14–17.
11. Правила устройства электроустановок. Седьмое изд., доп. с испр. – Новосибирск: Нор-матика, 2015. – 464 с.
12. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2005. – 304 с.
13. Белов О.А. Общий алгоритм развития опасных ситуаций в судовых условиях // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 51–54.
14. Белов О.А. Процесс формирования постепенного отказа в технических системах // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Шестой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2015. – С. 44–49.
15. Гераськин А.К., Белов О.А. Дефектация и настройка судовых автоматических выключателей способом моделирования электромагнитного поля // Образование, наука и молодежь: Материалы науч.-практ. конф. – Керчь: Керченский государственный морской технологический университет, 2017. – С. 162–166.
16. Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.
17. Белов О.А., Толстова Л.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2016. – № 3 (16). – С. 78–81.

УДК 004.413:[620.19:629.5.023]

**А.О. Рогожников, О.А. Белов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru*

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ**

Обеспечение безопасной эксплуатации морских судов является важной и актуальной задачей. Решение этой задачи требует системного подхода и включает в себя комплексы мероприятий по совершенствованию конструктивной и организационно-технической составляющей судов. В первую очередь данные мероприятия направлены на повышение эксплуатационной надежности судна. Она как объект эксплуатации во многом определяется техническим состоянием корпуса судна. Основным фактором, влияющим на состояние корпуса судна, являются коррозионные процессы, которые неизбежно возникают при эксплуатации металлических корпусов в агрессивной морской среде. Для снижения влияния данных процессов на судах используются различные системы защиты от коррозии. Опыт работы на судах и проведенные исследования показали необходимость контроля состояния антикоррозионной защиты судна в период эксплуатации. Оптимальным решением в данном случае является внедрение на кораблях и судах специальной автоматизированной системы контроля. Для эффективного применения автоматизированной системы контроля состояния коррозионной защиты судна требуется разработка качественного программного обеспечения для обработки и анализа данных. В статье приводится анализ работы предлагаемого варианта программного обеспечения для судовой автоматизированной системы контроля.

**Ключевые слова:** электрохимическая коррозия, коррозионная защита, автоматизированная система, программное обеспечение, эффективность, надежность, безопасность.

**A.O. Rogozhnikov, O.A. Belov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru*

### **DEVELOPMENT OF DATA PROCESSING SOFTWARE FOR AN AUTOMATED CORROSION CONTROL DEVICE**

Ensuring the safe operation of marine vessels is an important and urgent task. Solving this problem requires a systematic approach and includes a set of measures to improve the constructive, organizational and technical component of the ships. First of all, these measures are aimed at increasing the operational reliability of the vessel. The reliability of a vessel as an object of operation is largely determined by the technical condition of its hull. The main factor affecting the condition of the ship's hull is the corrosion processes that inevitably arise during the operation of metal hulls in an aggressive marine environment. To reduce the impact of these processes, various corrosion protection systems are used on ships. The experience of working on ships and the studies carried out have shown the need to control the state of the ship's anti-corrosion protection during the operation. The optimal solution in this case is the introduction of a special automated control system on ships and vessels. Effective use of an automated system for monitoring the state of corrosion protection of a vessel requires the development of high-quality software for data processing and analysis. The article analyzes the work of the proposed version of the software for the ship's automated control system.

**Key words:** electrochemical corrosion, corrosion protection, automated system, software, efficiency, reliability, safety.

Основа безопасной эксплуатации кораблей и судов закладывается еще на этапе проектирования и строительства в ходе реализации конструктивных мероприятий. Именно реализация этого этапа закладывает необходимый уровень надежности корпуса судна, а также судовых систем,

устройств и отдельных механизмов. Вместе с тем в период эксплуатации безопасность как основной техникой критерий в первую очередь определяется общим техническим состоянием судна, в том числе и состоянием корпуса. В связи с этим защита судов и кораблей от коррозии является важной государственной задачей, в решении которой должны участвовать экипажи судов и кораблей [1–6].

Одним из условий эффективного решения данной задачи является организация на судах контроля состояния коррозионной защиты. Для этого как минимум на судах необходимо иметь электроды сравнения для контроля протекторной защиты корпусов морских судов [1–6]. Анализ организации антикоррозионного обеспечения на судах показывает, что в большинстве случаев электроды сравнения отсутствуют [7–9].

Как известно, для защиты корпусов судов и наземной портовой инфраструктуры от коррозии используются следующие виды защит:

- пассивная коррозионная защита (лакокрасочное покрытие, материал корпуса судна);
- активная коррозионная защита (протекторная защита, катодная защита).

Любой из видов защит от коррозии нуждается в постоянном контроле со стороны экипажей судов и портовых служб. Активная защита от коррозии нуждается в сборе большого количества данных о потенциале корпуса защищаемого объекта. Согласно требованиям нормативных документов [4–6], не менее одного раза в неделю необходимо производить измерения защитного потенциала корпуса судна. На точность измерений влияет множество факторов: состояние электродов, место измерения и квалификация оператора. Последствия неправильной оценки состояния защиты от коррозии могут выражаться экономическими потерями, исчисляемых миллионами рублей.

Исследования на судне ПМ-15 показали, что оптимальное количество измерений на объекте в течение месяца для оценки его состояния составляют около 4 000 измерений по шести точкам. Тренд состояния коррозионной защиты объекта удобно оценивать с помощью графиков потенциала коррозионной защиты относительно электродов сравнения.

Достоверность результатов контроля протекторных систем защиты от коррозии корпусов судов возрастает при использовании автоматизированной системы контроля коррозионной защиты [10]. При обработке данных состояния коррозионной защиты объектов были сделаны выводы о возможности внедрения разработанного программного обеспечения обработки данных для автоматизированного устройства контроля коррозионной защиты.

Далее приведены результаты контроля работы протекторной защиты стального корпуса вспомогательного морского судна ПМ-15, полученные в разработанном программном обеспечении обработки данных для автоматизированного устройства контроля коррозионной защиты за период времени с 1.09.2021 по 31.09.2021. Исследуемое судно находилось в долговременном стояночном режиме [5]. Для получения результатов контроля коррозионной защиты были проведены измерения потенциала корпуса судна [5, 6] в заданной контрольной точке [11]. Для обработки данных в автоматическом режиме данное программное обеспечение использует рекомендации и методику измерений, приведенные в работах [12–17], и следующие электроды сравнения:

- хлорсеребряный электрод сравнения (ХСЭ), рекомендованный для использования на российских судах нормативными документами [5, 6] (электроды № 1, 6);
- цинковый электрод сравнения, рекомендованный для использования на зарубежных судах [18] (электроды № 2, 3);
- алюминиевый электрод (электрод № 4);
- медный электрод (электрод № 5).

На рис. 1 показаны графики потенциала электродов сравнения, полученные за отчетный период. С 1 по 15 число потенциал судна ПМ-15 колеблется в пределах от 640 до 690 мВ у электродов № 1, 6 (ХСЭ), что говорит о стабильности показаний автоматизированной системы. Результаты потенциала электродов № 2, 3, 5 колеблются в пределах менее 50 мВ, что говорит о стабильности показаний и возможности использования их при автоматизированном контроле и при ручных долговременных измерениях. Результаты потенциала электрода № 4 колеблются в пределах более 50 мВ, что говорит о низкой точности и повторяемости измерений по сравнению с результатами эталонных электродов № 1, 6 и экспериментальных электродов № 2, 3, 5. Поэтому данный вид электрода не рекомендуется использовать при автоматизированном контроле в будущем, но этот вид электрода можно использовать в ручных измерениях как сигнализатор состояния коррозионной защиты [18–21].

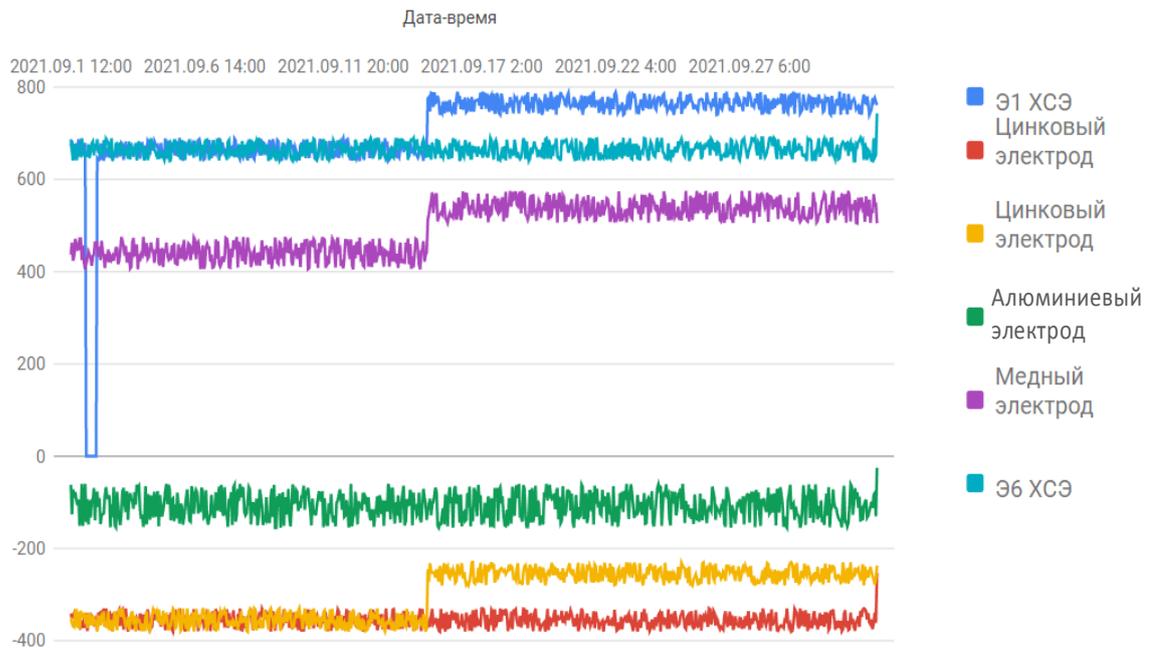


Рис. 1. График состояния коррозионной защиты судна ПМ-15

На рис. 2 показан выход из строя электрода № 1 (ХСЭ). При этом потенциал на электроде равен нулю, что говорит об обрыве соединительного провода электрода. После восстановления электрода № 1 потенциал электрода вернулся к значениям до выхода из строя. Данные результаты сбоя удалось получить благодаря разработанному программному обеспечению за счет функции непрерывного контроля.



Рис. 2. График состояния коррозионной защиты судна ПМ-15

На рис. 3 показано повышение потенциала электродов сравнения на 100 мВ, что может говорить о паразитной защите или об обрастании электрода водорослями. В данном случае наблюдается паразитная защита от близстоящего судна МБ-20 (морской буксир 20).

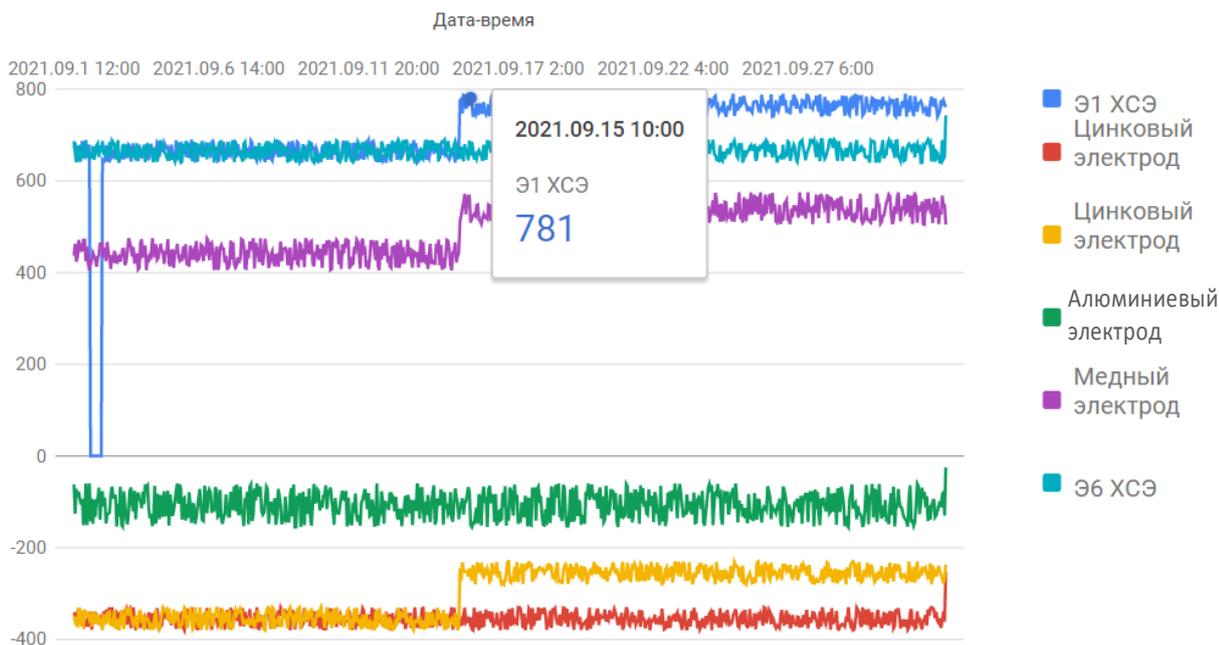


Рис. 3. График состояния коррозионной защиты судна ПМ-15

На рис. 2 и 3 видны нестандартные аварийные ситуации, которые произошли на судне ПМ-15 за отчетный период. Благодаря непрерывному контролю, осуществляемому программным обеспечением, эти данные были зафиксированы и доведены до экипажа судна. Непрерывный контроль повысит безопасность мореплавания и исключит преждевременный износ корпуса судна.

Из полученных результатов исследований можно сделать вывод о целесообразности внедрения автоматизированного контроля коррозионной защиты для судов и кораблей [10]. Автоматизированный контроль повышает точность измерений, и исключается человеческий фактор, т. к. человек не может непрерывно вести контроль коррозионной защиты объекта. Немаловажно отметить, что вести постоянный контроль за системой коррозионной защиты времязатратно и трудоемко при ручном методе. Поэтому предлагаемое программное обеспечение позволит трудоемкий процесс получения результатов контроля коррозионной защиты существенно упростить и повысить точность измерений для специалистов по контролю за состоянием объектов.

Исходя из полученных результатов, сделан вывод: внедрение данного программного обеспечения обработки данных для автоматизированного устройства контроля коррозионной защиты позволит:

- повысить точность результатов контроля;
- снизить времязатраты и трудоемкость процесса;
- упростить процесс получения данных.

Построение одного графика потенциала шести электродов за месяц занимает не менее 20 минут. Для оценки состояния коррозионной защиты объекта необходимо постоянно актуализировать графики, что многократно увеличит затрачиваемое время на получение результатов контроля состояния коррозионной защиты исследуемого объекта при стандартном методе обработки, так как затрачиваемое время кратно количеству построенных графиков. Следовательно, для повышения производительности целесообразно внедрить разрабатываемое программное обеспечение в систему оценки состояния коррозионной защиты объекта.

### Литература

1. Зобочев Ю.Е., Солинская Э.В. Защита судов от коррозии и обрастания. – М.: Транспорт, 1984. – 174 с.
2. Контроль систем протекторной защиты стальных судов и кораблей: Монография / В.А. Швецов, О.А. Белов, П.А. Белозеров, Д.В. Шунькин. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2016. – 109 с.

3. *Коробцов И.М.* Техническое обслуживание и ремонт флота. – М.: Транспорт, 1975. – 195 с.
4. РД 31.28.10-97 Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200049727> (дата обращения: 05.10.2019).
5. ГОСТ 9.056-75. Стальные корпуса кораблей и судов. Общие требования к электрохимической защите при долговременном стояночном режиме [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200015017> (дата обращения: 05.10.2019).
6. ГОСТ 26501-85. Корпуса морских судов. Общие требования к электрохимической защите. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7 с.
7. *Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П.* Обоснование оптимальной периодичности контроля работы протекторной защиты стальных корпусов судов // Эксплуатация морского транспорта. – Новороссийск, 2017. – № 1 (82). – С. 41–48.
8. Внедрение усовершенствованного способа контроля систем протекторной защиты стальных корпусов судов камчатского флота / *О.А. Белов, В.А. Швецов, Д.П. Ястребов, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – Вып. 39. – С. 6–11.
9. Обоснование возможности исключения внешнего осмотра систем протекторной защиты стальных корпусов судов / *В.А. Швецов, О.А. Белов, О.А. Белавина, Д.П. Ястребов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, 2017. – Вып. 1. – С. 29–38.
10. Разработка автоматизированной системы контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов / *О.А. Белов, Д.П. Ястребов, А.О. Рогожников, В.А. Швецов, С.А. Зайцев, Б.В. Тарабанов* // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XI Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 82–85.
11. Обоснование способа выбора контрольных точек для измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / *П.А. Белозеров, В.А. Швецов, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин, Д.В. Коростылёв, В.А. Пахомов, С.А. Малиновский* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2014. – Вып. 28. – С. 6–11.
12. Влияние квалификации оператора на результаты измерения защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов / *В.А. Швецов, П.А. Белозеров, Н.В. Адельшина, О.А. Белавина, О.Е. Петренко, Д.В. Шунькин, В.В. Кириносенко* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2014. – Вып. 30. – С. 46–54.
13. Обоснование выбора необходимого числа параллельных измерений защитного потенциала стальных корпусов кораблей и судов в контрольной точке / *В.А. Швецов, П.А. Белозеров, О.А. Белавина, Д.В. Шунькин, С.А. Малиновский* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 35. – С. 40–46.
14. Обоснование необходимости подготовки операторов для измерения потенциала стальных корпусов судов и кораблей / *В.А. Швецов, О.А. Белов, П.А. Белозеров, О.А. Белавина, В.В. Кириносенко* // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – Вып. 37. – С. 19–24.
15. О выборе электродов для контроля систем протекторной защиты стальных судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина* // Вестник Астраханского государственного технического университета. – Астрахань, 2019. – Вып. 4. – С. 39–45.
16. О целесообразности использования хлорсеребряных электродов для контроля систем протекторной защиты стального корпуса судна / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 121–124.
17. К вопросу использования стальных пластин для контроля протекторной защиты корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина, С.А. Зайцев* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 125–129.

18. К вопросу использования электродов из судокорпусной стали для контроля защищенности от коррозии корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, Б.В. Тарабанов, С.А. Зайцев* // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2020. – С. 15–21.

19. К вопросу использования цинковых электродов для контроля проектной защиты судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, Д.В. Шунькин, А.О. Рогожников, Г.В. Кузнецов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, 2021. – Вып. 2. – С. 16–23.

20. К вопросу использования алюминиевых электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей / *Д. П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов, Б.В. Тарабанов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, 2021. – Вып. 2. – С. 23–32.

21. *Ястребов Д.П.* К вопросу использования медных электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – Астрахань, 2021. – Вып. 4. – С. 43–51.

УДК 371.693.4:629.5.064

**А.О. Рогожников<sup>1</sup>, К.И. Ершова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, 190005  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРА ОТРАБОТКИ НАВЫКОВ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ**

Судовая электроэнергетическая система (СЭЭС) является первичным элементом в отношении других судовых систем, устройств и отдельных механизмов. Основная задача СЭЭС – бесперебойное электроснабжение судовых потребителей качественной электроэнергией. Эффективная работа судовой электростанции не только обеспечивает качество эксплуатации, но и определяет показатели надежности и безопасности для судна в целом. Степень ответственности судовой электроэнергетики требует глубокой автоматизации судовой электростанции и элементов управления СЭЭС. При этом важную роль в обеспечении качественной эксплуатации СЭЭС и надежности ее работы играет обслуживающий персонал с соответствующим уровнем его профессиональной подготовки. Для обеспечения профессиональных навыков при подготовке операторов СЭЭС в том числе предусматривается их тренажерная подготовка. Большинство тренажеров предназначено для отработки определенных алгоритмов действий в стандартных ситуациях. В статье обосновывается необходимость разработки тренажера с большой степенью вариации нестандартных ситуаций и предлагаются некоторые технические решения для реализации данного проекта.

**Ключевые слова:** судовая электроэнергетическая система, судовая электростанция, электрическая энергия, автоматизация, короткое замыкание, тренажерная подготовка, математическое моделирование, эффективность, надежность, безопасность.

**A.O. Rogozhnikov<sup>1</sup>, K.I. Ershova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006;

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, 190005  
e-mail: aleksei17\_90@mail.ru

## **DEVELOPMENT OF A SIMULATOR FOR THE SHIP POWER SYSTEM**

The ship power system is the primary element in relation to other ship systems, devices and individual mechanisms. The main task of the ship power system is uninterrupted power supply to ship consumers with high-quality electricity. The efficient operation of the ship's power plant not only ensures the quality of operation, but also determines the reliability and safety indicators for the ship as a whole. The degree of responsibility of the ship power industry requires deep automation of the ship power plant and control elements of the ship power system. At the same time, maintenance personnel with an appropriate level of their professional training play an important role in ensuring the high-quality operation of the ship power system and the reliability of its operation. To ensure professional skills in the training of ship power system operators, their simulator training is also provided. Most simulators are designed to practice certain algorithms of actions in standard situations. The article substantiates the need to develop a simulator with a large degree of variation in non-standard situations and proposes some technical solutions for the implementation of this project.

**Key words:** ship power system, ship power plant, electric power, automation, short circuit, simulator training, mathematical modeling, efficiency, reliability, safety.

Обучение квалифицированных специалистов – важная государственная задача, для решения которой необходимо применять современные методы обучения, внедрять современные способы контроля учебного процесса. Внедрение разрабатываемого тренажера отработки навыков

эксплуатации судовой электростанции в учебный процесс направлено на отработку нестандартных режимов работы судовой электростанции, а также на упрощение понимания физических процессов, протекающих при работе судовой электростанции [1, 2].

По программам специальностей, таких как инженер-электромеханик, инженер-судомеханик, по программам подготовки бакалавров, а также по программам повышения квалификации и профессиональной переподготовки предъявляется ряд профессиональных требований или компетенций, при освоении которых будущий специалист должен быть способен осуществить анализ проблемных ситуаций и выбрать стратегию действий. Также специалист должен уметь идентифицировать опасные ситуации и сценарий их развития, воспринимать и управлять рисками, поддерживать должный уровень владения ситуацией, быть способным осуществлять безопасное техническое использование, техническое обслуживание, диагностирование и ремонт судового электрооборудования и средств автоматики, должен устанавливать причину отказа оборудования [3].

Не менее важно предотвращение аварий на судах, происходящих по причине неправильной эксплуатации. Разрабатываемый тренажер отработки навыков эксплуатации судовой электростанции направлен на понимание принципов работы узлов судовой электростанции, общего устройства, а также способов запуска и вывода на номинальные режимы работы. Также разрабатываемый тренажер направлен на отработку нестандартных ситуаций, таких как короткое замыкание, повышенное напряжение. При отработке нестандартных ситуаций на тренажере судовой электростанции будут приобретены знания физических процессов, необходимые для безаварийной эксплуатации, а также для действий в аварийных ситуациях с целью купирования с наименьшими экономическими потерями [4].

Аналогичные тренажеры отработки навыков эксплуатации судовой электростанции в своем составе имеют электромашинную модель дизель-генератора, аналоговые приборы, закрепленные на стенде, органы управления дизель-генераторами и нагрузкой, а также персональный компьютер, на котором дублируются параметры работы установки в программе, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид типового тренажера судовой электростанции

Отработка штатных ситуаций происходит по заранее известным алгоритмам, адаптированным под определенный проект судна. Процесс подготовки на тренажере вырабатывает определенную последовательность действий, запоминаемую обучающимся. При возникновении аварийных и нештатных ситуаций происходит отключение системы и выведение на панели контроллера дизель-генератора кода ошибки, что не дает полного понимания процессов, происходящих в СЭЭС [5, 6].

Структурная схема разрабатываемого тренажера показана на рис. 2. Разрабатываемый тренажер судовой электростанции будет состоять из модуля контрольно-измерительных приборов (КИП), модуля дизель-генератора, панели индикации и вывода данных, модуля управления и модуля связи. Модуль КИП включает в себя набор цифровых датчиков тока, цифровых датчиков напряжения и энкодеров. Панель индикации и вывода данных представляет информацию об авариях, визуализирует данные датчиков, переданные модулем связи по асинхронному интерфейсу RS-485. Вывод данных работы системы также осуществляется с помощью термопринтера на термобумаге. Основными элементами модуля связи являются микроконтроллеры. Микроконтроллер Slave отвечает за опрос датчиков, кнопок управления, тумблеров и отправку данных на микроконтроллер Master. Микроконтроллер Master отвечает за прием данных с микроконтроллера Slave, отправку данных на модуль панели индикации и вывода данных. Модуль управления предназначен для регулировки тока возбуждения генератора, частоты оборотов приводного двигателя и обеспечения защиты модели дизель-генератора.

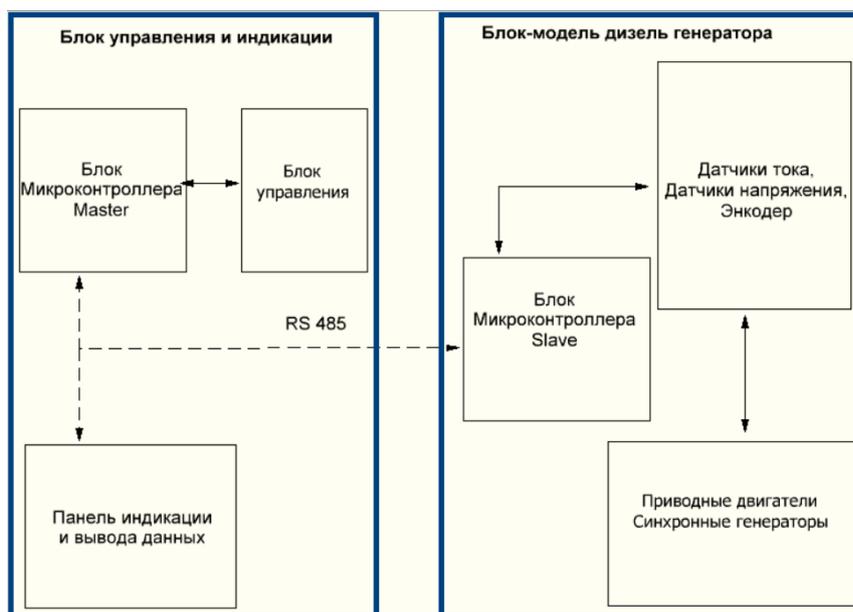


Рис. 2. Структурная схема тренажера отработки навыков эксплуатации судовой электростанции

В отличие от аналогов разрабатываемый тренажер отработки навыков эксплуатации судовой электростанции будет симулировать нештатные ситуации, которые будут воспроизведены с помощью микроконтроллера, используемого в разрабатываемом тренажере отработки навыков эксплуатации операторов судовой электростанции.

Отличительные особенности разрабатываемого тренажера:

- с помощью программных симуляций тренажер может быть адаптирован под различные проекты судов и мощности электроэнергетических установок;
- возможна отработка нестандартных режимов работы, таких как короткое замыкание, длительная перегрузка, повышенное напряжение, превышение частоты;
- все действия оператора тренажера будут фиксироваться и выводиться на печатном носителе, что упростит понимание происходящих процессов и может быть использовано в дальнейшем в учебной и методической деятельности;
- симуляция режимов в СЭЭС связана с риском возникновения больших токов, которые могут привести к выходу из строя КИП. В разрабатываемом тренажере аналоговые приборы заменены цифровыми, что позволит выводить значения токов короткого замыкания на контрольно-измерительных приборах без риска их разрушения и повреждения модели СЭЭС.
- тренажер предусматривает практическую отработку действий оператора в нестандартных режимах работы СЭЭС, а также теоретическую подготовку персонала в вопросах управления судовой электростанцией.

Полученные навыки и понимание сути физических процессов при эксплуатации позволят будущим специалистам, выпускникам высшего, среднего и начального профессионального

образования, а также слушателям курсов повышения квалификации электротехнического персонала грамотнее и безопаснее эксплуатировать судовую электростанцию [7–9].

Это в свою очередь снизит количество аварий на судах, выход оборудования из строя из-за неправильной эксплуатации персоналом и увеличит безопасность мореплавания.

При решении задачи обучения актуальным навыкам и повышения квалификации специалистов по эксплуатации судового электрооборудования необходимо применять современные методы обучения. Актуализация методов обучения – важнейшая задача, которая должна происходить непрерывно в том числе и за счет разработки современных тренажеров специалистами и преподавателями учебных заведений.

### Литература

1. Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой нац. (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.
2. Белов О.А., Толстова Л.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2016. – № 3 (16). – С. 78–81.
3. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты / Международная морская организация. – Лондон: ИМО, 2013. – 413 с.
4. Белов О.А. Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – № 30. – С. 11–16.
5. Молочкова И.Д. Тренажерная подготовка. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. – 26 с.
6. Молочкова И.Д. Автоматизация судовой электростанции. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. – 84 с.
7. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 80–83.
8. Белов О.А. Оценка безопасности эксплуатации судовых энергетических установок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2017. – № 42. – С. 6–10.
9. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 5–9.

УДК 621.313:629.5.064.5

**Ю.В. Стреляева, А.А. Марченко**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: marchenko\_alx@inbox.ru*

### **ПОСТРОЕНИЕ ОДНОКОНТУРНОЙ МОДЕЛИ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

На сегодняшний день моделирование электротехнических процессов в современных пакетах программ позволяет исследовать системы. Целью данной работы является исследование гребной электрической установки. Для проведения полноценного эксперимента по регулированию частоты вращения гребного электродвигателя в системе генератор – двигатель необходимо выполнение нескольких последовательных задач. Первой задачей является настройка модели таким образом, чтобы ее характеристики соответствовали реальной установке. Второй задачей является введение возмущений в систему и фиксация изменения параметров. Третья задача – отследить изменения характеристик системы и сделать соответствующие выводы. Авторами данной статьи были выполнены первые две задачи, а также даны рекомендации по дальнейшему исследованию системы.

**Ключевые слова:** гребной двигатель, электрический ток, механическая мощность, момент, частота сети.

**U.V. Streliaeva, A.A. Marchenko**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: marchenko\_alx@inbox.ru*

### **CONSTRUCTION OF SINGLE-CIRCUIT MODEL OF ELECTRICAL PROPULSION INSTALLATION**

To date, modeling of electrical processes in modern software packages allows you to investigate systems. The purpose of this work is to study electrical propulsion installation. To conduct a full-fledged experiment to control the speed of rotation of the propeller electric motor in the Generator Engine system, several consecutive tasks must be performed. The first task is to configure the model so that its characteristics correspond to the real installation. The second task is to introduce perturbations into the system and fix the change in parameters. The third task is to track changes in the characteristics of the system and draw appropriate conclusions. The authors of this article completed the first two tasks, and also made recommendations for further study of the system.

**Key words:** propulsion motor, electric current, mechanical power, torque, mains frequency.

На сегодняшний день одной из главных задач Северного флота является освоение Арктики.

Для этих целей на верфях Российской Федерации закладываются новые современные суда ледокольного типа. Главной особенностью таких судов является главная энергетическая установка и система электродвижения. В условиях ледового плавания необходимым условием к гребной электрической установке являются высокая маневренность и возможность выдерживать большие нагрузки, являющиеся неотъемлемой частью такого вида плавания. Главное требование – изменение частоты вращения гребного винта в широком диапазоне для своевременного изменения режимов его работы при изменении условий плавания.

Большинство ледоколов включают системы на постоянном токе. Такие установки получили распространение благодаря простоте регулирования скорости гребных электродвигателей, а также высокой надежности.

Появление электронных преобразователей электрической энергии позволило все эти преимущества применять наряду с преимуществами систем на переменном токе в гребных электрических установках двойного рода тока. Это привело к значительному улучшению характеристик

таких систем. ГЭУ по системе *синхронный генератор – неуправляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока* удачно сочетают в себе простоту управления скоростью гребного двигателя в широком диапазоне и уменьшение массогабаритных параметров такой системы. Уменьшение количества генераторов также напрямую увеличивает надежность такой системы.

На сегодняшний день все же подавляющее большинство гребных электроустановок работают на постоянном токе, выполненные по системе *генератор – двигатель (Г–Д)*. Такая система позволяет регулировать скорость электродвигателя в широких пределах. В такой гребной электроустановке ГЭД получают питание от отдельных генераторов. Чаще всего возбуждения двигателей и генераторов является независимым. Для возбуждения электрических машин применяются специальные возбудители, кроме отдельных случаев с питанием от судовой электроэнергетической установки.

В основе такой системы – регулирование гребного электродвигателя путем изменения напряжения якоря. Преобразователем постоянного напряжения является генератор постоянного тока. Изменение частоты вращения электродвигателя может осуществляться при изменении напряжения генераторов или магнитного потока электродвигателя с одновременным изменением напряжения генераторов. Изменение направления вращения гребного двигателя может происходить при помощи изменения как направления тока в якоре электродвигателя, так и его магнитного потока [1].

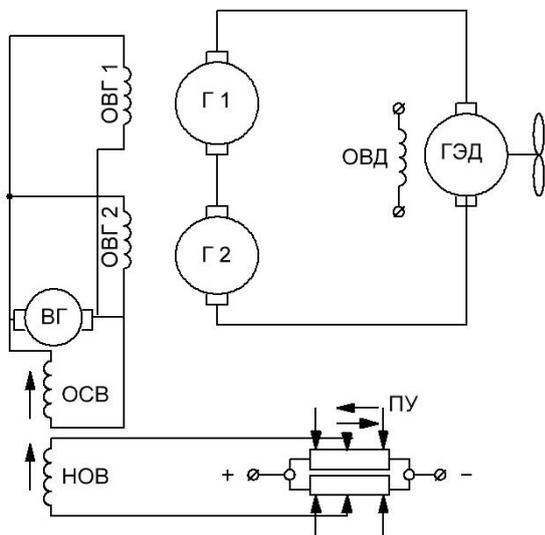


Рис. 1. Принципиальная схема ГЭУ

Принципиальная схема ГЭУ по системе *генератор – двигатель* изображена на рис. 1.

В данной схеме изменение скорости вращения гребного электродвигателя осуществляется путем изменения тока возбуждения возбудителя в его независимой обмотке (НОВ).

Изменение тока происходит с помощью реостата на посту управления (ПУ). Также ПУ отвечает за изменение направления магнитного потока и вследствие этого изменения направления вращения ГЭД.

Наиболее часто в схемах гребных электрических установок применяется последовательное соединение главных машин, работающих на разные гребные валы. Последовательное соединение является нормальным режимом работы ГЭУ и не требует сложной системы управления.

Параллельное соединение главных генераторов требует сложной схемы регулирования

с возможностью точной синхронизации, а также распределения мощности между генераторами в широком диапазоне от минимальной до максимальной.

Наряду с применением уравнивающих соединений необходимо также наличие систем регулирования для приводных двигателей, позволяющих поддерживать постоянство частоты вращения при изменении нагрузок на валу гребного двигателя.

Далее представлен процесс моделирования гребной электрической установки на постоянном токе по системе *генератор – двигатель*. На первом этапе моделирования были приняты следующие допущения:

1. Не учитываются механические потери, упругие деформации и зазоры в механических соединениях.
2. Пренебрегается влияние вихревых токов, гистерезиса, изменения коэффициента самоиндукции.
3. Пренебрегается влияние реакции якоря.
4. Принята линейная зависимость магнитного потока от тока возбуждения.
5. Магнитный поток ГЭД остается постоянным и равным номинальному.
6. Механическая характеристика гребного винта квазистационарная и квадратичная.

На рис. 2 показана модель гребной установки. Модель состоит из четырех блоков. Блок 1 представляет собой приводной двигатель. В рамках разработки данной модели было принято

использовать электродвигатель переменного тока с питанием от трехфазной сети бесконечной мощности. Так как система предполагает работу приводного двигателя с неизменной частотой, а моделирование двигателя внутреннего сгорания не имеет практического применения в данной модели, то данное решение является целесообразным. Блок 2 представляет собой главный генератор постоянного тока, соединенный механически с приводным двигателем. Блок 3 представляет собой гребной электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Электродвигатель получает питание от генератора 2 и регулируется изменением его напряжения. Блок 4 является совокупностью измерительных элементов. В рамках моделирования производилось отслеживание следующих характеристик: ток возбуждения генератора, напряжение генератора, ток электродвигателя, частота вращения двигателя, момент двигателя [2].

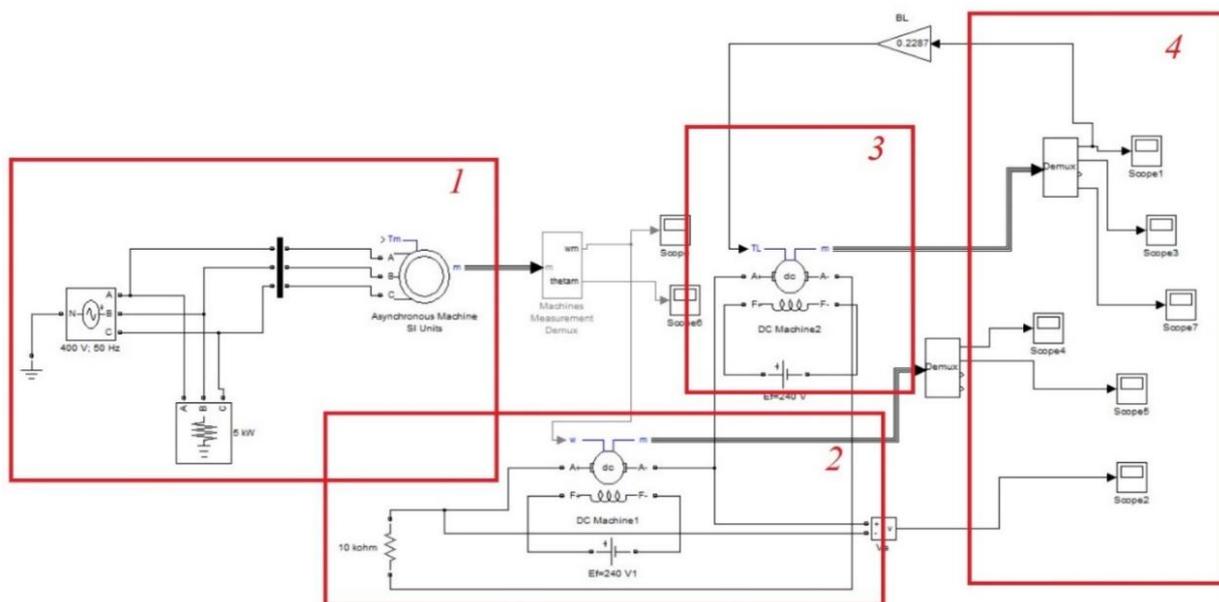


Рис. 2. Модель гребной электрической установки

Для проведения экспериментов по работе ГЭУ в различных режимах необходимо выполнить следующие задачи. Во-первых, необходимо получить модель установки, параметры которой соответствуют параметрам реальной системы, применяемой на судах. Рабочие диаграммы системы найти в открытом доступе практически невозможно. Выходом из сложившейся ситуации может быть сравнение полученных характеристик в результате моделирования с каталожными данными [3] электрической машины.

Во-вторых, необходимо произвести эксперимент по регулированию скорости электродвигателя. Главной особенностью рассматриваемой системы является возможность плавного регулирования частоты, поэтому для проведения эксперимента возможно производить несколько запусков системы с регистрацией полученных данных. Построенные диаграммы могут свидетельствовать о наличии данного режима в системе (рис. 3).

Представленная модель имеет как положительные, так и отрицательные качества. Основные недостатки связаны с недостатками именно рассматриваемой системы. Состав ГЭУ по представленной схеме предполагает большое количество электрических машин. Это связано с потерями в КПД всей системы, а также ухудшением габаритных показателей [4].

Также данная модель не предусматривает работу всей системы со всеми переключениями питания между контурами и включение нескольких генераторов на гребной электродвигатель.

На следующем этапе моделирования планируется создать систему, состоящую из нескольких контуров с возможностью последовательного включения генераторов.

Главным положительным качеством модели является ее идентичность с реальной системой. Так как система *генератор – двигатель* получила широкое распространение, в дальнейшем возможно путем изменения параметров системы проводить эксперименты на ГЭУ различных судов. Также подобный подход для изменения частоты вращения ГЭД может применяться в других,

более современных системах. Таким образом, при дальнейшей модернизации модели можно работать с более совершенными системами. Например, при введении модели полупроводникового преобразователя напряжения можно получить модель ГЭУ двойного рода тока.

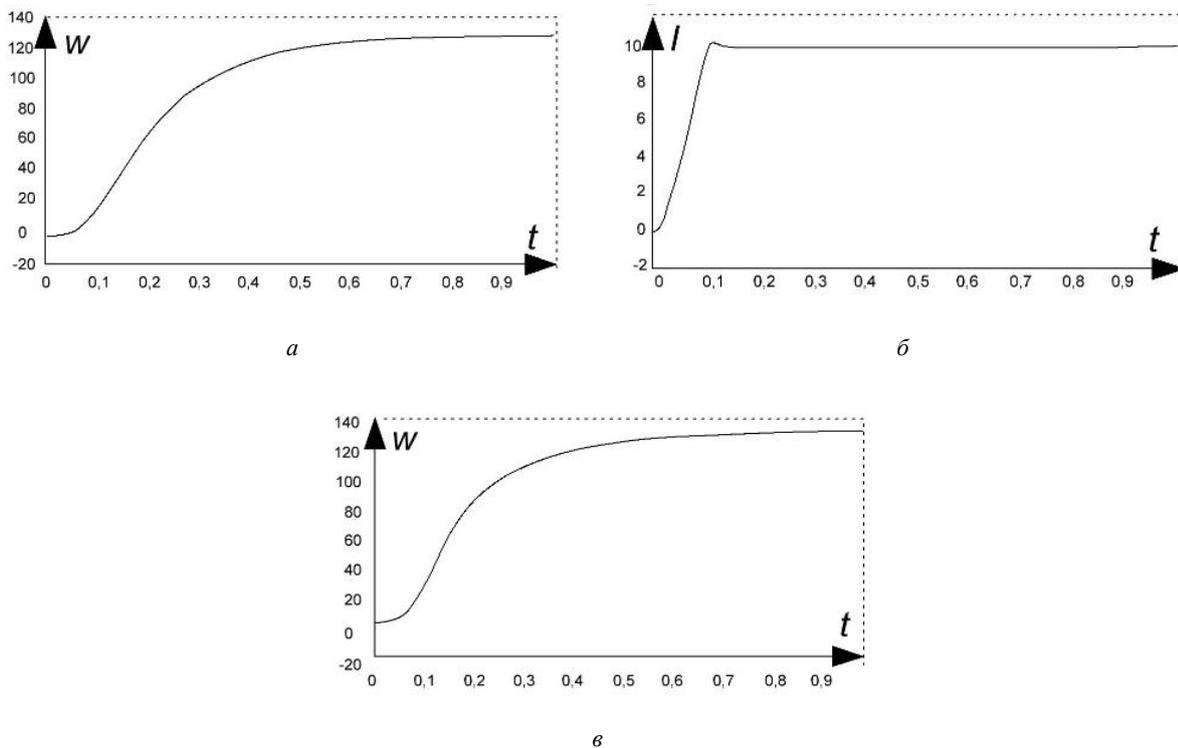


Рис. 3. Результаты моделирования:  
а – ток электродвигателя; б – скорость электродвигателя; в – момент электродвигателя

### Литература

1. Акулов Ю.И. Гребные электрические установки: Учебник. – М.: Транспорт, 1982. – 264 с.
2. Труднев С.Ю. Разработка компьютерной модели параллельной работы генераторного агрегата и трехфазного безынерционного источника питания // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2015. – Т. 30, № 2. – С. 191–197.
3. Труднев С.Ю. Компьютерное моделирование полупроводниковых преобразователей // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 52. – С. 18–26.
4. Марченко А.А., Портнягин Н.Н. Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя // Современные проблемы науки и образования. – Пенза, 2012. – № 6. – С. 125–125.

УДК 621.317.3

**П.Б. Терновский, М.Ю. Лицкан**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kletn@yandex.ru*

### **ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРКИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Для обеспечения единства измерений независимо от того, кем, где, когда, в каких условиях они проведены, необходимо иметь уверенность в том, что погрешность измерений не превысила пределов, установленных в соответствии с поставленной измерительной задачей. С этой целью пользуются понятием «достоверность измерений», представляющим искомую величину известной с заданной доверительной вероятностью. Единство измерений достигается единообразием применяемых средств измерений и установленных методик выполнения измерений. Для обеспечения данного требования необходимо внедрение в систему эксплуатации судового электрооборудования комплекса метрологических мероприятий, направленных на приведение в соответствие единства измерений. В статье рассматриваются общие вопросы организации поверки контрольно-измерительных приборов (КИП) и диагностики состояния судового электрооборудования на основе анализа эксплуатационных параметров.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, электрические параметры, электрические измерения, математическая вероятность, диагностика, надежность, безопасность.

**P.B. Ternovsky, M.Yu. Litscan**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: kletn@yandex.ru*

### **ORGANIZING THE VERIFICATION OF CONTROL AND MEASURING INSTRUMENTS AND IMPROVING THE OPERATION OF SHIPBOARD ELECTRICAL EQUIPMENT**

To ensure the uniformity of measurements, regardless of who, where, when, under what conditions they were carried out, it is necessary to have confidence that the measurement error did not exceed the limits established in accordance with the assigned measuring task. For this purpose, the concept of “measurement reliability” is used, which represents the desired value known with a given confidence level. The uniformity of measurements is achieved by the uniformity of the used measuring instruments and the established measurement procedures. To meet this requirement, it is necessary to introduce a complex of metrological measures into the operation system of ship electrical equipment aimed at bringing the uniformity of measurements into compliance. The article discusses the general issues of organizing the verification of instrumentation (instrumentation) and diagnostics of the state of ship electrical equipment based on the analysis of operational parameters.

**Key words:** electric power system, electrical parameters, electrical measurements, mathematical probability, diagnostics, reliability, safety.

Поверка средств измерений является неотъемлемой частью эксплуатации судовой энергетической системы и является собой один из значимых и необходимых процессов, обеспечивающих безопасную и безаварийную эксплуатацию механизмов и систем на кораблях и судах флота [1–4].

В настоящее время на кораблях и судах используются различные виды и типы средств измерений, предназначенных для контроля и снятия показаний, и различных параметров. Различаются они не только по видам и типам, классу точности, диапазоном измерений, но и по принципу действия и их устройству. Важное значение также имеет конструктивное исполнение, доступность и простота использования прибора. Кроме того, большое значение имеют показатели ремонтпригодности, безотказности и надежности работы.

Процесс проведения поверки достаточно трудоемок как по времени, так и по ресурсам, но ее необходимость безусловна. Именно точность показаний и их достоверность являются показателями, от которых зависит долговечность работы механизмов и оборудования. Сам процесс поверки – это проверка работоспособности системы контроля и диагностирования корабля или судна, так как контрольно-измерительные приборы являются неотъемлемой частью системы диагностирования систем и механизмов [5, 6].

Трудоемкость поверки заключается в постоянном отключении и остановке ответственных механизмов, агрегатов и систем на длительное время, связанное с демонтажем поверяемых средств измерений, для проведения поверок. Значимость в достоверности и точности показаний поверяемых приборов, предназначенных для повышения диагностирования и живучести различных видов механизмов, судовой сети, различных потребителей, самих кораблей и судов. Именно по данным контрольно-измерительных приборов, позволяющим непрерывно отслеживать и контролировать показания, мы можем определить необходимость проведения и срочность работ: технического обслуживания, ремонта или работы механизмов в предаварийном состоянии, что позволяет предпринять какие-либо действия до наступления полной остановки, аварийной ситуации и дорогостоящего простоя и ремонта. Тем самым мы контролируем техническое состояние судовой энергетической системы, обеспечивая ее непрерывное диагностирование [7–9].

Диагностическая система позволяет непрерывно контролировать техническое состояние судовых механизмов и давать рекомендации по дальнейшей эксплуатации [10].

Основной задачей является дальнейшее развитие методов автоматического контроля и диагностики судовых механизмов (своевременное выявление дефектов, их локализация в основных узлах и конфигурациях) и прогнозирование состояния средств.

Система диагностики, эволюционировавшая в последние десятилетия в связи с появлением и бурным развитием измерительной и информационной техники, требует внедрения в них систем автоматического контроля технического состояния механизмов судовой энергетической системы, методов диагностирования, разработки новых систем, схем и методик поверки системы диагностирования, приборов и механизмов [11–14].

Основной задачей технической диагностики является раннее выявление возможных неисправностей, поломок, определение технического состояния, исключение аварий и других дефектов без демонтажа. Раннее выявление дефектов позволяет скорректировать программу технического обслуживания и ремонта, причем сделать это можно при благоприятных условиях, например, во время стоянки судна в порту, с целью снижения потребности в запасных частях деталей за счет их своевременной замены, повышения надежности и эффективности эксплуатации.

Теоретические основы диагностики основаны на зависимостях между состояниями технического объекта и его представлениями диагностических параметров – характеристик. В процессе эксплуатации объекта, как правило, диагностика проводится в условиях ограниченных данных на основе различных изменяющихся показателей (переменных). В этих условиях важная роль в распознавании дефектов отводится диагностическим моделям: функциональной зависимости системы от искомым характеристик состояния управляющих переменных.

Современные компьютерные программы позволяют осуществлять автоматический контроль и техническую диагностику любых технических средств. Существует несколько систем мониторинга и диагностики оборудования. Практически все они реализуют один и тот же принцип: непрерывная или периодическая регистрация эталонных параметров для их отображения на экране (устройстве) – индикации, сравнение результатов контрольных показателей, полученных при приемодаточных испытаниях, в зависимости от результатов контрольных показателей, публикация предложений и рекомендаций по мерам, направленным на предотвращение отказов и остановок [15].

В последние годы возросли международные требования безопасности на море. Использование морских силовых установок ставит во главу угла необходимость обеспечения безопасной эксплуатации комплексов.

Одним из наиболее актуальных вопросов, касающихся безаварийной работы судовых механизмов, является определение их технического состояния на основе диагностики без демонтажа и разбора. Для этого регулирующие органы и операторы должны разработать и усовершенствовать требования к схемам поверки, методикам, сертификации и их компонентам. Поэтому разработку требований к их контролю на основе диагностики технической пригодности следует считать важным направлением в целом для повышения надежности эксплуатации технических средств.

Энергетическое оборудование судна зависит от общей установленной мощности, потребителей электроэнергии, назначения судна и основных видов транспорта, потребления энергии в зависимости от конкретного назначения судна.

Основными направлениями развития и совершенствования поверки средств измерений, ее качества и эксплуатации систем электроэнергетики судов являются:

1. Расширение применения комплексной автоматизации морских установок.
2. Повышение надежности, гибкости и экономичности электроустановок и станций, переход на высокие частоты, высокие напряжения. Для повышения экономичности рекомендуется расширить использование главного двигателя в качестве одного источника энергии, то есть использовать подвесные генераторы, расширить применение рекуперативных турбогенераторов на больших судах.
3. Повышение качества электрической энергии за счет совершенствования систем автоматической стабилизации и улучшения защиты от аварий всех видов.
4. Совершенствование конструкции машин и оборудования с помощью новых материалов (например, изоляции), износостойких размыкающих контактов, усовершенствование дугогасящих коммутационных аппаратов, использование бесконтактных устройств.
5. Совершенствование ремонта и эксплуатации электрооборудования, своевременное проведение смазки, очистки, покраски, сушки, замены изношенных деталей, своевременная наладка машин и оборудования, аккумуляторов, техническое обслуживание, использование оборудования со встроенными диагностическими системами.

Автоматизация морской энергетической установки требует автоматического управления источниками энергии и их использованием. В этом случае предварительная подготовка, пуск, режим нагрева и мощность двигателя для приема нагрузки будут автоматизированы.

Используются дизель-генераторное оборудование, автоматические системы стабилизации скорости, автоматизированы контроль технологического процесса и сигнализация технического состояния, а дистанционное управление осуществляется на мостике или на центральном посту управления.

Процесс распределения и потребления электроэнергии состоит в основном из контрольно-эксплуатационных средств судовой электростанции. Количество работающих агрегатов изменяется автоматически в зависимости от нагрузки и представляет собой резервную перегрузку основных агрегатов, автоматизирует разгрузку работающих агрегатов путем отключения вторичных приемников, а при аварийной остановке дизель-генераторов агрегаты автоматически включаются в резервные источники питания [16].

Полная автоматизация разрабатывается с использованием управляемых датчиков измерения величин, контрольных приборов и системных логических устройств. Автоматизация производственных процессов является основным путем технологического развития и одним из наиболее эффективных способов повышения производительности труда. Внедрение судовой автоматики позволяет значительно повысить КПД и срок службы силовых установок, снизить экипажные и эксплуатационные нагрузки и расходы, улучшить маневренные характеристики судов, облегчить работу моряков, а также способствовать достижению основной цели – снижению стоимости транспортных, навигационных и эксплуатационных затрат.

### Литература

1. Белов О.А., Парфенкин А.И. Обзор основных факторов снижения безопасности сложных технических систем // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2016. – № 35. – С. 11–14.
2. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 80–83.
3. Белов О.А. Общий алгоритм развития опасных ситуаций в судовых условиях: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. // Наука, образование, инновации: пути развития. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 51–54.
4. Белов О.А. Процесс формирования постепенного отказа в технических системах // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Шестой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2015. – С. 44–49.

5. Метрология, стандартизация и сертификация / *А.М. Радкевич, Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов.* – М.: Высшая школа, 2004. – 767 с.
6. *Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М.* Основы метрологии и электрические измерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
7. *Белов О.А.* Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 96–102.
8. *Кротенко Д.С., Белов О.А.* Моделирование процессов оптимизации режимов судовой электроэнергетической системы при электропитании от береговой сети // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 77–80.
9. *Белов О.А., Богославский И.С., Преданцев Э.А.* Оптимизация элементной базы системы автоматизации золотоизвлекающей фабрики ЗАО «Тревожное зарево» // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Седьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2016. – С. 112–114.
10. *Белов О.А., Белова Е.П.* Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.
11. *Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А.* Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6–19.
12. *Сивоконь В.П., Лапишов Д.В., Белов О.А.* Диагностические признаки нестандартного проявления нелинейности в электрических сетях // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2019. – № 48. – С. 18–27.
13. *Пантина А.И., Белов О.А.* Перспективы методики инфракрасной диагностики силовых трансформаторов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Восьмой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – С. 102–104.
14. *Пантина А.И., Белов О.А.* Контроль технического состояния судовых асинхронных двигателей на основе характеристик внешнего электромагнитного поля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 32–36.
15. *Белов О.А.* Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 5–9.
16. *Белов О.А., Мясников Г.С.* Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 73–76.

УДК 62-791.2

**И.А. Яблуновский, В.А. Перминов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: iliya12345xs@gmail.com*

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ТОПЛИВА В СУДОВЫХ ТАНКАХ**

Вопрос контроля уровня топлива всегда был актуален. Топливные ресурсы не бесконечны и всегда должны подлежать строгому учету. Отклонения от необходимого уровня топлива могут вызвать сбой в работе и даже вывод устройства, предприятия из эксплуатации. Чтобы обеспечить безопасность и рентабельность технологического процесса, необходимо оснастить предприятие (корабль) измерительными приборами, способными обеспечить надежное и точное измерение уровня топлива.

**Ключевые слова:** средства измерения, способы измерения, техническая эксплуатация, эффективность, надежность, безопасность.

**I.A. Yablunovski, V.A. Perminov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: iliya12345xs@gmail.com*

**TECHNICAL SUPPORT  
FOR MEASUREMENT AND CONTROL OF FUEL LEVEL IN SHIP TANKS**

The issue of fuel level control has always been relevant. Fuel resources are not infinite and must always be subject to strict accounting. Deviations from the required fuel level can cause malfunctions and even the device to be withdrawn, enterprises to be out of operation. To ensure the safety and profitability of the technological process, it is necessary to equip the enterprise (ship) with measuring instruments capable of providing reliable and precise fuel measurement.

**Key words:** measuring instruments, measuring methods, technical operation, efficiency, reliability, safety.

Измерение и контроль уровня топлива, как правило, используются в коммерческом учете, и любая критическая погрешность может нанести серьезный ущерб предприятию. Также контроль уровня должен осуществляться с целью безопасности, ведь наполнение открытых резервуаров сверх расчетной емкости может создать угрозу для безопасности и привести к нежелательному разливу нефти, что пагубно отразится на экологии [1–3].

Если установить правильные измерительные приборы и должным образом их обслуживать, то можно существенно повысить следующие показатели на судне, такие как эффективность производства и потребления электроэнергии, сокращение затрат на топливо и эксплуатацию судна, обеспечение безаварийной эксплуатации двигателей, повышение безопасности судна и груза, а также эффективность использования судна [4, 5].

Общие требования к методам выполнения измерений массы нефти и нефтепродуктов регламентированы ГОСТ 8.587-2019. Согласно этому нормативу, выделяют два вида способов измерения: прямые и косвенные. Каждый из этих методов подразделяется на динамический и статический [6–8].

Прямой метод подразумевает использование дорогих и сложных измерительных приборов, которые в свою очередь, как правило, используются на узкопрофилированных предприятиях, связанных с нефтепродуктами. Прямой динамический метод основан на применении показаний расходомеров, а прямой статический подразумевает использование весов для взвешивания.

Косвенно динамический способ измерения предусматривает использование счетчиков объема, а косвенный статический – замеров уровня налива в цистернах и резервуарах, с последующим определением массы расчетным путем при помощи таблиц калибровочного или градуированного типа, позволяющих по уровню налива рассчитать объем продукта.

Также теоретически можно отметить еще один метод, применяющийся при отслеживании уровней, достигших критических точек. Подобный метод называется определением уровня в системе с уставками. Если уровень жидкости достигает определенной уставки, то прибор приведет в движение механизм или включит реле для осуществления корректировки или регулировки системы.

В природе существуют два вида измерения уровня жидкости – это контактный и бесконтактный, применение которых основано на использовании уровнемеров определенной конструкции.

При контактном измерении используют гидростатический, емкостной, поплавковый, визуальный или кондуктометрический уровнемеры. Бесконтактные измерения основаны на применении ультразвуковых, излучающих или электромагнитных устройств, а также устройства барботажного (пьезометрического) типа [9–11].

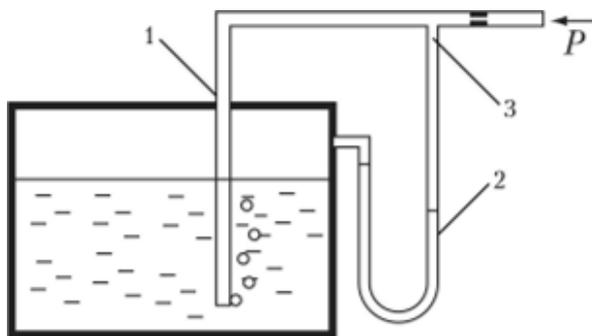


Рис. 1. Гидростатический уровнемер:  
1 – пьезометрическая трубка; 2 – диафанометр;  
3 – дрессель

Гидростатический метод измерения уровня основан на том, что в жидкости существует гидростатическое давление, пропорциональное уровню, которое преобразуется в стандартный токовый сигнал. Схема гидростатического измерения приведена на рис. 1.

Преимуществом гидростатических уровнемеров является простота монтажа, относительно низкая погрешность и невысокая стоимость, широкий интервал измерения, возможность работы с вязкими жидкостями при большом избыточном давлении.

Недостатками являются необходимость компенсации атмосферного давления, недопустимость боковых перемещений, засорение измерительной мембраны, необходимость обогрева прибора в зимнее время, изменение плотности жидкости может стать причиной ошибки измерения.

Принцип действия емкостных уровнемеров основан на зависимости электрической емкости системы электрод – измерительная среда от изменения уровня. При этом жидкости, уровень которых измеряется, могут быть как проводниками, так и диэлектриками (рис. 2).

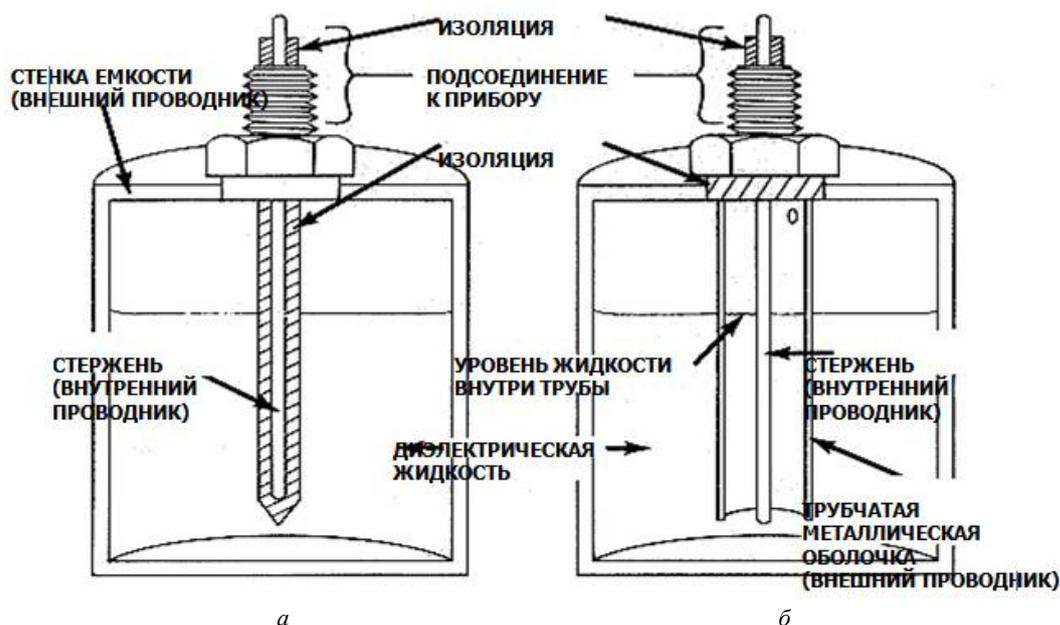


Рис. 2. Схема емкостного уровнемера: а – без изоляционной оболочки; б – с изоляционной оболочкой

Преимуществом является повышенная чувствительность, широкий диапазон давления в емкости, простая конструкция без подвижных элементов и высокая надежность.

К недостаткам можно отнести сложность настройки для каждого отдельного вещества, необходимость в дополнительной изоляции при работе с диэлектриками, невозможность работы с веществами, образующими пленку на поверхности, а также с жидкостями, имеющими осадок, и самое важное – невозможность использования во взрывоопасной среде.

Принцип действия поплавковых уровнемеров основан на возникновении выталкивающей силы при погружении поплавка в жидкость (закон Архимеда), которая либо преобразуется в стандартный токовый сигнал, либо в пневматический для последующей передачи информации на вторичные приборы. Отличительными качествами таких уровнемеров являются простота конструкции и широкий диапазон измерений. Также стоит отметить хорошую точность и надежность. Однако в средах, образующих налипание или отложение осадка на поплавок, такие устройства применять нельзя, что является существенным недостатком. Также к недостаткам следует отнести необходимость подогрева прибора в зимнее время. Простейшая схема принципа работы данного прибора представлена на рис. 3.

На рис. 4 приведена схема визуального способа измерения уровня жидкости. Этот способ в эксплуатационном плане является самым простым. Принцип действия основан на свойствах сообщающихся сосудов. К технологическому аппарату через запорные вентили подключается стеклянная трубка, по которой и наблюдается столб жидкости.

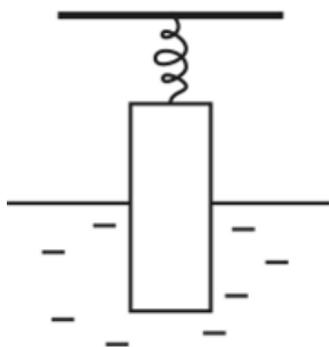


Рис. 3. Принцип действия поплавкового уровнемера

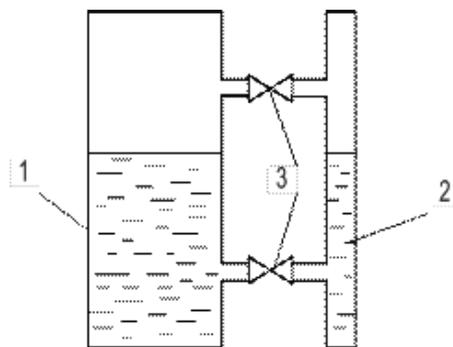


Рис. 4. Принцип действия визуального уровнемера

Такое устройство отличается хорошей точностью и надежностью. Недостатки связаны с возможностью загрязнения трубки, вплоть до полного исчезновения видимости уровня, а также с возможностью образования воздушных пузырьков внутри стеклянной трубки, что устраняется с помощью дренажного вентиля.

Широкое распространение получили также кондуктометрические уровнемеры. Схема данного уровнемера представлена на рис. 5. Она достаточно проста и представляет собой два электрода, глубина погружения которых в жидкости и определяет текущее значение ее уровня, где выходным параметром преобразователя является его сопротивление или проводимость.

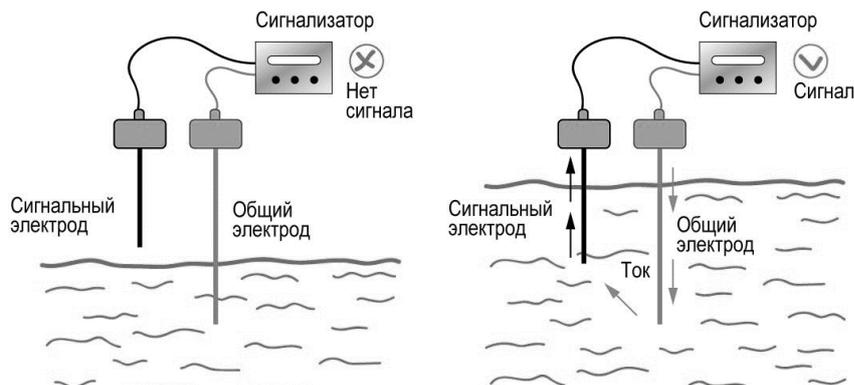


Рис. 5. Принцип действия кондуктометрического уровнемера

Достоинствами данного устройства являются отсутствие движущихся механических частей, возможность измерять при высоком давлении и температуре, а также простота в обслуживании и регулировке.

Главным недостатком такого уровнемера является недостаточная точность измерения из-за непостоянства площадей и поперечных сечений электродов, а также образования на электродах пленки, в результате чего чувствительность уровнемера резко снижается.

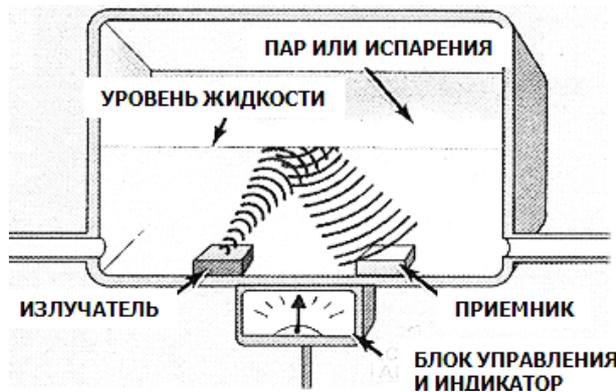


Рис. 6. Принцип действия акустического (ультразвукового) уровнемера

Еще одним видом измерительных устройств являются акустические или ультразвуковые уровнемеры. Принцип действия основан на локализации уровня звуковыми импульсами, проходящими через газовую среду, отходящую над контролируемой жидкостью, и явлении отражения этих импульсов от границы раздела сред. Принцип работы акустического (ультразвукового) уровнемера отражен на рис. 6.

Такие уровнемеры обладают высокой точностью, надежностью и возможностью эксплуатации в различных средах. У них может быть аналоговый или дискретный выход, то есть датчик может

ограничивать заполнение по достижению определенной точки или отслеживать его постоянно. Отсутствие подвижных частей и низкие затраты на техническое обслуживание повышают область применения данных устройств.

Недостатком же является возможность работы только при нормальном атмосферном давлении и невозможность работы в вакууме. Также невозможно измерять уровень в пенящихся жидкостях.

В ответственных системах измерения часто используют радиоактивные уровнемеры. Действие таких уровнемеров основано на поглощении  $\gamma$  (гамма) лучей, проходящих через слой вещества. Такие уровнемеры очень надежны и также имеют высокую точность.

Их главными недостатками являются необходимость обеспечения персонала дополнительной защитой и безопасностью при работе с приборами и невозможность измерения уровня пищевых жидкостей. Также радиоактивные уровнемеры имеют высокую стоимость. Общая схема измерения с помощью радиоактивного уровнемера представлена на рис. 7.

На рис. 8 представлена структурная схема барботажного (пьезометрического) уровнемера. Его принцип действия основан на преобразовании гидростатического давления жидкости в давление воздуха, подаваемого от постороннего источника, барботирующего через слой жидкости. Отличительной особенностью данного устройства является наличие чувствительного элемента, не находящегося в контакте с жидкостью, который воспринимает гидростатическое давление через воздух. Барботажный (пьезометрический) уровнемер может применяться в различных жидкостях.

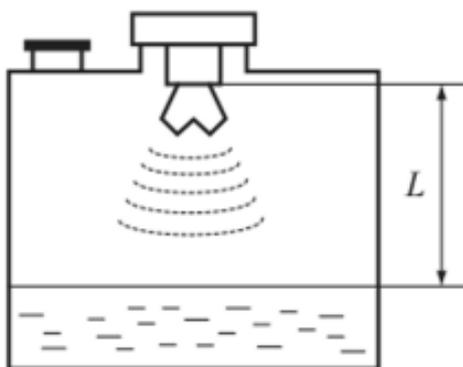


Рис. 7. Принцип действия радиоактивного уровнемера

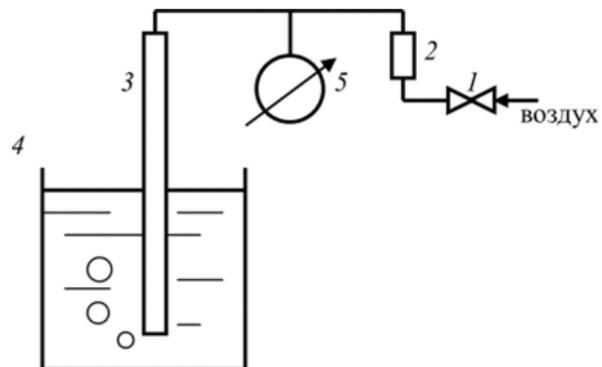


Рис. 8. Структурная схема барботажного (пьезометрического) уровнемера: 1 – дроссель; 2 – ротаметр; 3 – пьезометрическая трубка; 4 – резервуар; 5 – манометр

Недостатком этого устройства является возможность некорректного измерения в связи с изменением структуры среды. Кроме того, при отрицательных температурах требуется дополнительный обогрев этой системы измерения.

Результаты проведенного анализа технических средств измерения и контроля уровня жидкости в ограниченных емкостях представлены в таблице.

**Рабочие свойства основных типов уровнемеров**

Тип уровнемера	Надежность	Точность	Зависимость от окружающей среды	Простота использования	Стоимость
Гидростатический	+	–	–	–	+
Емкостной	+	+	+	–	+
Поплавковый	+	+	–	+	+
Визуальный	+	+	+	–	+
Кондуктометрический	+	–	+	+	+
Акустический (ультразвуковой)	+	+	+	+	+
Радиоактивный	+	+	–	–	–
Барботажный (пьезометрический)	+	–	–	+	+

Как видно из таблицы, все приведенные типы уровнемеров соответствуют требованиям надежности, что позволяет рассматривать возможность их использования в судовых условиях. Также рассмотренные технические средства в большинстве случаев обладают высокой точностью измерения, что обеспечивает качественное решение задачи измерения и контроля уровня топлива в судовых танках. Следует отметить и приемлемую стоимость данного оборудования при проектировании и установке на судне.

С точки зрения технической эксплуатации наиболее оптимальным вариантом является применение поплавковых, визуальных и акустических уровнемеров. Визуальный способ измерения и контроля уровня жидкости целесообразно использовать в качестве дополнительного, запасного варианта. Поплавковый и ультразвуковой уровнемеры целесообразно использовать в качестве рабочих датчиков при разработке автоматизированных систем измерения и контроля уровня топлива в судовых танках. Возможность автоматизации системы измерения и контроля уровня топлива в судовых танках является важным показателем для рассматриваемых средств измерения [12].

Особое внимание при этом следует обратить на рабочие характеристики ультразвуковых уровнемеров. Высокие показатели надежности, точности измерений и универсальности для измерения и контроля уровня различных видов горюче-смазочных материалов обуславливают широкие перспективы применения данных устройств на кораблях и судах.

Таким образом, задача измерения и контроля уровня топлива в судовых танках имеет достаточное техническое обеспечение. Для повышения эффективности измерительных систем в судовых условиях необходима качественная адаптация представленных устройств и их проектирование с учетом особенностей эксплуатации в море. Комплексная реализация данного подхода позволяет повысить экономичность, надежность и безопасность технической эксплуатации морского транспорта [13, 14].

### Литература

1. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы Десятой национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 80–83.
2. Белов О.А. Оценка безопасности эксплуатации судовых энергетических установок // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2017. – № 42. – С. 6–10.
3. Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.

4. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 5–9.
5. Белов О.А. Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – № 30. – С. 11–16.
6. ГОСТ 8.587-2019 Государственная система обеспечения единства измерений. Масса нефти и нефтепродуктов. Методики (методы) измерений. – М.: Стандартинформ, 2019. – 46 с.
7. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.
8. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 287 с.
9. ГОСТ 24802-81 ГСИ. Приборы для измерения уровня жидкости и сыпучих веществ. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 7 с.
10. Бобровников Г.Н., Катков А.Г. Методы измерения уровня. – М.: Машиностроение, 1977. – 165 с.
11. Винокуров Б.Б. Современная уровнеметрия жидких сред. – Томск: Томский политехнический университет, 2014. – 118 с.
12. Белов О.А., Марченко А.А., Труднев С.Ю. Анализ расчетно-аналитических методов прикладных задач технической безопасности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 4. – С. 7–15.
13. Белов О.А., Швецов В.А. К вопросу о повышении экологической безопасности судов при долговременном стояночном режиме // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2018. – С. 119–121.
14. Белов О.А. Задачи оценки безопасного уровня электрохимической защиты корпуса в процессе эксплуатации морских судов // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Девятой всерос. науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2018. – С. 17–20.

### СЕКЦИЯ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.43

**А.С. Горячкова, С.Ю. Труднев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: alinagolden01@mail.ru*

#### ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА)

В материале рассмотрен двигатель Стирлинга. Приведены схемы рабочих процессов, изложен принцип действия, кратко изложена история создания. Выявлены основные недостатки и преимущества использования двигателя Стирлинга как двигателя внутреннего сгорания. Произведен анализ возможных областей применения двигателя Стирлинга и потенциальных фирм-производителей.

**Ключевые слова:** двигатель Стирлинга, двигатель внутреннего сгорания, датчик, КПД.

**A.S. Goryachkovskaya, S.Y. Trudnev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: alinagolden01@mail.ru*

#### INTERNAL COMBUSTION ENGINE (STIRLING ENGINE)

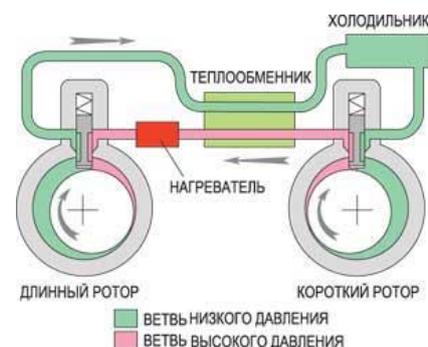
The article discusses the Stirling engine. The diagrams of working processes are given, the principle of operation is stated, the history of creation is briefly stated. The main disadvantages and advantages of using the Stirling engine as an internal combustion engine are revealed. The analysis of possible areas of application of the Stirling engine and potential manufacturing firms is carried out.

**Key words:** Stirling engine, internal combustion engine, sensor, efficiency.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют столетнюю историю применения. Благодаря высоким показателям энергоэффективности, объемам продаж и информативности конструкции конкурентов и аналогов у ДВС фактически нет, однако за последние сто лет были спроектированы многие типы двигателей, имеющих КПД гораздо выше и более экологичные. Причиной, по которой аналоги не могут конкурировать с ДВС, является деятельность монопольных компаний-гигантов: РосНефть, General Motors, Tesla Motors, Ford Motors, производящих топливо для работы ДВС. Одной из альтернатив ДВС является двигатель Стирлинга, который был исследован на кафедре «Энергетические установки и электрооборудование судов». В результате исследования были выявлены особенности работы двигателя Стирлинга, его недостатки и преимущества.

Двигатель Стирлинга (ДС) (рисунок) является тепловой машиной, преобразующей подводимую к ней тепловую энергию в механическую на выходном валу [1–2].

Шотландский ученый Роберт Стирлинг изобрел ДС в 1816 г. в городе Эдинбурге за восемьдесят лет до изобретения дизельного двигателя, поэтому ДС был очень популярен в XIX в.



Двигатель Стирлинга

Отличительным и главным преимуществом ДС является его работа от любого теплоносителя: от обычного перепада температур до ядерного нагревателя и угольной печи.

Второстепенным, но немаловажным преимуществом, является простая конструкция ДС. Он не требует дополнительных систем, в том числе систем запуска, то есть не нуждается в стартере. Принцип управления скоростью вращения позволяет исключить применение коробки передач для такого двигателя. Отсутствие коробки передач и стартера значительно увеличивает ресурс в десятки и сотни часов непрерывной работы такого двигателя.

Немаловажным преимуществом является экономичность ДС. В системах преобразования солнечной энергии в электричество ДС могут дать КПД до 31,25%. При цикле Карно КПД «стирлингов» достигает 70%. КПД такого двигателя не зависит от скорости двигателя.

Амплитуда вибраций ДС составляет менее 0,0038 м, так как двигатель не имеет системы выхлопа и не шумит. Сам по себе двигатель не имеет никаких систем или процессов, способствующих грязному выхлопу в атмосферу или вообще загрязняющих окружающую среду, поэтому ДС более экологичен, чем ДВС. Экологичность ДС обусловлена источником тепла, полнота сгорания топлива проще, чем в ДВС.

Наряду с преимуществами, как и у любого устройства, у ДС есть и ряд недостатков. Основным недостатком является его массогабаритный показатель. Снизить громоздкость и материалоемкость ДС можно, получив характеристики, схожие с ДВС за счет высоких давлений и особых видов рабочего тела (водорода и гелия).

Область применения двигателей Стирлинга имеет широкий спектр: от генераторных агрегатов до систем отопления. Так, например NASA в электроэнергетических системах планирует внедрить генераторы на основе ДС, работающие от радиоизотопных источников тепла. Благодаря тепловым насосам при сжигании газа или мазута выделяемое тепло может поступать в системы отопления. ДС является тепловой машиной, поэтому может применяться в холодильных установках, в качестве рабочего тела используется окружающий воздух, поэтому холодильные установки на основе ДС обладают большой экономичностью. Свойства ДС в составе холодильных машин применяют для охлаждения датчиков в сверхточных приборах [3].

Большие перспективы в применении ДС имеет и военная отрасль (к примеру, шведские подводные лодки оснащены ДС). В расплавах солей происходит большой выброс тепла, поэтому данный химический процесс можно использовать в теплоаккумуляторах с запасом энергии гораздо выше, чем химических. Такие аккумуляторы намного дешевле популярных аналогов.

В современных реалиях двигателя внутреннего сгорания устарели не только технически, но и морально. В связи с этим ДС имеет большие перспективы, так как большинство исследований разных стран нацелены на зеленые технологии, и за ними будущее. Ввиду своей экологичности, малотоксичности отработанных газов, унифицированности топлива, низкого уровня шума, вибраций, большого ресурса качественной характеристики крутящего момента ДС вполне способен заменить двигатели внутреннего сгорания.

В разных странах фирмы-гиганты, такие как Philips, STM Inc., Daimler Benz, Solo, United Stirling, уже начали производство и внедрение ДС в разные технологические системы с достаточно высоким КПД (до 45%), моторесурсом до 40 000 часов и мощностью до 1 200 кВт.

### Литература

1. Григорьев Е.А. Периодические и случайные силы, действующие в поршневом двигателе. – М.: Машиностроение, 2002. – 272 с.
2. Лабейш В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 79 с.
3. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 403 с.

УДК 303.447:622.625.6

**Е.Л. Игнаткина, А.В. Костенко**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: sel\_post@mail.ru*

### **ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ШАХТНЫХ ПОДВЕСНЫХ МОНОРЕЛЬСОВЫХ ДОРОГ**

В работе описан этап планирования эксперимента по исследованию коэффициента трения, возникающего при взаимодействии тормозной колодки и стенки монорельса во время торможения подвижного состава шахтной подвесной монорельсовой дороги. Приведены задачи, которые необходимо решить, выбраны факторы, и приведен алгоритм проведения эксперимента.

**Ключевые слова:** шахтная подвесная монорельсовая дорога, коэффициент трения, эксперимент, факторы, алгоритм.

**E.L. Ignatkina, A.V. Kostenko**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: sel\_post@mail.ru*

### **FEATURES OF PLANNING EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FRICTION COEFFICIENT OF BRAKE DEVICES OF MINING SUSPENDED MONORAILS**

The paper describes the stage of planning an experiment to study the coefficient of friction arising from the interaction of the brake shoe and the wall of the monorail during the braking of the rolling stock of the mine suspension monorail. The tasks that need to be solved are given, the factors are selected and the algorithm for the experiment is given.

**Key words:** mine suspension monorail, friction coefficient, experiment, factors, algorithm.

Экспериментальные исследования коэффициента трения являются важной составляющей частью исследований процесса торможения шахтных подвесных монорельсовых дорог (ШПМД), необходимых как для проверки основных положений и теоретических результатов, так и для получения данных для синтеза современных тормозных устройств, используемых в подвесных монорельсовых дорогах.

Одной из целей экспериментальных исследований является получение фактических значений тормозного усилия, развиваемого тормозным устройством ШПМД, и коэффициента трения, возникающего при взаимодействии поверхностей тормозной колодки и стенки монорельса во время торможения с учетом состояния поверхности стенки монорельса.

Цель статьи – спланировать экспериментальные исследования коэффициента трения, возникающего при взаимодействии поверхностей тормозной колодки и стенки монорельса во время торможения подвижного состава ШПМД.

Для планирования экспериментальных исследований необходимо решить следующие задачи:

- выбрать факторы, влияющие на коэффициент трения;
- спроектировать и изготовить установку для определения тормозного усилия и коэффициента трения в лабораторных условиях;
- выбрать измерительную аппаратуру;
- спланировать экспериментальное исследование определения влияния эксплуатационных факторов на коэффициент трения.

Тормозные и тяговые тележки современных ШПМД оборудуются, как правило, тормозными устройствами клещевого типа [2], как показано на рис. 1.

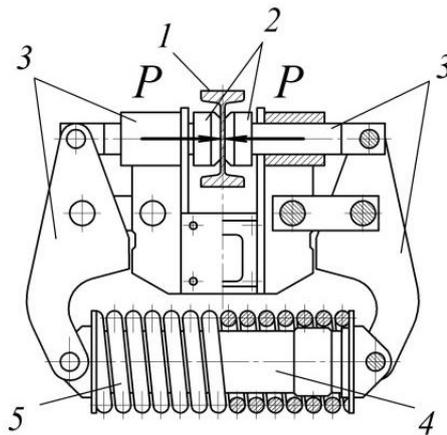


Рис. 1. Схема тормозного механизма ШПМД:  
1 – монорельс; 2 – тормозные колодки; 3 – рычаги; 4 – гидроцилиндр; 5 – пружина

На рис. 2 показана схема расположения колодок тормозных устройств относительно монорельса ШПМД.

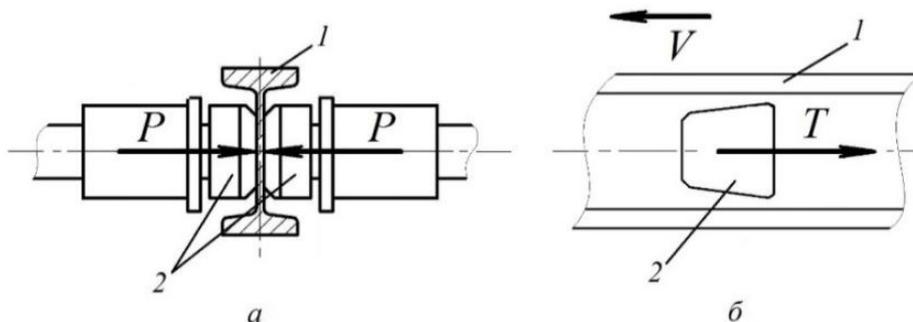


Рис. 2. Схема расположения тормозных колодок:  
а – главный вид; б – вид сбоку; 1 – монорельс; 2 – тормозные колодки

Рычажная система тормозного устройства необходима для прижатия колодок к стенке монорельсового пути (МП). В результате прижатия с усилием  $P$  возникает сила трения  $T$ , направленная в противоположную сторону движения состава ШПМД.

Эффективность торможения подвижного состава напрямую зависит от тормозной силы  $T$ , которая определяется зависимостью

$$T = 2\mu P,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения колодок с опорными поверхностями монорельса;  $P$  – усилие прижатия одной колодки к монорельсу.

На рис. 3 показана схема модели тормозного устройства, входящая в состав установки для определения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом. Устройство и принцип действия установки приведен в работе [1]. Там же приведены состав и описание измерительной части установки.

Для проведения эксперимента необходимо выбрать факторы, от которых зависит величина коэффициента трения.

Коэффициент трения зависит от состояния поверхности монорельса, взаимодействующей с рабочей поверхностью тормозных колодок, и степени ее загрязнения. В запыленной и обводненной среде вертикальная стенка монорельса, контактирующая с тормозными колодками, может быть сухой, влажной, а также с присутствием на ее поверхности пыли и смазочных материалов, используемых для эксплуатации и обслуживания узлов подвижного состава.

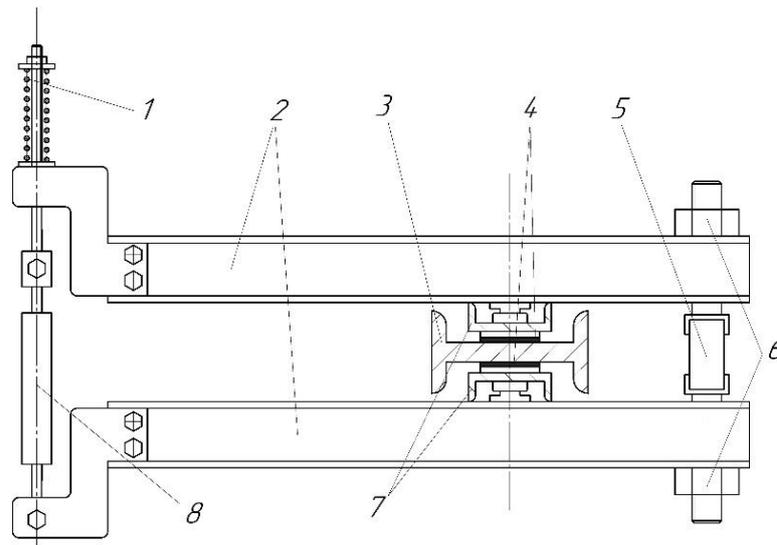


Рис. 3. Схема модели тормозного механизма:

1 – нагрузочное устройство; 2 – рычаги; 3 – монорельс; 4 – тормозные колодки; 5 – тензометрический датчик; 6 – стяжное устройство; 7 – кронштейны для крепления тормозных колодок; 8 – стрелочный прибор ДПУ-0,5

Наибольшее значение коэффициента трения составляет 0,56 при сухой и незапыленной поверхности; наименьший его показатель получен при влажной и запыленной поверхности монорельсового пути и составил 0,10 [1]. Анализ полученных значений коэффициента трения поверхностей тормозных колодок и стенки монорельса при торможении подвижного состава отличается более чем в пять раз, что необходимо учитывать при расчетах режима торможения.

Для определения коэффициента трения тормозных колодок с монорельсом спроектирован и изготовлен стенд, имитирующий тормозное устройство подвижного состава ШПМД. Общий вид стенда представлен на рис. 2.

В подземных условиях, когда движение ШПМД происходит в запыленной и обводненной среде, поверхность монорельса может быть сухой, влажной, а также с присутствием на его поверхности угольной пыли и смазочных материалов, используемых для эксплуатации и обслуживания узлов подвижного состава [4].

Поэтому в качестве факторов, влияющих на коэффициент трения, были выбраны:

- прижимная сила,  $P$ ;
- влажность поверхности трения,  $W$ ;
- загрязненность поверхности трения,  $Q$ .

К факторам, используемым для проведения эксперимента, предъявляется определенный ряд требований [3, 4]:

- должны определяться операционно и позволять устанавливать различные комбинации;
- быть однозначными и иметь области определения;
- отсутствие корреляции между факторами;
- совместимость;
- управляемость;
- непосредственно действовать на объект.

Выбранные для проведения эксперимента факторы ( $P$ ,  $W$ ,  $Q$ ) соответствуют требованиям к факторам, кроме того следует отметить, что прижимная сила является количественным фактором, а влажность и загрязненность – качественные.

Наличие трех факторов для исследования предполагает использование многофакторного эксперимента, позволяющего устанавливать действие факторов, характер и величину их взаимодействия при совместном применении.

Важной является необходимость выдержать принцип факториальности – схема эксперимента должна предусмотреть все возможные сочетания факторов. Это позволяет на основе данных многофакторного эксперимента вычислять эффекты действия и взаимодействия факторов [5].

Таким образом, в нашем случае имеем трехфакторный эксперимент  $2 \times 2 \times 2$ , в котором каждый из трех факторов имеет два значения. Значения и характеристики факторов приведены в таблице.

Факторы для эксперимента 2×2×2

Название фактора	Характеристика фактора	Значение фактора	
		Уровень 0	Уровень 1
Прижимная сила, $P$ , кН	Количественный	10,0	15,0
Влажность поверхности трения, $W$	Качественный	Сухое покрытие	Мокрое покрытие
Загрязненность поверхности трения, $Q$	Качественный	Чистое покрытие	Загрязненное покрытие (с пылью)

На рис. 4 показан алгоритм проведения экспериментального исследования, в соответствии с которым планируется проведение эксперимента.

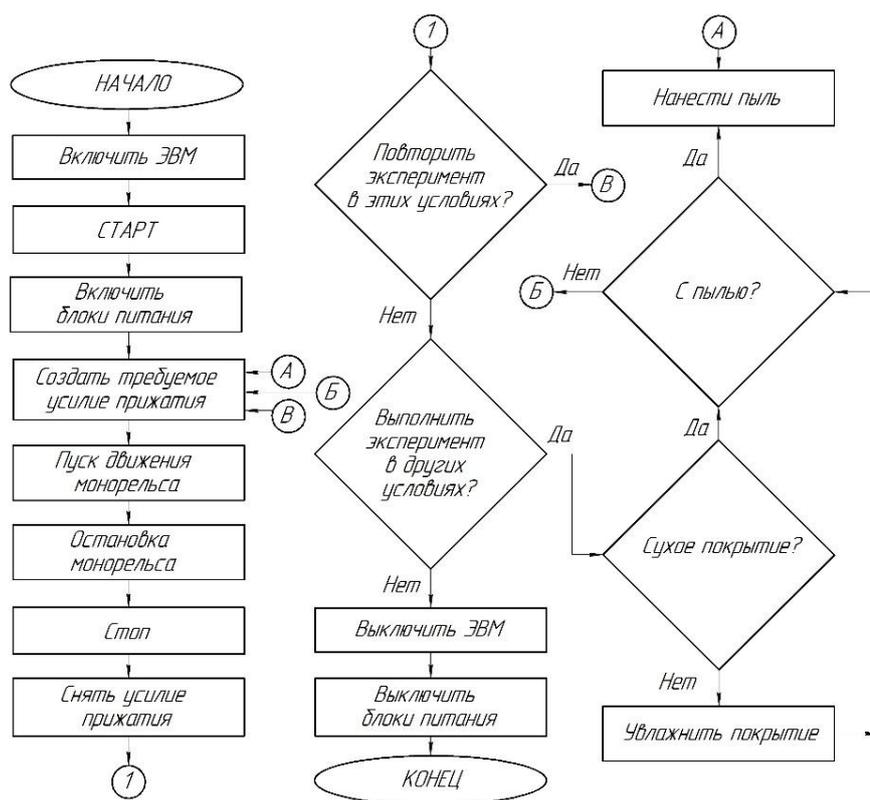


Рис. 4. Алгоритм проведения экспериментального исследования

В статье описан этап планирования эксперимента по исследованию коэффициента трения, возникающего при взаимодействии поверхностей тормозной колодки и стенки монорельса во время торможения подвижного состава ШПМД. Выбранные факторы для исследования – прижимная сила, влажность поверхности трения, загрязненность поверхности трения – отвечают соответствующим требованиям и позволяют в дальнейшем провести эксперимент. В дальнейших публикациях будет описано проведение эксперимента и обработка его результатов.

### Литература

1. Игнаткина Е.Л. Экспериментальные исследования тормозных устройств шахтных подвесных монорельсовых дорог // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 2 (16). – С. 27–32.
2. Гутаревич В.О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог: Монография. – Донецк: ЛАНДОН-XXI, 2014. – 205 с.
3. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
4. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1968. – 155 с.
5. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

УДК 661.971.5

**В.А. Иодис, И.П. Сарайкина, А.А. Акжигитов**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: iodisva@mail.ru*

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ УСТАНОВКИ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА**

В работе проведен анализ вариантов схем работы углекислотных установок низкого давления для получения твердого диоксида углерода. На основании анализа схем, их преимуществ и недостатков спроектирована схема установки для получения сухого льда.

**Ключевые слова:** установка, углекислота, твердый диоксид углерода, схема, сухой лед, преимущества и недостатки.

**V.A. Iodis, I.P. Saraykina, A.A. Akzhigitov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: iodisva@mail.ru*

### **DESIGNING THE INSTALLATION DIAGRAM TO PRODUCE SOLID CARBON DIOXIDE**

The paper analyzes the options for the operation of low-pressure carbon dioxide plants to produce solid carbon dioxide. On the basis of the analysis of the schemes, their advantages and disadvantages, the installation diagram for producing dry ice has been designed.

**Key words:** installation, carbon dioxide, solid carbon dioxide, scheme, dry ice, advantages and disadvantages.

Промышленные установки для производства твердого диоксида углерода ( $\text{CO}_2^T$  – сухого льда) классифицируются в зависимости от рабочего давления (давления конца сжатия, давления конденсации) на установки высокого, среднего и низкого давления. Установки высокого давления работают при давлениях 6–7 МПа, среднего давления – при 2–4 МПа, низкого – при 1–2 МПа. Данные установки могут производить жидкую углекислоту ( $\text{CO}_2^*$ ), хранящуюся в газовых баллонах высокого давления при температуре окружающей среды,  $\text{CO}_2^*$ , хранящуюся в теплоизолированных баллонах при пониженной температуре, и сухого льда.

В соответствии с расчетами, выполненными авторами данной работы, расход электроэнергии примерно на 10% меньше у циклов с рабочим давлением 2–4 МПа и на 12,6% меньше у циклов с давлением 1–2 МПа, чем при работе по циклу с рабочим давлением 6–7 МПа. Установки среднего и низкого давления безопаснее. При их эксплуатации имеют место меньшие потери углекислоты из-за негерметичности установки, можно достичь более полной очистки  $\text{CO}_2^*$ ,  $\text{CO}_2^T$  от компрессионного масла [1–6].

Рассмотрим и выявим преимущества и недостатки схем углекислотных установок низкого давления для получения твердого диоксида углерода. На основании чего спроектируем наиболее оптимальную схему установки для производства сухого льда.

#### **Установка с блоком осушки после двухступенчатого сжатия**

Два углекислотных одноступенчатых компрессора всасывают углекислый газ ( $\text{CO}_2^f$ ) с небольшим содержанием водяного пара (ВП) (рис. 1) при атмосферном давлении и температуре 15°C (поз. 1, 4). Применение безмасляных компрессоров (oil free compressor) позволяет отказаться в схеме от маслоотделителей. Сжимаясь до промежуточного давления,  $\text{CO}_2^f$  нагнетается

в фильтр (поз. 2), далее – в теплообменник охлаждения (поз. 3), а затем всасывается вторым углекислотным компрессором (поз. 4). Достигнув давления нагнетания  $\text{CO}_2^{\text{г}}$ , снова проходит фильтр (поз. 5), водяной теплообменник охлаждения (поз. 6) и с параметрами температуры –  $10^{\circ}\text{C}$ , давления – 1,8 МПа, удельного объема –  $0,04 \text{ м}^3/\text{кг}$  подается в колонны очистки (поз. 7) и осушки (поз. 8). Сжатый до 1,8 МПа очищенный и осушенный  $\text{CO}_2^{\text{г}}$  нагнетается в конденсатор (поз. 9), где конденсируется, отдавая тепло жидкому фреону, кипящему при температуре минус 30 – минус  $33^{\circ}\text{C}$ . После конденсатора  $\text{CO}_2^{\text{ж}}$  с температурой минус  $25^{\circ}\text{C}$  сливается в бак (поз. 10), откуда насосом (поз. 11) нагнетается в льдогенератор (поз. 12) для производства сухого льда.

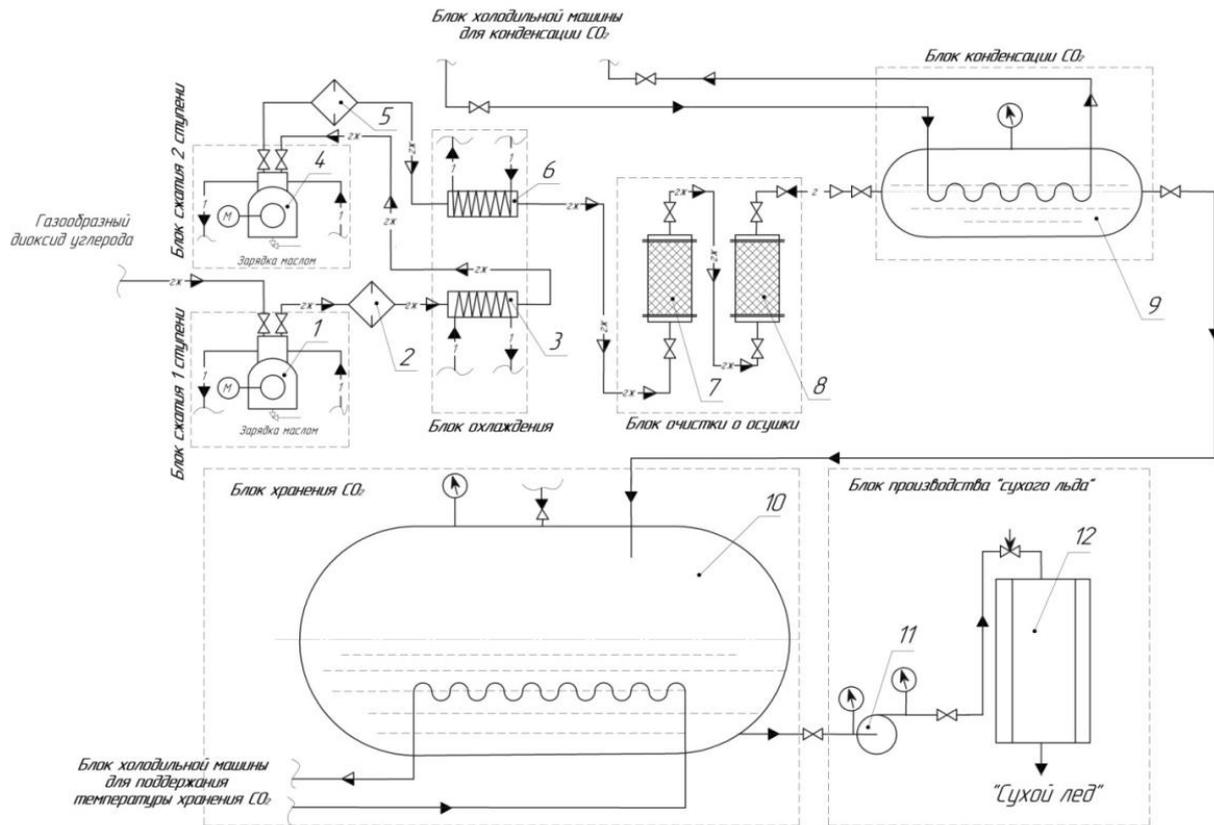


Рис. 1. Установка с блоком осушки после двухступенчатого сжатия:

- 1 – компрессор первой ступени сжатия; 2, 5 – фильтры; 3, 6 – водяные теплообменники охлаждения;  
7 – колонна очистки; 8 – колонна осушки; 9 – конденсатор; 10 – бак  $\text{CO}_2^{\text{ж}}$ ; 11 – насос;  
12 – льдогенератор для производства сухого льда

В данной схеме предусмотрены две двухступенчатые фреоновые холодильные машины для отдельного охлаждения углекислотного конденсатора и изотермического резервуара хранения  $\text{CO}_2^{\text{ж}}$ . Холодильные машины снабжены парожидкостными и регенеративными теплообменниками для увеличения удельной массовой холодопроизводительности и во избежание «влажного хода» компрессоров.

Недостатками данной схемы являются сжатие  $\text{CO}_2^{\text{г}}$  в компрессорах с водяными парами, что приведет к внутренней коррозии системы, и отсутствие автоматического регулирования параметров процесса сорбции, регенерации сорбента в колонне осушки.

### Установка с низкотемпературным влагоотделителем после двухступенчатого сжатия

Всасывание смеси  $\text{CO}_2^{\text{г}}$  и ВП компрессорами (поз. 1, 4), их сжатие, фильтрация и охлаждение в водных теплообменниках происходит аналогично первой схеме (рис. 1), однако вместо блока осушки используется низкотемпературный влагоотделитель (НВ) (рис. 2).

Смесь углекислого газа и водяного пара из блока очистки направляется в НВ (поз. 8), где температура смеси, а также удельный объем падают до значений  $0-5^{\circ}\text{C}$ ;  $0,034 \text{ м}^3/\text{кг}$  при постоянном давлении 1,8 МПа.

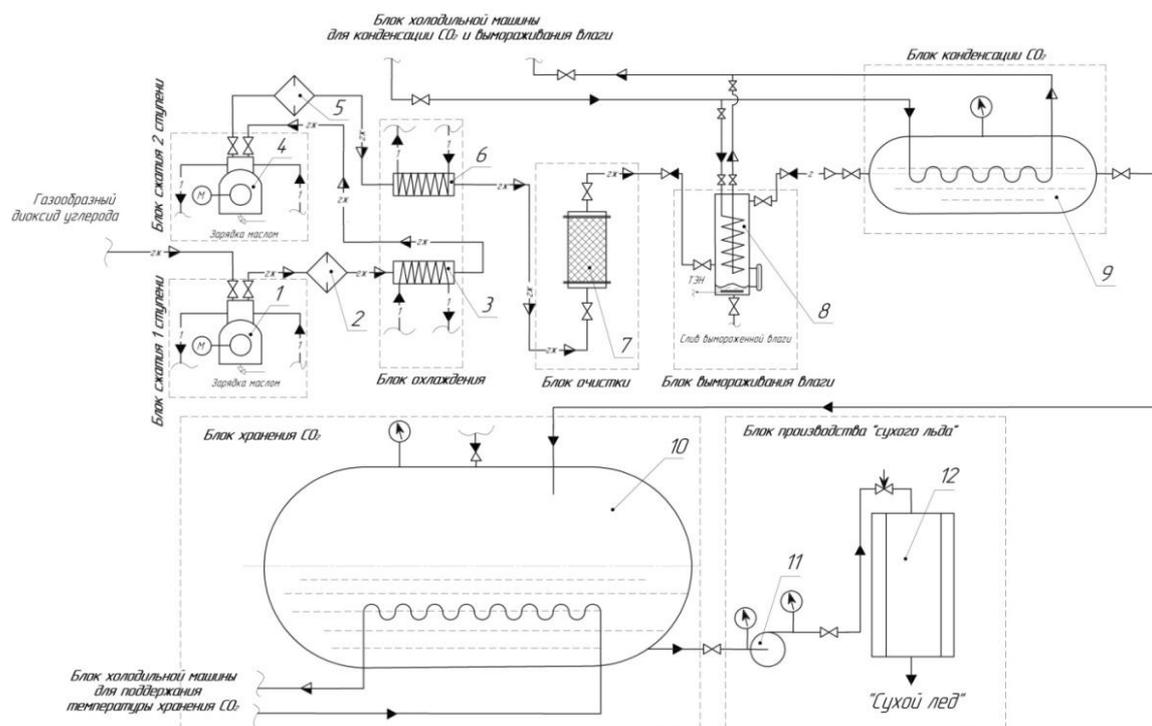


Рис. 2. Установка с низкотемпературным влагоотделителем после двухступенчатого сжатия:  
 1 – компрессор первой ступени сжатия; 2, 5 – фильтры; 3, 6 – водяные теплообменники охлаждения;  
 7 – колонна очистки; 8 – низкотемпературный влагоотделитель; 9 – конденсатор; 10 – бак CO<sub>2</sub><sup>ж</sup>;  
 11 – насос; 12 – льдогенератор для производства сухого льда

Низкотемпературный влагоотделитель (поз. 8) представляет собой цилиндр со спиральным теплообменником внутри для циркуляции фреона. Смесь CO<sub>2</sub><sup>г</sup> и ВП подается в нижнюю часть аппарата, а для лучшего контакта с холодной поверхностью теплообменника отводится с верхней части аппарата. Жидкий и газообразный холодильный агент подводится и отводится через верхнюю часть НВ. В нижней части НВ предусмотрен поплавковый регулятор уровня, сконденсировавшейся из CO<sub>2</sub><sup>г</sup> влаги, и ТЭНы, исключающие замерзание влаги. Для осуществления работы НВ используется двухступенчатая фреоновая холодильная установка (ХУ) с парожидкостным и регенеративным теплообменниками.

Очищенный CO<sub>2</sub><sup>г</sup> без водяных паров далее нагнетается в конденсатор 9, где конденсируется, отдавая тепло жидкому фреону, кипящему при температуре минус 30 – минус 33°C. После конденсатора CO<sub>2</sub><sup>ж</sup> с температурой минус 25°C сливается в бак (поз. 10), откуда насосом (поз. 11) подается в льдогенератор (поз. 12) для производства сухого льда.

Преимуществом второй схемы является отсутствие необходимости осуществлять процесс осушения, регенерации адсорбента в осушительной колонне, контролировать процесс. А к недостаткам, как и в рассмотренной первой схеме, – сжатие в углекислотных компрессорах смеси углекислого газа и водяных паров.

### Установка с низкотемпературным влагоотделителем до двухступенчатого сжатия

Смесь CO<sub>2</sub><sup>г</sup> и ВП, перед тем как поступить на всасывание двухступенчатого углекислотного безмасляного компрессора (поз. 2), осушается в НВ (поз. 1), в котором его температура падает с 15°C до минус 5°C (рис. 3). Затем уже осушенный газ сжимается до промежуточного давления ≈ 0,5–0,6 МПа и в водяном теплообменнике охлаждается (поз. 3) с 80 до 10°C. После охлаждения между ступенями сжатия CO<sub>2</sub><sup>г</sup> всасывается во вторую ступень сжатия углекислотного компрессора (поз. 2), сжимается и нагнетается опять в водяной теплообменник (поз. 4). Параметры газа в этот момент следующие: давление 1,8 МПа, температура 100–110°C. Из охлаждающего теплообменника CO<sub>2</sub><sup>г</sup> с температурой 10–12°C нагнетается в конденсатор (поз. 5), где он дополнительно охлаждается до минус 25°C и конденсируется. Далее процесс производства сухого льда происходит аналогично двум вариантам, рассмотренным выше.

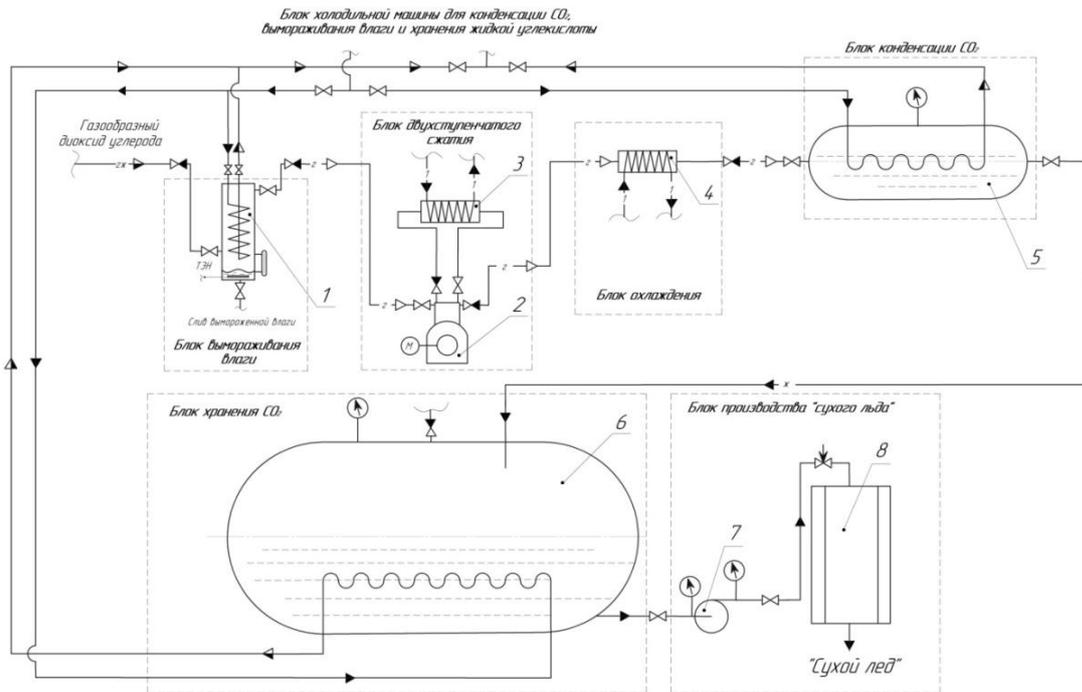


Рис. 3. Установка с низкотемпературным влагоотделителем до двухступенчатого сжатия:  
 1 – низкотемпературный влагоотделитель; 2 – двухступенчатый безмасляный углекислотный компрессор;  
 3, 4 – водяные теплообменники охлаждения; 5 – конденсатор; 6 – бак CO<sub>2</sub><sup>жк</sup>; 7 – насос;  
 8 – льдогенератор для производства сухого льда

Данная схема установки, по мнению авторов, в сравнении с рассмотренными первыми двумя схемами обладает рядом преимуществ:

1. Автоматизацией процесса осушения углекислого газа, заключающейся в использовании ТЭН, указателя-регулятора уровня жидкости в низкотемпературном влагоотделителе и автоматическом сливе вымороженной влаги (см. рис. 3);
2. Отсутствием необходимости в периодической замене адсорбента, его регенерации, вследствие применения процесса вымораживания влаги, а не адсорбции;
3. Расположением аппаратов установки, исключающих угрозу внутренней ее коррозии, а именно расположением низкотемпературного влагоотделителя в начале установки – до двухступенчатого безмасляного углекислотного компрессора.

На основании анализа схем производства сухого льда, выявления их преимуществ и недостатков разработана схема установки с низкотемпературным влагоотделением до сжатия углекислого газа, которая учитывает преимущества рассмотренных схем и не имеет их недостатков.

## Литература

1. Иодис В.А. Анализ существующих установок сжижения диоксида углерода из подземных источников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S59. – С. 87–91.
2. Производство и применение жидкой углекислоты / С.В. Алтунджи, В.В. Бухарин, В.А. Добкина, Н.М. Кузнецов, К.Г. Попова, А.Д. Тезиков, Л.Р. Фрадин. – М.: Пищепромиздат, 1969. – 340 с.
3. Иодис В.А., Пашкевич Р.И. Схема работы установки сжижения углекислого газа, добываемого на месторождениях углекислых минеральных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S59. – С. 97–104.
4. Иодис В.А. Выбор цикла работы установки получения жидкой двуокиси углерода высшего сорта из подземных источников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S59. – С. 92–96.
5. Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Чулкин С.Г. Холодильные установки. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 344 с.
6. Пименова Т.Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 208 с.

УДК 661.971.5

**В.А. Иодис, И.П. Сарайкина, Д.А. Шмелёв**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: iodisva@mail.ru*

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХОГО ЛЬДА**

В работе проведен технико-экономический анализ промышленных установок производства твердого диоксида углерода – сухого льда. На основании анализа выбраны углекислотные установки низкого давления (рабочее давление от 1 до 2 МПа) как наиболее экономичные для переработки газообразного диоксида углерода.

**Ключевые слова:** твердый диоксид углерода, сухой лед, производство, промышленная установка высокого, среднего, низкого давления, анализ.

**V.A. Iodis, I.P. Saraykina, D.A. Shmelev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: iodisva@mail.ru*

### **TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF INDUSTRIAL PLANTS FOR PRODUCTION OF DRY ICE**

The work carried out a technical and economic analysis of industrial installations for the production of solid carbon dioxide – dry ice. Based on the analysis, low-pressure carbon dioxide units (operating pressure from 1 to 2 MPa) were selected as the most economical for processing gaseous carbon dioxide.

**Key words:** solid carbon dioxide, dry ice, production, industrial plant of high, medium, low pressure, analysis.

Сырьем для производства сухого льда (твердого диоксида углерода ( $\text{CO}_2^T$ )) в основном служат побочные продукты, бросовые отходы, содержащие диоксид углерода ( $\text{CO}_2^T$ ), различных производств (разложение карбонатов, спиртовое брожение, получение азота, кислорода и других соединений, очистка дымовых газов), реже используются природные источники. Наибольшее содержание  $\text{CO}_2$  и, как следствие, больший процент получения имеют естественные природные источники. Из них выходит чистый диоксид углерода, в котором содержится незначительная доля водяного пара.

Твердый диоксид углерода обладает хорошими теплофизическими характеристиками, такими как высокая теплота сублимации (590 кДж/кг), высокая плотность (1561 кг/м<sup>3</sup>), низкая температура сублимации при атмосферном давлении (минус 78°C). Эти свойства позволяют использовать  $\text{CO}_2^T$  как консервант для сохранения свойств пищевых продуктов – охлаждение и замораживание, для охлаждения промышленных изделий при типовых испытаниях, для струйно-абразивной обработки различных поверхностей.

Промышленная установка для производства  $\text{CO}_2^T$  может производить жидкую углекислоту ( $\text{CO}_2^K$ ), хранящуюся в газовых баллонах высокого давления при температуре окружающей среды, жидкую углекислоту, хранящуюся в теплоизолированных баллонах при пониженной температуре, и сухого льда.

Классифицируются промышленные установки для производства  $\text{CO}_2^T$  по значению рабочего давления. Если рабочее давление установки лежит в пределах от 6 до 7 МПа, то установку относят к установкам высокого давления, при значении рабочего давления от 2 до 4 МПа – к установкам среднего давления, при 1–2 МПа – к установкам низкого давления [1–3].

### Анализ промышленных установок для производства $\text{CO}_2^T$

#### Установка по производству при давлении от 6 до 7 МПа

Газообразный диоксид углерода, смешиваясь с парами  $\text{CO}_2^T$  от льдогенератора (поз. 9), всасывается I ступенью одноступенчатого углекислотного компрессора (поз. 1) (рис. 1) и сжимается до давления до  $\approx 6,9$  МПа. После сжатия в I ступени  $\text{CO}_2^T$ , проходя охладители (поз. 2), поступает в маслоотделители (поз. 3). Далее  $\text{CO}_2^T$  очищается и осушается в блоке очистки и осушки (поз. 4) и попадает в конденсатор (поз. 5), где сжижается. Сжиженный  $\text{CO}_2$ , пройдя промежуточную емкость (поз. 6), дросселируется до давления  $\approx 2,4\text{--}2,7$  МПа в I промежуточный сосуд (поз. 7) (I ПС). Полученные при этом пары отсасываются II ступенью компрессора, а жидкость I ПС дросселируется до давления 0,8 МПа во II ПС. Пары из сосуда (поз. 8) отсасываются I ступенью компрессора, а  $\text{CO}_2^*$  из сосуда направляется в льдогенератор.

Льдогенератор заполняется  $\text{CO}_2^*$  самотеком при открытом вентиле уравнивающей линии и закрытых диафрагмах. После заполнения открывают одну из диафрагм нижнего отсоса, что обеспечивает дросселирование жидкости до давления всасывания. При атмосферном давлении жидкая углекислота превращается в сухой лед.

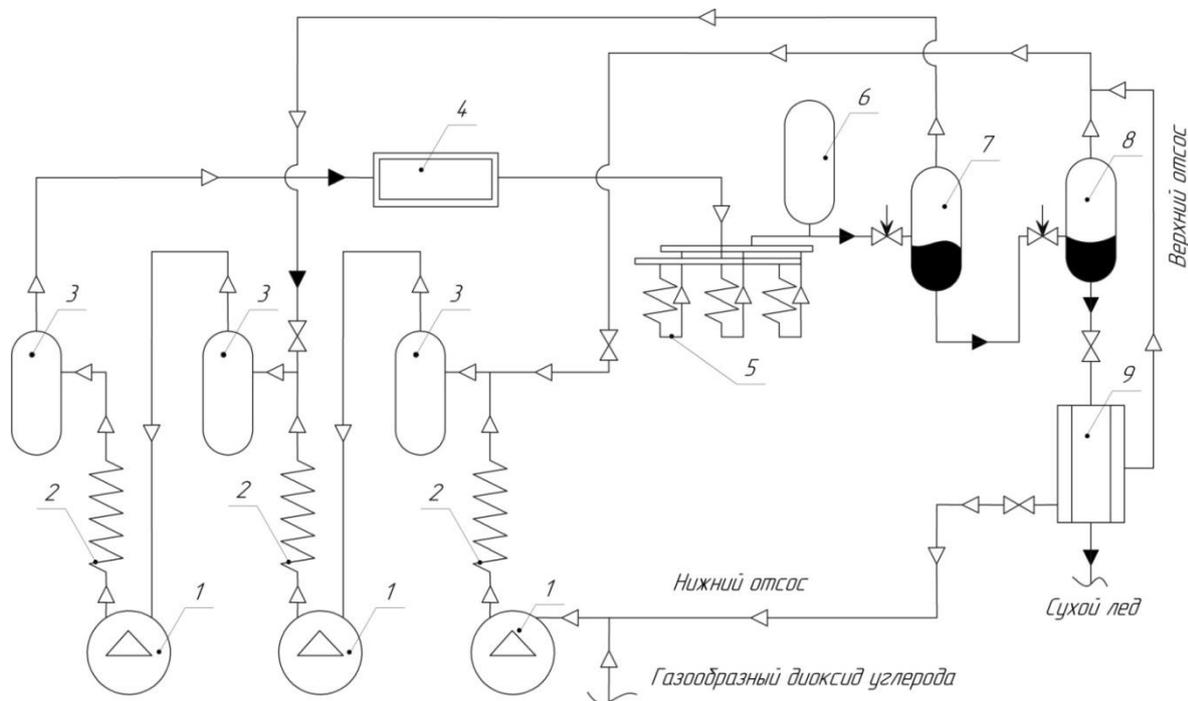


Рис. 1. Установка по производству сухого льда при давлении от 6 до 7 МПа [4]:

1 – углекислотные компрессоры; 2 – охладители; 3 – маслоотделители; 4 – блок очистки и осушки; 5 – конденсатор; 6 – промежуточная емкость; 7, 8 – промежуточные сосуды; 9 – льдогенератор

#### Установки по производству при давлении от 2 до 4 МПа

Газообразный  $\text{CO}_2^T$  низкого давления проходит водоотделитель – поз. 1 и всасывается в I ступень компрессора (поз. 2), в котором последовательно сжимается до давления  $\approx 3\ 000\ 000$  Па (рис. 2). Между ступенями сжатия I и II (поз. 2, 4), а также после компрессора  $\text{CO}_2^T$  охлаждается в охладителях-водоотделителях (поз. 3, 5). Охлаждение в охладителе-водоотделителе осуществляется  $\text{CO}_2^*$ , нагнетаемой углекислотным насосом (поз. 13) из нижней части бака углекислоты (поз. 11) через конденсатор (поз. 9), а также жидким аммиаком (минус  $33^\circ\text{C}$ ) от двухступенчатой холодильной машины насосами (поз. 14, 15). Далее поток  $\text{CO}_2^T$  направляется в блок осушения (поз. 6), затем в конденсатор, после которого  $\text{CO}_2^*$  сливается в бак углекислоты. Для регенерации блока осушения в установке предусмотрена подача в блок сдросселированных до давления 110 000 Па, а потом подогретых в электрическом нагревателе (поз. 7) неконденсирующихся газов из верхней части бака (поз. 11). Жидкая углекислота из бака (поз. 11) забирается углекислотным насосом и подается на льдогенератор для производства сухого льда.

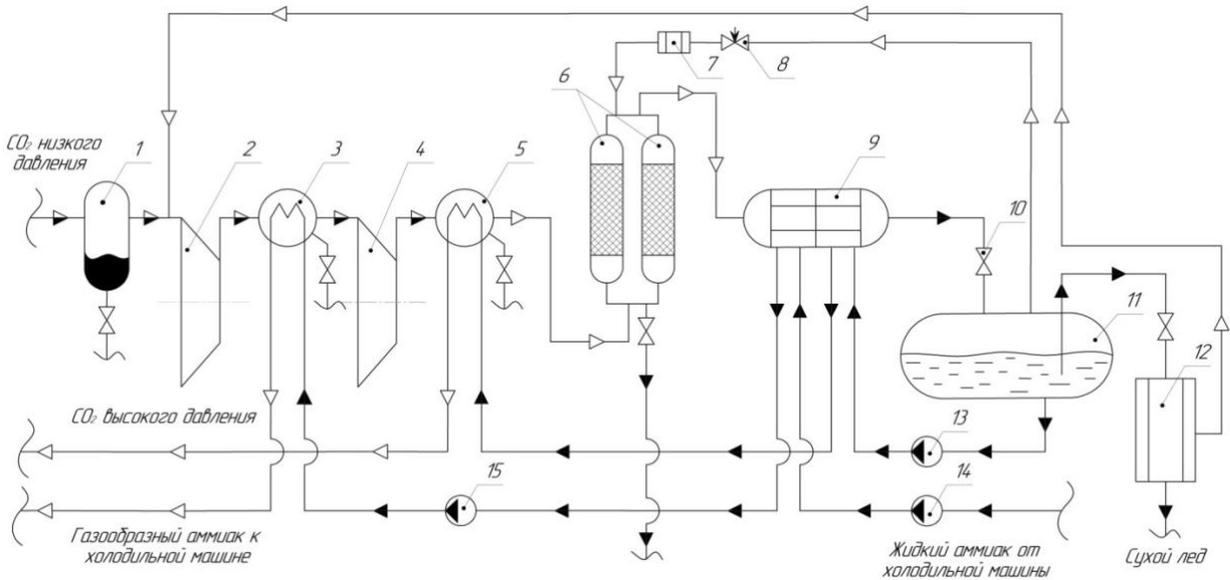


Рис. 2. Схема производства жидкого диоксида углерода при давлении от 2 до 4 МПа [5]:

- 1 – водоотделитель; 2, 4 – ступени сжатия углекислотного компрессора; 3, 5 – охладители-водоотделители; 6 – блоки осушки; 7 – электрический нагреватель; 8 – дроссельный вентиль; 9 – конденсатор; 10 – вентиль; 11 – бак углекислоты; 12 – льдогенератор для производства сухого льда; 13 – углекислотный насос; 14, 15 – аммиачные насосы

*Установки по производству при давлении от 1 до 2 МПа*

В установках низкого давления  $\text{CO}_2$  сжимается в одно- или двухступенчатом углекислотном компрессоре до давления 1–2 МПа, температуры  $100^\circ\text{C}$  и нагнетается в водяной охладитель (поз. 2), фреоновый теплообменник охлаждения (поз. 3), адсорбер осушитель (поз. 4) (рис. 3).

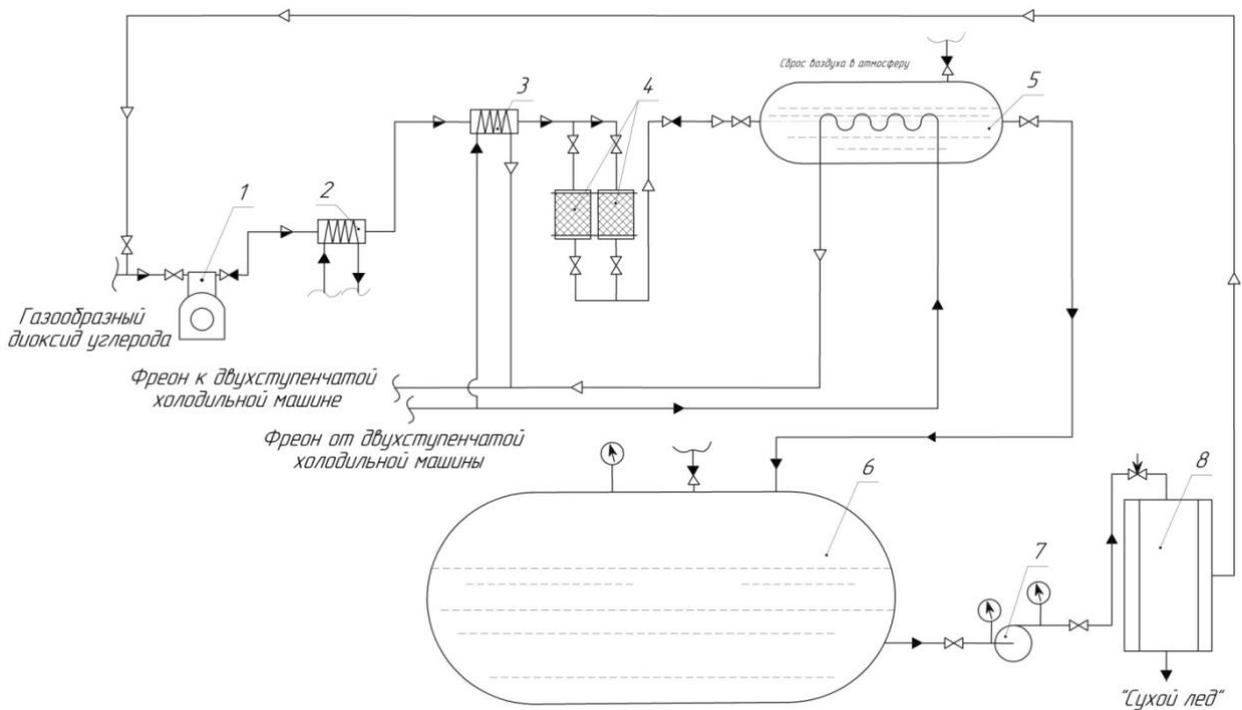


Рис. 3. Схема производства сухого льда при давлении от 1 до 2 МПа [6]:

- 1 – углекислотный компрессор; 2 – водяной холодильник; 3 – фреоновый теплообменник охладитель; 4 – адсорбер-осушитель; 5 – конденсатор; 6 – теплоизолированный ресивер хранения низкотемпературной жидкой углекислоты; 7 – насос жидкой углекислоты; 8 – льдогенератор сухого льда

Далее  $\text{CO}_2^g$  поступает в конденсатор (поз. 5), являющийся испарителем двухступенчатой фреоновой холодильной машины, где охлаждается и конденсируется при давлении от 1 до 2 МПа и достигает температуры минус  $25^\circ\text{C}$ . Затем жидкая углекислота сливается в теплоизолированный ресивер хранения низкотемпературной  $\text{CO}_2^k$  (поз. 6), откуда дросселируется в льдогенератор (поз. 8). Образовавшийся в процессе производства сухого льда в льдогенераторе  $\text{CO}_2^g$  направляется обратно на всасывание компрессора.

Анализ установок показал, что более экономичными и надежными при эксплуатации являются установки с рабочим давлением от 1 до 2 МПа. Это объясняется меньшим расходом электроэнергии, чем для установок с рабочими давлениями 2–4 и 6–7 МПа. Как показывает тепловой расчет, в среднем установки низкого давления потребляют на 12,3% меньше электроэнергии, чем установки среднего давления, и на 16,4% меньше, чем установки высокого давления. Кроме этого, установки с рабочим давлением от 1 до 2 МПа более безопасны в эксплуатации вследствие меньшего значения давления, имеют меньшие потери  $\text{CO}_2^g$  через неплотности, меньший расход смазочных материалов, меньшую металлоемкость аппаратов.

### Литература

1. *Иодис В.А.* Анализ существующих установок сжижения диоксида углерода из подземных источников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S59. – С. 87–91.
2. *Пименова Т.Ф.* Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 208 с.
3. Производство и применение жидкой углекислоты / *С.В. Алтунджи, В.В. Бухарин, В.А. Добкина, Н.М. Кузнецов, К.Г. Попова, А.Д. Тезиков, Л.Р. Фрадин.* – М.: Пищепромиздат, 1969. – 340 с.
4. *Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Чуклин С.Г.* Холодильные установки. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 344 с.
5. Линия ожижения диоксида углерода [Электронный ресурс]. – URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2378590.html>.
6. Установка для производства  $\text{CO}_2$  [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.vmtech.ru/page\\_4\\_20\(ch\\_1\).htm](http://www.vmtech.ru/page_4_20(ch_1).htm).

УДК 621.873

**С.А. Фоменко, А.В. Танасогло, С.Н. Машталер**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
Макеевка, 286123  
e-mail: s.a.fomenko@donnasa.ru*

### **МЕТОД УСИЛЕНИЯ ПРОЛЕТНОЙ КОНСТРУКЦИИ КРАНА-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ**

В данной работе представлен один из способов реконструкции крана для продления срока его эксплуатации при помощи вантовой системы. Система вантового усиления выполнена из элементов, изготавливаемых на заводе и позволяющих быстрый монтаж с минимальными сварочными работами на высоте. В результате введения вантовой системы усиления трубчатого моста крана получено уменьшение расчетного прогиба пролета крана и усилий в трубчатых балках, что позволяет продлить на 5–6 лет эксплуатационный ресурс крана, ограниченный из-за ослабления сечения трубчатой балки в результате коррозии.

**Ключевые слова:** трубчато-балочный козловой кран-перегрузатель, вантовая система усиления, пролетная часть крана.

**S.A. Fomenko, A.V. Tanasoglo, S.N. Mashtaler**

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Makeyevka, 286123  
e-mail: s.a.fomenko@donnasa.ru*

### **THE METHOD OF STRENGTHENING THE SPAN STRUCTURE OF THE CRANE-LOADER**

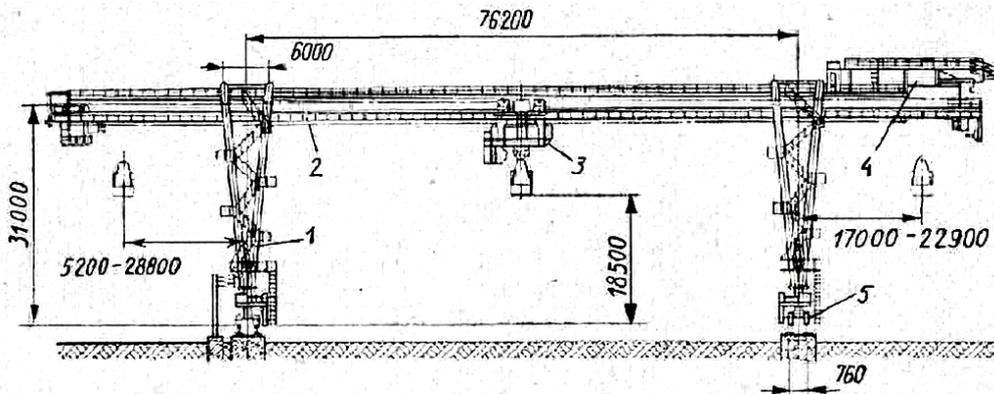
This paper presents one of the ways to reconstruct a crane to extend its service life using a cable-stayed system. The cable-stayed reinforcement system is made of elements manufactured at the factory and allows quick installation with minimal welding work at height. As a result of the introduction of a cable-stayed reinforcement system for the tubular bridge of the crane, a decrease in the calculated deflection of the crane span and efforts in the tubular beams was obtained, which makes it possible to extend the operational life of the crane by 5–6 years, limited due to the weakening of the section of the tubular beam as a result of corrosion.

**Key words:** tubular-girder gantry crane-loader, cable-stayed reinforcement system, crane span.

На крупных предприятиях стран СНГ до сих пор еще эксплуатируется грузоподъемная техника, изготовленная до 1990 г. На угольных складах тепловых электростанций, обогатительных фабриках, коксохимических заводах, сортировочных и погрузочных участках шахт, карьеров, морских и речных портов, на рудных дворах металлургических заводов работают большепролетные краны-перегрузатели. Срок эксплуатации металлических козловых кранов-перегрузателей такого типа установлен заводом-изготовителем в 15 лет. После этого срока необходимо тщательное обследование металлических конструкций, и при наличии поврежденных элементов – выполнение их усиления [1, 2].

Так как мостовые краны-перегрузатели в основном используются на открытых площадках, для них характерны все дефекты, вызванные коррозионными повреждениями металла от атмосферных воздействий, а также дефекты и повреждения от усталости металла и нарушения правил эксплуатации. Все эти дефекты в итоге снижают несущую способность конструкций моста и опор крана, и для его дальнейшей безопасной эксплуатации в паспортном режиме необходимо выполнение ремонта, часто с усилением поврежденных элементов.

В данной статье рассмотрена конструкция распространенного в странах СНГ трубчато-балочного козлового крана-перегрузателя, который выпускался на заводе «Сибтяжмаш» (г. Красноярск, Россия) (рисунок), и представлен один из способов реконструкции крана для продления срока его эксплуатации.



Перегрузчик завода «Сибтяжмаш» грузоподъемностью 32 т:  
 1 – жесткая опора, 2 – мост, 3 – грейферная тележка, 4 – бункер с ленточным питателем,  
 5 – механизм передвижения перегрузчика

Рассматриваемая конструкция крана состоит из стальных трубчатых стоек, соединенных по верху жесткими стальными ригелями. К ригелям снизу жестко закреплен балочный мост пролетом 76,2 м с консолями 36,5 м (рабочая консоль) и 30,7 м (ремонтная консоль). Высота подъема крана – 30 м, грузоподъемность паспортная – 32 тс, используемая – 25 тс. Мост крана выполнен в виде трубчато-балочной конструкции диаметром 2,9 м, толщиной металла 14–20 мм с поперечными внутренними ребрами-диафрагмами, установленными с шагом 5,9 м. К нижней части моста закреплены крановые рельсы, по которым перемещается крановая тележка.

В результате эксплуатации крана с 1978 по 1997 гг. на промышленном предприятии Донецкой области при отсутствии регулярной антикоррозионной окраски металлические конструкции моста крана получили общий коррозионный износ до 10%, очаговый – до 20%. В сварных швах ремонтной консоли образовались трещины. По результатам обследования ДП «Донецкий Промстройинипроект», выполненного в соответствии с рекомендациями [2], была разрешена дальнейшая эксплуатация крана без выезда тележки с грузом на ремонтную консоль. В 1997 г. произведен ремонт металлических конструкций крана, который заключался в заварке трещин, антикоррозионной окраске, замене грузовой тележки с подъемом до 25 тс вместо 32 тс. Расчетная величина остаточного ресурса работы крана была определена в 13 лет.

В 2008 г. было решено продлить остаточный ресурс работы крана с помощью усиления несущих конструкций моста. Рассмотрены несколько вариантов усиления: шпренгельная система из металлических прокатных профилей, привариваемых в опорных узлах моста с верхней стороны; балки из стальных листов, также привариваемых в опорной части моста; вантовая система, создающая дополнительные промежуточные опоры в рабочих пролетах моста крана. Учитывая, что производство сварочных работ в пространственных листовых конструкциях может привести к труднопрогнозируемым внутренним напряжениям в существующем металле моста крана, было принято решение о детальной проработке варианта с вантовой системой как более технологичного, имеющего наименьшее количество сварных швов, прикрепляющих добавляемые элементы к существующим конструкциям. Этот вариант в отличие от перечисленных позволяет изготавливать основные конструкции усиления в заводских условиях, что гарантирует их качество.

Вантовая система усиления представляет собой шарнирные вертикальные стойки с закрепленными к ним вантами, создающими дополнительные опоры в консолях и рабочем пролете крана. Соединение вант с поддерживаемыми элементами и стойками шарнирное. Предусмотрено натяжение вант для создания в них необходимого усилия с помощью натяжных устройств. Ванты приняты из канатов двойной свивки диаметром 56,0 мм.

Расчет конструкции крана с вантовой системой усиления выполнен на ПЭВМ по методу конечных элементов. Подготовка исходных данных осуществлялась в соответствии с рекомендациями [3] с учетом коррозионного повреждения металла балки моста. По результатам расчета моста крана в исходном состоянии (до усиления) и с включенными в работу вантами определялись усилия в элементах и их перемещения при различном положении тележки с грузом.

Система вантового усиления выполнена из элементов, изготавливаемых на заводе и позволяющих быстрый монтаж с минимальными сварочными работами на высоте. Перед установкой

системы к ригелям и трубчатому мосту крана привариваются шарнирные опоры в местах, соответствующих внутренним ребрам конструкции. На опоры устанавливаются стойки, навешиваются ванты и с помощью натяжных устройств натягиваются до проектной величины (50 кН), при этом рабочая и ремонтные консоли, а также середина рабочего пролета трубчатой балки поддомкрачиваются для компенсации прогиба от собственного веса соответственно на 50, 60 и 30 мм. После натяжения вант домкраты снимаются, и кран готов к работе.

По результатам расчета после включения в работу вантовой системы прогиб трубчато-балочного моста при размещении тележки с грузом в середине пролета уменьшился на 24% и составил с учетом имеющихся деформаций оси моста 70% от предельно допустимого (0,003 пролета по [4]). Прогибы консолей при расположении тележки с грузом на них составили – для ремонтной консоли 80% предельно допустимого, для рабочей консоли – 77%.

В результате введения вантовой системы усиления трубчатого моста крана получено уменьшение расчетного прогиба пролета крана и усилий в трубчатых балках, что позволяет продлить на 5–6 лет эксплуатационный ресурс крана, ограниченный из-за ослабления сечения трубчатой балки в результате коррозии. При этом следует отметить, что независимо от введения усиления необходимо тщательное обследование конструкций в соответствии с требованиями [2] и устранение трещин в металле и локальных ослаблений сечения в результате очаговой коррозии.

### Литература

1. ТУ У 29.2-21674530-001-2003 Конструкции грузоподъемных кранов и подъемников металлические. Капитальный ремонт. – Киев: ЗАО СП «Монтажспецтехника», 2003.
2. РД 10-112-96. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. – М., 1996.
3. Краны с трубчато-балочными пролетными строениями / *Н. Г. Братусь и др.* – М.: Машиностроение, 1989.
4. НПАОП 29.22-1.03-02 (ДНАОП 0.00-1.03-02) Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – Киев: Госнадзорхрантруда, 2002.

## СЕКЦИЯ 4. ТРАНСПОРТНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 620.19:629.5.023

**О.А. Белов, Е.П. Белова**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: boa-1@mail.ru*

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Коррозия является основной причиной износа и разрушения металлических корпусов кораблей и судов, а также других плавучих инженерных сооружений. В результате воздействия коррозии значительно ухудшаются эксплуатационные показатели этих объектов, снижается их надежность и безопасность. Борьба с коррозией представляет собой актуальную проблему, решению которой уделяется достаточно большое внимание во всем мире. С учетом актуальности данного вопроса существует объективная необходимость изучения достижений и мирового опыта обеспечения защиты кораблей и судов от коррозии. В данной статье рассматриваются основные достижения в области защиты от коррозии морских плавучих инженерных сооружений и проводится краткий анализ эксплуатации антикоррозионных систем.

**Ключевые слова:** электрохимическая коррозия, катодная защита, протекторная защита, техническое обслуживание, техническая эксплуатация, надежность, безопасность, защитный потенциал, защитный ток, электрод сравнения.

**O.A. Belov, E.P. Belova**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: boa-1@mail.ru*

### MODERN CORROSION PROTECTION TECHNOLOGIES AND EXPERIENCE OF THEIR APPLICATION IN MARINE TRANSPORT

Corrosion is the main cause of wear and destruction of metal hulls of ships and vessels, as well as other floating engineering structures. The operational performance of these facilities deteriorates significantly as a result of corrosion, their reliability and safety decreases. Corrosion control is an urgent problem, the solution of which is given quite a lot of attention around the world. Given the urgency of this issue, there is an objective need to study the achievements and world experience in ensuring the protection of ships and vessels from corrosion. This article discusses the main achievements in the field of corrosion protection of marine floating engineering structures and provides a brief analysis of the operation of anticorrosive systems.

**Key words:** galvanic corrosion, cathodic protection, tread protection, maintenance, technical operation, reliability, safety, protective potential, protective current, reference electrode.

Коррозионные процессы, представляющие собой постепенное ухудшение качества материала или его свойств в результате электрохимической реакции с окружающей средой, являются неизбежным явлением, сопровождающим эксплуатацию кораблей, судов и других плавучих инженерных сооружений (плавучие пирсы, плавучие доки, плавучие платформы и т. д). Существует несколько общепринятых методов защиты металлических конструкций от коррозии в морской воде [1–3]. Каждый из этих методов имеет определенные преимущества и недостатки. Опыт эксплуатации морских инженерных сооружений показывает, что с точки зрения снижения влияния коррозионных процессов оптимальным вариантом является сочетание нескольких методов. Как правило, наиболее эффективным средством является применение электрохимической защиты (ЭХЗ) в сочетании с качественными лакокрасочными покрытиями (ЛКП). Эта комбинация может обеспечить очень хорошую защиту в течение длительного периода времени.

В современных научных исследованиях особое внимание уделяется катодной защите, а точнее ее усовершенствованной версии, которая известна как система импрессионной токовой катодной защиты – Impressed Current Cathodic Protection – (ICCP). Структурная схема данного вида защиты представлена на рис. 1.

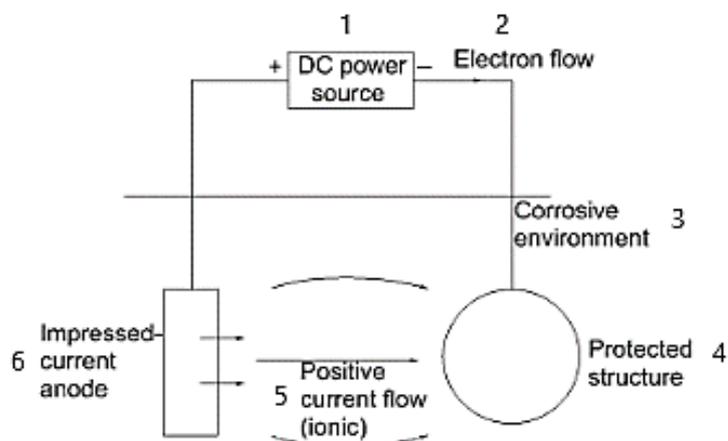


Рис. 1. Структурная схема системы ICCP:

1 – источник питания постоянного тока; 2 – рабочий ток; 3 – агрессивная (коррозионная) среда; 4 – защищаемый объект; 5 – защитный ток; 6 – импрессионный анод

В источниках [4, 5] указывается, что конструктивно данная система состоит из установленных на корпусе анодов и опорных ячеек, соединенных с панелью управления. Система производит более мощный внешний ток для подавления естественной электрохимической активности на смоченной поверхности корпуса и тем самым исключает образование агрессивных коррозионных элементов на корпусе. Это также позволяет избежать проблем, которые могут существовать там, где разнородные металлы вводятся через сварку или сближаются с другими компонентами, например, гребными винтами. Системы ICCP обеспечивают процесс автоматизации вывода тока при изменении входного напряжения, что позволяет поддерживать заданный уровень защиты от коррозии при любых значениях удельного сопротивления морской воды. Таким образом, использование систем ICCP обеспечивает стабильный уровень защиты в диапазоне стандартных характеристик морской воды.

Это свойство катодной защиты приводится как основное преимущество перед протекторной защитой SACP (Sacrificed Anode Cathodic Protection), в которой увеличение удельного сопротивления морской воды может привести к уменьшению активности анода и уменьшению объема обеспечиваемой защиты. Структурная схема протекторной защиты представлена на рис. 2.

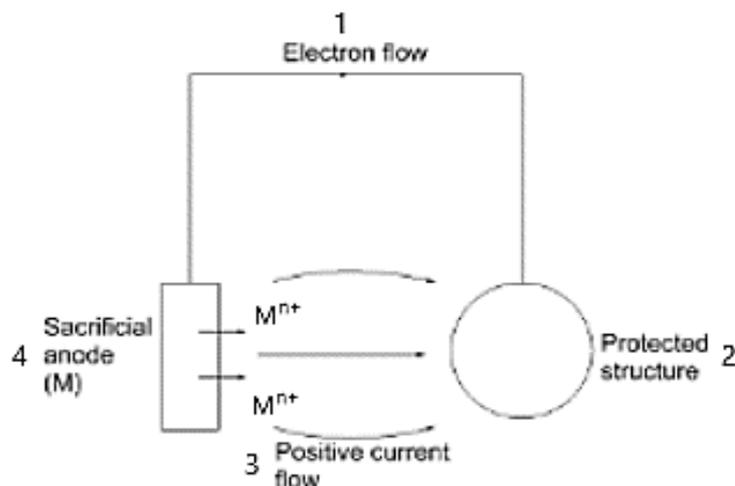


Рис. 2. Структурная схема системы SACP:

1 – рабочий ток; 2 – защищаемый объект; 3 – защитный ток; 4 – протектор (жертвенный анод)

Следует обратить внимание на тот факт, что системы ICCP были разработаны не только для защиты и контроля коррозии корпуса судна в целом, но и для защиты отдельных, наиболее уязвимых с точки зрения коррозионных процессов элементов корпуса, например носовых и кормовых шахт подруливающих устройств.

Кроме того, приводятся исследовательские данные о том, что система ICCP является более экономичной по сравнению с протекторной системой защиты (SACP – Sacrificed Anode Cathodic Protection). Результаты экономической оценки систем защиты ICCP и SACP представлены на рис. 3. При этом протекторная защита SACP рассматривается в двух вариантах, на основе цинкового и алюминиевого сплавов.

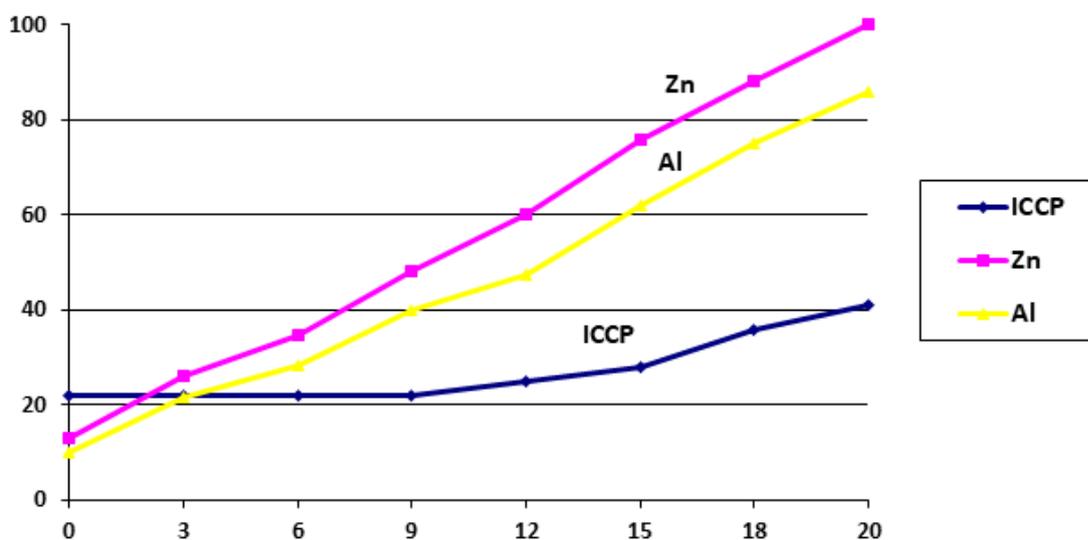


Рис. 3. Результаты экономической оценки систем защиты от коррозии

Как видно из рис. 3, первоначальные затраты несколько выше для ICCP, в то время как затраты на эксплуатацию систем SACP возрастают постепенно и через 10–12 лет превышают начальные затраты в 5–6 раз. Кроме того, если провести сравнение между протекторами (жертвенными анодными сплавами), то на диаграмме ясно видно, что протектор из сплава алюминия более экономичен, чем протектор из сплава цинка. Несмотря на то, что затраты на данном рисунке представлены в относительных единицах, общая динамика их изменения за двадцатилетний период эксплуатации судна наглядно демонстрирует соотношение экономических показателей различных систем защиты корпуса судна от коррозии.

Более высокий уровень затрат при использовании системы SACP можно объяснить отсутствием эффективных функций контроля и управления данной системой в период эксплуатации судна. С одной стороны, это требует ее полного восстановления при каждом доковом ремонте судна, а с другой снижает эффективность ее работы.

Также следует отметить, что авторами исследования [6, 7] при проведении экономической оценки системы ICCP не учтены затраты эксплуатационного характера, связанные с необходимостью обеспечения электропитанием данной системы, а также привлечением квалифицированного персонала в период ее эксплуатации. В связи с этим можно предположить, что динамика роста затрат на эксплуатацию у системы ICCP несколько выше, чем это представлено на графике рис. 3, в том числе и в начальный период эксплуатации судна.

При оценке в таких же относительных единицах затрат на ремонт судна без использования какой-либо системы защиты от коррозии (CP) на рис. 4 можно проследить практически линейную динамику их роста в течение периода эксплуатации судна. При этом использование систем ICCP и SACP существенно снижает затраты на корпусные ремонтно-восстановительные работы. Исходя из представленных диаграмм на рис. 3, с точки зрения эффективности использование системы защиты по технологии ICCP более чем в два раза экономичнее, чем системы SACP. Сравнение обоих методов при таком подходе показывает, что, несмотря на то, что система ICCP имеет несколько более высокую начальную стоимость, в долгосрочной перспективе она более экономична и эффективна, чем системы SACP.

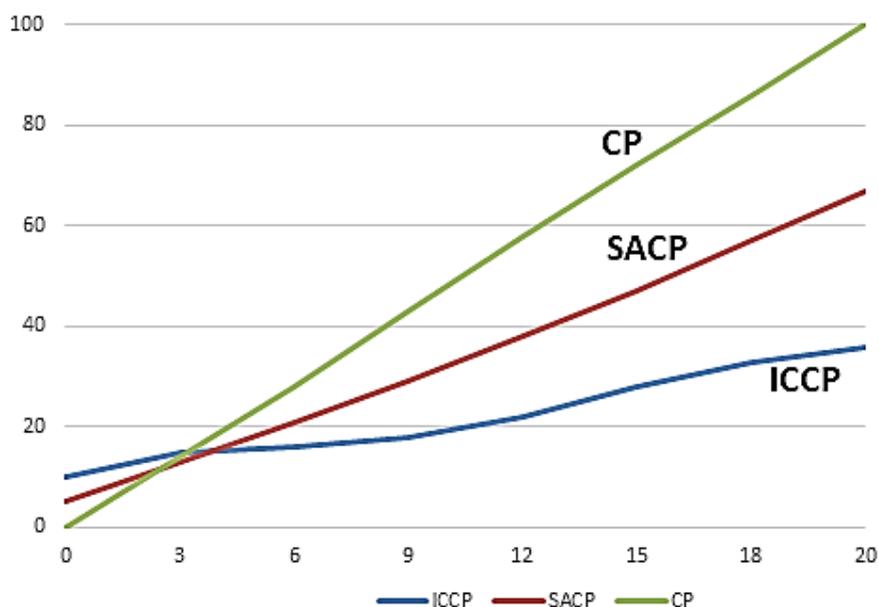


Рис. 4. Оценка динамики затрат на ремонт судна

Для повышения эффективности системы SACP необходима разработка и внедрение на судах комплекса организационно-технических мероприятий по обеспечению контроля состояния протекторной защиты в период эксплуатации. Разработке такого комплекса посвящен ряд исследований, в том числе направленных на совершенствование электродов сравнения [8, 9].

Оптимальным решением данной проблемы может стать внедрение на судах автоматизированной системы контроля протекторной защиты. Условно протекторную систему защиты судна с дополнительным автоматизированным контролем обозначим SACP R. Такая система призвана обеспечить экипаж судна оперативной информацией о работоспособности протекторов и об уровне защищенности корпуса судна [10, 11].

В этом случае своевременное обнаружение снижения эффективности системы и проведение мероприятий по восстановлению и повышению ее работоспособности позволят снизить динамику затрат на ремонт корпуса судна и приблизить систему SACP R к показателям системы защиты ICCP, как показано на диаграмме рис. 5.

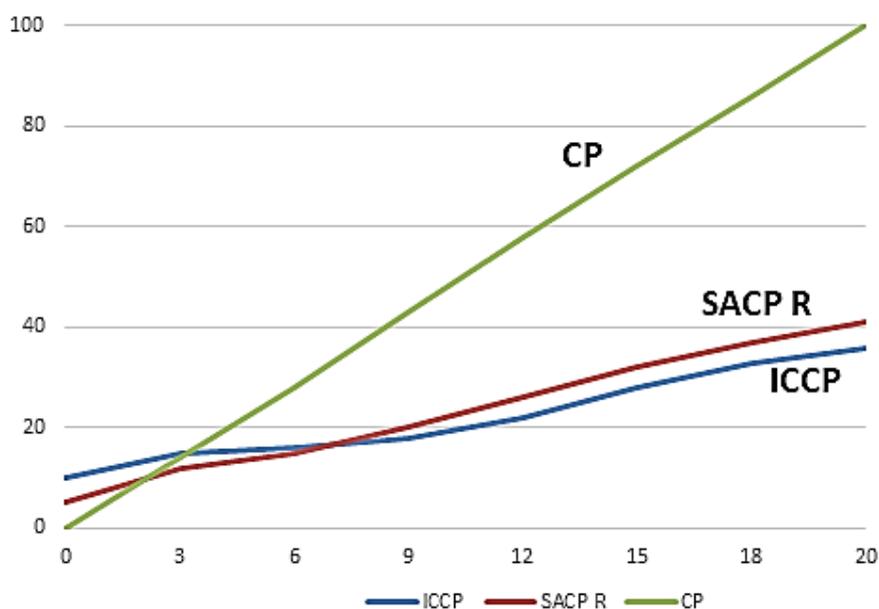


Рис. 5. Изменение динамики затрат на ремонт судна при внедрении автоматизированной системы контроля SACP R

Таким образом, в настоящее время наибольшее распространение получила система ICCP, которая обеспечивает достаточно эффективную защиту от коррозии всех типов судов, морских платформ и других конструкций в течение длительного периода их эксплуатации. Однако эта система имеет ряд существенных недостатков, связанных с высокими требованиями к профессиональной подготовке персонала, к устойчивости источника питания и необходимости применения дополнительных конструктивных элементов, а также постоянного контроля направления тока в системе [12].

Вместе с тем система SACP имеет свои важные преимущества, основными из которых являются простота конструкции и низкие затраты на эксплуатацию. Установка системы SACP может стать предпочтительной для малых морских судов и судов с краткосрочным или сезонным режимом эксплуатации, поскольку это позволит избежать высоких первоначальных затрат на установку ICCP системы защиты от коррозии.

Внедрение автоматизированной системы контроля протекторной защиты на кораблях и судах позволит улучшить эксплуатационные свойства системы SACP, повысить ее гибкость для различных условий эксплуатации и обеспечить более высокий уровень надежности и безопасности морских судов.

### Литература

1. *Malcolm Latarche*. Corrosion Control. ShipInsight (журнал). Current business media (изд-во). United Kingdom. – 2019. – P. 38–41.
2. *Белов О.А.* Современное состояние организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3 (118). – С. 115–120.
3. *Hartt W.H.* Marine cathodic protection-historical trends and recent accomplishments // Conference Paper OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. – Vol. 3. – 2000.
4. *Darchivio F., Cassanelli A., Simison S.* Cathodic protection of ship hulls by galvanic anodes: design evaluation // Nace International. Corrosion 2209: Conference and Expo. – January 2009. – P. 1–7.
5. *Tezdogan T., Demirel Y.K.* An overview of marine corrosion protection with a focus on cathodic protection and coatings // Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike. – Vol. 65. – June 2014. – P. 49–59.
6. *Mainier F.B., Perassolli V.* Ship hull corrosion caused by default and lack of maintenance on the impressed current cathodic protection // IOSR Journal of Engineering. – Vol. 04. – February 2014. – P. 34–39.
7. *Fairclough C.* Avoiding Ship Hull Corrosion with ICCP and Simulation. – URL: <https://www.comsol.com>.
8. К вопросу использования судовых электродов сравнения, выполненных из нержавеющей стали / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.О. Рогожников, Б.В. Тарабанов* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Третьей международной науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – С. 41–46.
9. К вопросу использования алюминиевых электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов, Б.В. Тарабанов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2021. – № 3. – С. 23–32.
10. Оперативный контроль состояния антикоррозионной защиты как фактор безопасности технической эксплуатации морских судов / *О.А. Белов, А.О. Шуваева, С.А. Клементьев, А.В. Федин* // Инноватика и экспертиза: Научные труды. – 2020. – № 1 (29). – С. 152–159.
11. Разработка автоматизированной системы контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов / *О.А. Белов, Д.П. Ястребов, А.О. Рогожников, В.А. Швецов, С.А. Зайцев, Б.В. Тарабанов* // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XI Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 82–85.
12. *Белов О.А., Швецов В.А., Белавина О.А.* Способ контроля защищенности стальных корпусов кораблей и судов от электрохимической коррозии и электрокоррозии: Патент на изобретение RU 2643709 C1, 05.02.2018. Заявка № 2017115308 от 28.04.2017.

УДК 620.19:629.5.023

**А.Д. Змеев, А.О. Рогожников**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: artem.klas10@gmail.com*

## **ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ДРОНОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АНТИКОРРОЗИЙНОЙ ЗАЩИТЫ СУДНА**

Во время эксплуатации судна элементы его корпуса подвергаются коррозионным процессам и теряют свои прочностные характеристики, поэтому необходимо через определенный промежуток времени проводить оценку и диагностику технического состояния антикоррозийной защиты судна. Для эффективной оценки технического состояния антикоррозийной защиты судна важно выявить коррозионные процессы в начальной стадии. Использование подводных дронов позволит производить контроль более оперативно.

**Ключевые слова:** безопасность эксплуатации, коррозионный процесс, подводный дрон, модульность конструкции, антикоррозийная защита.

**A.D. Zmeev, A.O. Rogozhnikov**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: artem.klas10@gmail.com*

## **THE PROSPECT FOR USING UNDERWATER DRONES TO ASSESS THE TECHNICAL STATE OF CORROSION PROTECTION OF THE VESSEL**

During the operation of the vessel the elements of its hull are subjected to corrosion processes and lose their strength characteristics, therefore it is necessary to assess and diagnose the technical condition of the corrosion protection of the vessel after a certain period of time. For an effective assessment of the technical condition of the anti-corrosion protection of the vessel, it is important to identify corrosion processes in the initial stage. The use of underwater drones allows monitoring promptly.

**Key words:** operational safety, corrosion process, underwater drone, modularity of construction, anti-corrosion protection.

Прочность судна и безопасность его эксплуатации зависят от многих факторов, но основным остается антикоррозийная защита судна. Из-за коррозионных разрушений происходят частые поломки и связанные с ними ремонты судовых трубопроводов, насосов и прочих судовых конструкций. Комплексная защита кораблей и судов от коррозии является общемировой проблемой, и поиску путей ее решения уделяется большое внимание. При оценке технического состояния антикоррозийной защиты необходимо определить влияние коррозионных повреждений на способность корпуса не изменять своей формы и не разрушаться, чтобы можно было разработать наиболее обоснованные мероприятия по защите судна [1, 2].

Актуальная на данный момент антикоррозийная защита судов с соблюдением всех норм эмпирически исключает или замедляет процесс коррозии металлических поверхностей и увеличивает срок эксплуатации судна. Обнаружить коррозию на начальной стадии очень важно, поскольку это упростит дальнейшие действия по антикоррозийной защите судна. Однако это не всегда возможно, так как во время эксплуатации нижняя часть судна всегда находится в морской воде, следовательно, выявить коррозию трудозатратно. Кроме этого, в процессе эксплуатации судна экипаж проводит большую работу по ликвидации коррозионных разрушений, особенно в районе подводных бортов, палуб и надстроек, что также относится к затратам из-за коррозии [3, 4].

При этом члены экипажа не в состоянии выполнять контроль за коррозионными процессами в соответствии с требованиями нормативных документов. Специально подготовленный оператор способен выполнять контрольные измерения с минимальной погрешностью. Именно поэтому судно каждые два года встает на докование для действенных мероприятий и оценки антикоррозийной защиты. Доковый ремонт судна не менее чем на 70% может быть отнесен к затратам на работы по ликвидации коррозии [5].

Использование подводного дрона для выявления коррозионных процессов очень упростит дальнейшие действия по защите судна от коррозии, поскольку это дает возможность оценить техническое состояние антикоррозийной защиты судна прямо в воде во время его эксплуатации и принять соответствующие решения. На рисунке показаны последствия, к которым может привести недостаточный контроль состояния корпуса судна и его антикоррозийной защиты.



*Последствия коррозионных повреждений корпусов судов*

По своей сути подводные дроны представляют из себя сложные герметичные электронно-механические устройства, которые используются в основном для исследования морских глубин. Подводные дроны используются экспедициями для исследования морских глубин, пещер и иных геологических подводных образований, также применяются для взятия образцов грунта и наблюдения за подводной биосферой.

Привлекательность таким устройствам придает еще один вариант использования – подводная охота и рыбалка с помощью дрона. Подводный дрон значительно упрощает добычу рыбы малым рыбодобывающим судам, ведь с помощью него можно с легкостью определять местоположения рыбных косяков. Для судовых компаний подводный дрон можно использовать для исследования подводной части судна с целью выявления коррозионных процессов, что позволит минимизировать затраты на последующее дорогостоящее обслуживание.

Подводные дроны появились относительно недавно, но уже смогли занять свою нишу. На борту любого дрона устанавливаются видеокамера и глубиномер. Все машины оснащаются мощными источниками света. На аппарат для рыбалки всегда устанавливается сонар. Если подводный дрон погрузится слишком глубоко, давление может разрушить его корпус или повредить объектив видеокамеры, поэтому на большинство моделей устанавливается глубиномер или барометр. В настоящее время на рынке современной техники появился широкий выбор таких устройств с различными техническими характеристиками и ценовой категорией. В таблице представлены самые популярные серийные модели современных подводных дронов.

## Характеристики подводных дронов

№ п/п	Название	Технические характеристики	Примечания	Стоимость
1	Chasing M2	Размер: 380*267*165 мм Масса: 4,5 кг Макс. глубина: 100 м Макс. скорость: 1,5 м/с Время работы: 4 ч Яркость подсветки: 4000 Лм Камера: широкоугольная камера 4к 12 Мп с углом обзора 152°	Оснащен 8 мощными моторами, способными регулировать угол наклона $\pm 90^\circ$ , вращаться на $360^\circ$ и удерживать глубину погружения. Возможность присоединения роботизированной руки Chasing	284 905 руб.
2	iBubble	Размер: 500*350*250 мм Масса: 5 кг Макс. глубина: 60 м Макс. скорость: 1 м/с Время работы: 1 ч Яркость подсветки: 2000 Лм Камера: 4к 12Мп с углом обзора 140°	Может двигаться за своим владельцем, используя для ориентации в подводном пространстве систему распознавания, а также эхолот. Подвижный и маневренный за счет 7 электродвигателей	212 285 руб.
3	PowerRay	Размер: 465*270*126 мм Масса: 3,8 кг Макс. глубина: 30 м Макс. скорость: 2 м/с Время работы: 4 ч Яркость подсветки: 2000 Лм Камера: 1080р 12Мп с углом обзора 148°	Управление ведется по каналу Wi-Fi, причем дистанция между оператором и Wi-Fi поплавком не должна превышать 10 м. На борту установлен сонар	139 687 руб.
4	Geneinno T1	Размер: 390*347*165 мм Масса: 4,4 кг Макс. глубина: 150 м Макс. скорость: 2 м/с Время работы: 6 ч Яркость подсветки: 3000 Лм Камера: 4к 12Мп с углом обзора 160°	Оснащен 6 моторизованными роторами для максимальной маневренности под водой. Может быть оснащен дополнительным боковым винтом для управления	218 405 руб.
5	Fifish V6	Размер: 383*331*143 мм Масса: 3,9 кг Макс. глубина: 100 м Макс. скорость: 1,5 м/с Время работы: 6 ч Яркость подсветки: 2000 Лм Камера: 4к 12Мп с углом обзора 166°	Шесть подруливающих моторов обеспечивают движение в 6 степеней свободы. Возможность присоединения роботизированной руки	286 900 руб.

Все представленные в таблице дроны, несомненно, можно эксплуатировать в целях оценки технического состояния антикоррозийной защиты судов. Однако данные устройства спроектированы совсем не для этого. Основным их назначением является исследование водного пространства, эпичный дайвинг и подводная рыбалка и охота. Без сомнений, главным параметром таких устройств является герметичность и глубина погружения. Ведь при погружении на глубину жидкость давит на погруженный объект, и это называется гидростатическим давлением. Давление в жидкости зависит от высоты погружения и плотности жидкости, поэтому большое давление создает вода в морях и океанах. Давление воды усиливается в геометрической прогрессии при погружении на большие глубины. Именно поэтому подводный дрон должен обладать большим коэффициентом прочности, чтобы выдерживать немалые нагрузки на существенной высоте погружения.

Перспектива использования подводных дронов для оценки технического состояния антикоррозийной защиты в основном заключается в сохранении экономических ресурсов компании, ведь с помощью такой современной техники можно определить коррозионные процессы на начальном этапе. Использование подводных дронов для оценки антикоррозийной защиты является в своем роде превентивной мерой, поскольку это позволит предупредить дальнейшее распространение коррозии по металлическим конструкциям судна. Такой метод оценки антикоррозийной защиты судов позволит устранить внеплановое докование по ликвидации коррозионных участков. Применение подводных дронов именно в таком направлении, бесспорно, повысит безопасность эксплуатации судна, так как коррозия металлических конструкций действительно оказывает влияние на прочность и надежность судна в целом [6].

Кроме этого, подводный дрон можно модернизировать путем установки соответствующих приборов для оценки технического состояния антикоррозийной защиты.

В настоящее время на базе мореходного факультета КамчатГТУ ведется разработка прототипа подводного дрона с модульной конструкцией. Отличительной особенностью реализуемой идеи и предлагаемого устройства является оптимальная компактность и возможность комплектации различными модулями для разного рода целей и задач. Например, брать пробы воды или различные объекты для научных и практических исследований.

Модульная конструкция очень поможет в оценке технического состояния антикоррозийной защиты судна, так как сменные модули позволят выполнять подводные операции по определению коррозионных процессов. Модульная конструкция активно разрабатывается, и предполагается, что это будет механическая клешня, техническая лопатка и прочная пробирка. В настоящее время ведутся испытания и отработка режимов работы созданного макета подводного дрона в учебной лаборатории. Параллельно идет разработка программного обеспечения и эксплуатационной документации.

Весь комплекс данных мероприятий направлен на снижение фактических затрат, связанных с оценкой и ремонтом судовых корпусных конструкций, в том числе при доковых ремонтах судов. Таким образом, на мореходном факультете Камчатского государственного технического университета реализуется целый комплекс научно-исследовательских и инженерно-технических работ, направленных на решение актуальных народно-хозяйственных задач, связанных с обеспечением эффективной и безопасной эксплуатации кораблей и судов флота [7].

Подводя итог вышесказанному, хочется отметить, что использование подводного дрона действительно упростит и сделает эффективней процесс оценки технического состояния антикоррозийной защиты судна. Не стоит забывать, что работа судна в первую очередь должна отвечать нормам безопасности, и использование дрона в этом аспекте, несомненно, повышает уровень безопасной эксплуатации. И наконец, применение подводных дронов может сыграть большую роль в экономике судовых компаний и рыбодобывающих комплексов, поскольку это удешевит последующие мероприятия по ликвидации последствий коррозии.

## Литература

1. Белов О.А. Современное состояние организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3 (118). – С. 115–120.
2. Белов О.А., Швецов В.А., Белавина О.А. Способ контроля защищенности стальных корпусов кораблей и судов от электрохимической коррозии и электрокоррозии: Патент на изобретение RU 2643709 С1, 05.02.2018. Заявка № 2017115308 от 28.04.2017.
3. Оперативный контроль состояния антикоррозионной защиты как фактор безопасности технической эксплуатации морских судов / О.А. Белов, А.О. Шуваева, С.А. Клементьев, А.В. Федин // Инноватика и экспертиза: Научные труды. – 2020. – № 1 (29). – С. 152–159.
4. Разработка автоматизированной системы контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов / О.А. Белов, Д.П. Ястребов, А.О. Рогожников, В.А. Швецов, С.А. Зайцев, Б.В. Тарабанов // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XI Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 82–85.
5. Гальянов А.П. Технология и организация судоремонта в рыбной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1988. – 303 с.
6. Белов О.А. Аналитический обзор факторов эффективной эксплуатации морского транспорта // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019 – С. 5–9.
7. Белов О.А., Зайцев С.А. К вопросу оценки безопасности морских судов камчатского флота // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы X Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019 – С. 80–83.

УДК 621.039.586

**Р.А. Ляндзберг**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: oni@kamchatgtu.ru*

### **САМЫЕ ОПАСНЫЕ ЯДЕРНЫЕ АВАРИИ XX ВЕКА**

В статье приводится краткое изложение событий, приведших к одной из четырех самых опасных ядерных аварий XX века – взрыве хранилища радиоактивных отходов на комбинате «Маяк» вблизи южно-уральского города Кыштыма. Рассмотрены причины аварии, ее масштабы и последствия для окружающей среды, меры по ликвидации радиоактивного загрязнения обширной территории, а также мероприятия по контролю за здоровьем населения, проживающего в местах, подвергшихся загрязнению.

**Ключевые слова:** радионуклиды, жидкие радиоактивные отходы, уровни загрязнения, экспозиционные дозы облучения, дезактивация загрязненных поверхностей, экологические последствия аварии, отчужденные территории, накопленная эффективная доза облучения для населения вблизи места аварии.

**R.A. Lyandzberg**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: oni@kamchatgtu.ru*

### **THE MOST DANGEROUS NUCLEAR ACCIDENTS OF THE XX CENTURY**

The article provides a summary of the events that led to one of the four most dangerous nuclear accidents of the XX century – the explosion of a radioactive waste storage facility at the Mayak plant near the South Ural city of Kyshtym. The causes of the accident, its scale and consequences for the environment, measures to eliminate radioactive contamination of a vast territory, as well as measures to control the health of the population living in contaminated areas are considered.

**Key words:** radionuclides, liquid radioactive waste, pollution levels, exposure doses, decontamination of contaminated surfaces, environmental consequences of the accident, alien territories, accumulated effective radiation dose for the population near the accident site.

Ядерные аварии на АЭС и других предприятиях ядерно-топливного цикла начали происходить с момента практического использования ядерной энергии, то есть с 1945 г. Всего в 14 странах мира за период с 1945 по 1987 гг. на предприятиях, где использовалась ядерная энергия или велась переработка радиоактивных отходов, произошло более 150 инцидентов, из которых 27 квалифицируются как серьезные аварии.

Наиболее опасными для окружающей среды считаются четыре случая в СССР, Великобритании и США, в результате которых огромным количеством радионуклидов были загрязнены большие территории вокруг объектов, где произошли аварии, что причинило значительный ущерб экологическому состоянию окружающей среды и здоровью населения этих местностей [1].

В хронологическом порядке первым таким случаем считается взрыв хранилища жидких радиоактивных отходов (ЖРО) на заводе оружейного плутония вблизи города Кыштым на Южном Урале 29 сентября 1957 г. По современной классификации (Международная шкала ядерных событий INES) эта авария относится к 6-му уровню из семи возможных, что свидетельствует о тяжелых последствиях аварии для окружающей среды и здоровья населения.

Это произошло на химкомбинате «Маяк» в закрытом городе Челябинск-40, название которого употреблялось только в секретных документах, поэтому свое название авария получила по ближайшему городу Кыштыму, обозначенному на географических картах. На химкомбинате в 1949 г. был запущен радиохимический завод по переработке плутония, при этом средне-

и малоактивные ЖРО производства просто сбрасывались сначала в р. Теча, а затем в бессточное оз. Карачай, что уже причиняло огромный вред окружающей среде. Для высокоактивных ЖРО были построены специально оборудованные хранилища, представляющие собой котлованы глубиной 10 м и диаметром 20 м с бетонной рубашкой толщиной 1 м. Внутри помещались цилиндры из нержавеющей стали, содержащие ЖРО, сверху хранилище было закрыто бетонной крышкой толщиной 1 м и слоем земли в 2 м, общий объем хранилища составлял около 3 000 м<sup>3</sup>.

Поскольку высокоактивные ЖРО при хранении выделяют тепло за счет происходящих в них процессов радиоактивного распада изотопов, цилиндры в хранилище постоянно охлаждались водой. В 1956 г. охлаждающие трубки стали подтекать и были отключены, попытки исправить повреждения в течение года не предпринимались, ЖРО стали подсыхать, и сильно взрывчатые нитратные и ацетатные соли плутония в емкости объемом около 300 м<sup>3</sup> сдетонировали, по масштабам разрушения мощность взрыва оценивается в 100 т тринитротолуола.

В результате взрыва хранилище было полностью разрушено, бетонная крышка весом 160 т была отброшена в сторону на 25 м, были сорваны крышки у двух соседних подобных хранилищ, разрушен ряд близких сооружений и выбиты стекла и оконные рамы у зданий на расстоянии до 3 км. Продуктами взрыва в атмосферу было выброшено около 20 млн кюри радиоактивных веществ в виде аэрозолей, газов и механических взвесей (для сравнения можно вспомнить, что величина радиоактивности в 1 кюри соответствует одному грамму Ra-226, то есть радиоактивность выброса эквивалентна 20 тоннам радия). Основную массу выброшенных изотопов составляли средне- и долгоживущие церий-144, цирконий-95 и стронций-90, периоды полураспада которых соответственно равны 285; 65 суткам и 29 годам, что не позволяло рассчитывать на быстрое снижение загрязнения среды за счет естественного распада радионуклидов.

Выброшенные взрывом на высоту 1–2 км продукты деления плутония образовали облако, которое под влиянием ветра двигалось в северо-восточном направлении, из облака в течение 10–12 часов выпадали радиоактивные осадки, в результате чего на протяжении 300 км до опасных уровней была загрязнена территория общей площадью около 3 000 км<sup>2</sup>, получившая название Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС).

В зоне радиоактивного загрязнения оказались 217 населенных пунктов трех областей – Челябинской, Свердловской и Тюменской с населением 270 000 человек, причем в ближайших к химкомбинату «Маяк» пунктах экспозиционная доза облучения составляла до 300 мкР/с. Пребывание в таком месте чрезвычайно опасно, в течение трех недель человек получал бы смертельную дозу облучения (600 Р) [2].

Возникла необходимость срочной эвакуации населения из ближайших к «Маяку» мест проживания, однако началась она только через 7–10 дней после аварии, считается, что задержка произошла из-за проведения расчета стоимости мероприятий, к этому времени жители уже получили среднюю эквивалентную дозу облучения в 52 бэр (биологический эквивалент рада), что соответствует началу легкой стадии лучевой болезни. Всего для ликвидации последствий аварии пришлось в период 1957–1960 гг. отселить 13 000 человек из 23 населенных пунктов, которые затем были захоронены. Люди при переселении вынуждены были оставлять на месте все вещи, включая одежду и утварь, дома их сжигались, скот уничтожался. Прямо на месте определялась примерная стоимость имущества, включая дом и скотину, и выплачивалась компенсация. Легко представить себе всю глубину переживаний эвакуируемых, для многих это стало трагедией всей дальнейшей жизни.

Была создана зона отчуждения с особым режимом, где загрязненность составляла до 4 кюри на квадратный километр (нетрудно подсчитать, что подобная величина соответствует уровню в 1 000 распадов в минуту на площади в квадратный сантиметр, что всего в два раза меньше, чем предельно допустимые уровни загрязнения зон строгого режима горячих радиохимических лабораторий по нормам радиационной безопасности НРБ 99/2009).

В 1968 г. на этой территории был создан Восточно-Уральский заповедник, который следит за состоянием закрытой зоны и протекающими там процессами. В результате радиоактивного распада выпавших нуклидов площадь загрязнения постепенно сокращается, но до сих пор свободно посещать заповедник нельзя, так как уровень радиоактивности в нем по существующим для человека нормам все еще слишком высок.

За 30 лет после аварии накопленная эффективная доза для жителей, проживающих у границ зоны, в среднем составила 12 мЗв в год, что примерно в 10 раз превышает естественную дозу облучения в чистой местности, но, как считается, не является безусловно опасной для здоровья человека.

Однако состояние здоровья жителей села Татарская Караболка говорит о другом. Это село находится в 40 км от комбината «Маяк» и по отчету считалось переселенным, хотя фактически жители были оставлены на месте проживания (название села было стерто с географической карты и только в 2000 г. восстановлено). На момент аварии численность населения в селе составляла 4 000 человек, в 2010 г. там проживало 423 человека. Вокруг села размещены восемь кладбищ, на семи из которых хоронят исключительно умерших в результате онкологических заболеваний, смертность от рака среди жителей села в шесть раз выше, чем в среднем по стране [3].

Вполне возможно, что еще до аварии негативное влияние на здоровье жителей Татарской Караболки оказали сброс радиоактивных отходов в р. Теча, куда за период с 1949 по 1951 гг. было сброшено в общей сложности 2,8 млн кюри радионуклидов, а также аэрозольные выбросы с пересохшего оз. Карагай, где количество радионуклидов было еще больше (в настоящее время озеро полностью засыпано).

После этой аварии в СССР была разработана технология захоронения высокоактивных ЖРО методом остекловывания, которая с 1987 г. применяется на заводе «Маяк» и других предприятиях подобного профиля. При этом радионуклиды как бы запаиваются в толстую стеклянную оболочку, непроницаемую для газов и жидкостей, включая агрессивные растворы. Этот метод в принципе исключает попадание радионуклидов в окружающую среду, но как это будет в действительности, покажет время.

Суммарная величина общего ущерба от последствий аварии 1957 г. на заводе «Маяк» составила по приблизительному подсчету более 12 000 млрд руб. в ценах 1991 г., считается, что авария в той или иной степени затронула не менее четверти миллиона жителей трех соседних областей – Челябинской, Свердловской и Тюменской.

Долгое время все сведения о Кыштымской аварии скрывались официальными властями от населения страны и жителей близлежащих областей, однако полностью скрыть аварию было практически невозможно из-за ее большого масштаба и огромного числа людей, соприкоснувшихся с ее последствиями. Первые сведения об инциденте просочились за рубеж уже весной 1958 г., но сама природа аварии оставалась неизвестной. Подлинные факты появились в 1979 г., когда ученый-биолог, известный правозащитник и диссидент Жорес Медведев издал в США книгу под названием «Ядерная катастрофа на Урале», в которой были достаточно подробно описаны основные события аварии [4]. Выяснилось, что ЦРУ знало об аварии еще до публикации, но умолчало об этом. Причина проста: в США активно вводились в строй АЭС, а подобные сведения могли вызвать негативную реакцию широких масс, подогрев так называемую радиофобию.

В СССР факт аварии на «Маяке» впервые подтвердили в июле 1989 г., когда были проведены слушания на заседании комитетов по экологии и здравоохранению Верховного Совета СССР [5]. Характерно, что о пострадавших населенных пунктах и о людских жертвах, связанных с аварией и ее последствиями, на этих слушаниях ничего сказано не было.

Заклучить можно следующим: в истории самых опасных ядерных аварий XX века Кыштымская авария по своему масштабу и последствиям уступает только Чернобыльской катастрофе, потому что две другие крупнейшие аварии, связанные с инцидентами на АЭС, – Уиндскейл, Англия, 1957 г. и Три Майл Айленд, США, 1979 г. – по международной классификации относятся к 5-му уровню радиационной опасности.

Настоящая статья может быть использована при преподавании дисциплин, связанных с вопросами техносферной безопасности и антропогенного воздействия на окружающую среду.

## Литература

1. *Ляндзберг Р.А.* Ингибиторы сорбции в атомной технике: Монография. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2013. – 126 с.
2. *Ларин В.И.* Комбинат «Маяк» – проблема на века. – М.: КМК, 2001. – 504 с.
3. Жизнь в радиоактивной зоне. 60 лет после Кыштымской катастрофы [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.currenttime.tv/a/28769685.html> (дата обращения: 01.04.2021).
4. *Medvedev Zh.A.* Nuclear Disaster in The Urals. – TBC The Book Service Ltd, 1979.
5. *Никупелов В.В.* Радиационная авария на Урале // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67, вып. 2. – С 75.

УДК 614.8:621.326

**А.Н. Рак<sup>1</sup>, С.Н. Царенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Донецкий национальный технический университет,  
Донецк, 83001;*

<sup>2</sup> *Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: Alexander.Rak@mail.ru*

### **ОБ ОПАСНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ В ТРЮМЕ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ НЕСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ СУДАМИ**

В статье на основании фотоматериалов, представленных в специализированном профессиональном издании для моряков, рассматривается чрезвычайная ситуация возникновения пожара лесных материалов в трюме судна от лампы накаливания. Проведенные исследования и расчеты позволяют выявить причину возникновения пожара, оценить время его развития и последствия. Статья будет полезна не только членам экипажей судов, задействованных в грузовых операциях, но и специалистам, занимающимся морскими перевозками.

**Ключевые слова:** пожар, лесоматериалы, трюм, судно, лампа накаливания.

**A.N. Rak<sup>1</sup>, S.N. Tzarenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Donetsk National Technical University,  
Donetsk, 83001;*

<sup>2</sup> *Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: Alexander.Rak@mail.ru*

### **ABOUT THE DANGER OF USING INCIDENTAL LAMPS IN THE HOLD WHEN TRANSPORTING TIMBER BY NONSPECIALIZED VESSELS**

In this article, based on photographic materials presented in a specialized professional publication for seafarers, an emergency situation of a fire of forest materials in the hold of a ship from an incandescent lamp is considered. The studies and calculations carried out make it possible to identify the cause of the fire, to estimate the time of its development and the consequences. The article will be useful not only to crew members of ships involved in cargo operations, but also to specialists involved in maritime transportation.

**Key words:** fire, timber, hold, ship, incandescent lamp.

### **Состояние проблемы и задачи исследования**

Пожар – неконтролируемое горение, приносящее материальные убытки, вред для жизни и здоровья граждан, интересам общества и государства. Особенно опасными являются пожары, возникающие на транспортных судах, перевозящих пожароопасные грузы, что может привести к значительному материальному ущербу и даже гибели людей. В настоящее время международные морские перевозки лесоматериалов осуществляются в основном специализированными судами – лесовозами. При этом погрузка и перевозка подобных грузов должны выполняться с соблюдением всех необходимых норм и правил погрузо-разгрузочных работ, пожарной безопасности, правил техники безопасности, электробезопасности и перевозки. Но иногда возникает острая необходимость перевозки таких грузов универсальными сухогрузами. Естественно, что в данном случае возникает высокая вероятность каких-либо чрезвычайных ситуаций. В п.п. 59, 60 [1] достаточно полно представлены причины возникновения на морских судах пожаров и источники самовозгорания материалов. Рассмотрим чрезвычайную ситуацию (ЧС) возникновения пожара на судне, которая приведена в [2], где разбирается ситуация погрузки в порту генерального груза в виде лесного бруса в трюмы судна и контейнеров с опасным грузом

на крышки люков трюмов. Далее описывается ЧС – развитие пожара с указанием времени срабатывания системы сигнализация обнаружения дыма в трюме через 1,5 ч, последующих действиях экипажа, властей и пожарной службы порта по ЧС.

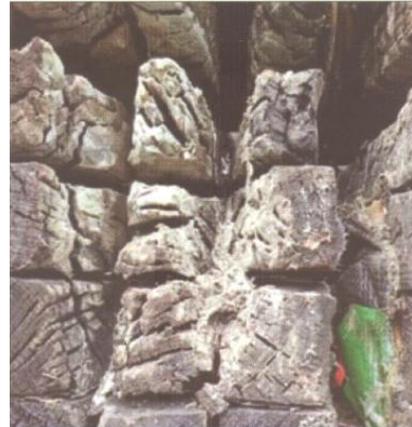
Так, согласно отчету было установлено:

– причиной возгорания оказался жар, исходящий от лампы накаливания (ЛН) в грузовом трюме (рис. 1). Деревянные брусья находились на расстоянии менее 0,5 м от лампы, что привело к возгоранию. Последствия возгорания приведены на рис. 2 и рис. 3.

– на судне не оказалось письменно оформленной процедуры или контрольного листа, в котором бы прописывалось, что освещение в трюме необходимо отключать перед погрузкой легковоспламеняющегося груза или после окончания погрузки и закрытия крышек люков.



*Рис. 1. Лампа накаливания в трюме*



*Рис. 2. Обуглившаяся древесина в месте возникновения пожара*



*Рис. 3. Последствия возгорания древесины в трюме*

Таким образом, документально оформлен факт возникновения ЧС в виде пожара и признан факт порчи груза. Поскольку информация о грузах неполная, то при таком подходе все равно не были расследованы истинные причины возгорания.

Рассмотрение данной и других ЧС имеется в открытом доступе и предоставляется бесплатно морякам при трудоустройстве в кадровых агентствах для ознакомления. Все это делается с целью избежания в дальнейшем подобных ситуаций.

Более детальное изучение материалов ЧС (рис. 2) свидетельствует о том, что представленные обстоятельства данной ситуации неоднозначны.

Цель работы – разработать метод оценки пожарной безопасности ЛН, а также ознакомить экипажи судов с возможными последствиями при халатном отношении к служебным обязанностям как со стороны администрации судна, электромеханика или лица, его замещающего, так и стивидорной компании.

Прежде чем перейти к изложению основного материала, остановимся на следующих моментах:

- погрузка судна должна осуществляться с учетом физико-химических свойств перевозимых грузов, которые должны быть указаны грузоотправителем;
- погрузка судна осуществляется в соответствии с грузовым планом, утвержденным капитаном судна, который передается стивидорной компании для осуществления погрузки.

В соответствии с отчетом установлен факт погрузки древесины с расстоянием менее 0,5 м. При этом были нарушены правила погрузки, приведенные в п. 29 раздела 4 [3], где указывается, что грузоподъемные машины устанавливаются так, чтобы при подъеме груза исключалось наклонное положение грузовых канатов и обеспечивался зазор не менее 0,5 м над встречающимися на пути перемещения груза оборудованием, штабелями груза. При перевозке лесных грузов специализированными судами эти расстояния иные, исходя из конструктивных особенностей лесовозов.

Согласно требованиям [4] в трюмах должны быть обеспечены нормы освещенности 20 лк, а согласно требованиям [5] – 30 лк. То есть нормы освещенности, приведенные в [4, 5], несколько отличаются. На большинстве лесовозов освещение трюмов вообще отсутствует. Оно осуществляется стационарными прожекторами в порту. При этом в соответствии с основными требованиями правил пожарной безопасности к электрооборудованию [6]:

1.4.7. Расстояние между светильниками с ЛН и предметами (строительными конструкциями) из горючих материалов должно быть не меньше значений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

**Расстояние между светильниками с ЛН и предметами (строительными конструкциями) из горючих материалов**

Номинальная мощность Р, Вт	Минимальное расстояние, м
100	0,5
300	0,8
500	1,0

Другие виды светильников должны размещаться от горючих материалов и предметов на расстоянии не меньше 0,5 м, а от горючих строительных конструкций – не меньше 0,2 м.

1.4.9. Расстояние от кабелей и изолированных проводов, проложенных открыто по конструкциям на изоляторах, тросах, в лотках и т. п. к местам открытого хранения (размещения) горючих материалов, должно быть не меньше 1 м.

1.4.10. В случае открытой прокладки незащищенных проводов и защищенных проводов (кабелей) с оболочками из горючих материалов расстояние от них к горючим основам (конструкций, деталей) должно составлять не меньше 0,01 м. В случае невозможности обеспечить указанное расстояние провод (кабель) следует отделять от горючей поверхности слоем негорючего материала, который выступает с каждой стороны провода (кабеля) не меньше, чем на 0,01 м.

Анализ фото (рис. 1) показывает, что были нарушены и эти пункты.

Таким образом, предполагаемым источником возгорания, исходя из расстояния 0,5 м, является ЛН мощностью 100 Вт. Как показано в [7] и на рис. 4, такую температуру могут достичь ЛН мощностью 100 и 200 Вт. Дальнейшее изучение данного вопроса показывает, что для воспламенения древесины необходимо обеспечить критическую плотность падающего лучистого потока в соответствии со значением  $q_{кр} = 13,9 \text{ кВт/м}^2$ , приведенным в [10]. При этом температура воспламенения должна достигнуть 250–300°C.

Так, в соответствии с [8] отечественной промышленностью для применения на морских судах выпускаются только ЛН мощностью 100 и 200 Вт. Их геометрические размеры для традиционной грушевидной формы (рис. 5) указаны в табл. 2.

Таблица 2

**Геометрические размеры ЛН различной мощности**

Тип ЛН	Мощность ЛН, Вт	ГОСТ	D, м	L, м	Тип цоколя
C220-100	100	1608-88	0,066	0,111	E27
C220-200	200	1608-88	0,081	0,15	
PH220-230-300-1	300	ГОСТ Р 52706-2007	0,068	0,165	

Площадь поверхности ЛН составляет:

$$S_{\text{пов}} = \pi \cdot D^2 + \pi \cdot d_{\text{ц}}^2 \cdot h = \pi \cdot D^2 + \pi \cdot d_{\text{ц}}^2 \cdot (L - D - l_{\text{ц}}), \text{ м}^2, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр шарообразной части ЛН, м;  
 $L$  – длина лампы, м;  
 $d_{\text{ц}}$  – диаметр цилиндрической части ЛН, м;  
 $h$  – высота цилиндрической части ЛН, м;  
 $l_{\text{ц}}$  – длина цоколя, м.

Для ЛН с цоколем типа E27  $d_{\text{ц}} = 0,027$  м и длина цоколя = 0,027 м.

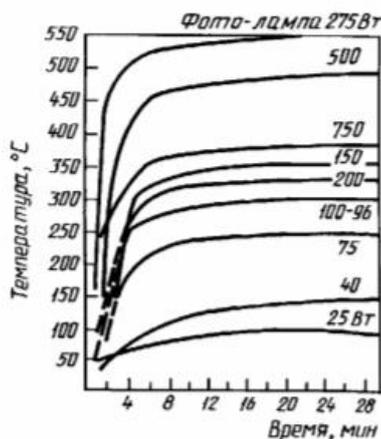


Рис. 4. Температура поверхности ЛН

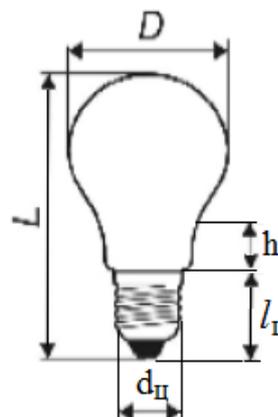


Рис. 5. Форма и габаритные размеры традиционных ЛН

Значение критической плотности теплового потока  $q_{\text{кр}}$  составит:

$$q_{\text{кр}} = \frac{P \cdot 10^{-3}}{S_{\text{пов}}}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2)$$

где  $P$  – мощность электрической лампы, Вт;

$S$  – площадь боковой поверхности лампы накаливания,  $\text{м}^2$ .

Расчеты, выполненные для ЛН указанной мощности с помощью соотношений (1) и (2), показывают, что критическая плотность падающих лучистых потоков при этом составит: для ЛН 100 Вт – 7,3 кВт/м<sup>2</sup>, а для ЛН 200 Вт – 10 кВт/м<sup>2</sup>. Для ламп иной формы необходимо поверхность лампы заменить (аппроксимировать) геометрическими фигурами, имеющими стандартное математическое описание, например, усеченные конусы, шаровые сегменты и т. п.

Если утверждать, что источником воспламенения все-таки стала ЛН, то возьмем, например, ЛН бытового назначения мощностью 300 Вт, которая изготовлена в соответствии с [9]. Ее геометрические размеры также представлены в табл. 2. При расчетах, полученных в соответствии с соотношениями (1) и (2), критическая плотность падающих лучистых потоков составит 20,27 кВт/м<sup>2</sup>. То есть для лампы данного типа можно получить величину  $q_{\text{кр}}$ , превышающую допустимую 13,9 кВт/м<sup>2</sup>.

Химическая стойкость древесины зависит от ее породы. Для увеличения срока службы дерева создают условия, необходимые для уменьшения развития микроорганизмов, грибов и насекомых. Органические вещества не вызывают разрушения древесины. Поэтому для увеличения коррозионной стойкости и эффективной защиты воздушно-сухой древесины от гниения (в качестве антисептика) древесину пропитывают формальдегидными смолами, которые отравляют организмы, вызывающие гниение древесины. Формальдегидные смолы не повышают температуру воспламенения древесины.

Горение фенолформальдегидных смол не происходит, они подвергаются обугливаю. Огонь приобретает желтый оттенок, появляются неприятный запах фенола и розовая окраска [10].

Таким образом, был нарушен п. 7.1. [11], где отмечается, что противопожарный режим устанавливается с учетом вида лесоматериалов. Пиломатериалы и сортименты, антисептированные динитрофенолом, каменноугольным, креозотовыми маслами, являются наиболее пожароопасными. При их транспортировке необходимо выполнять соответствующие требования Правил МОПОГ [12].

Можно определить и время воспламенения лесоматериалов в соответствии с [13].

Для термически толстых материалов, физическая толщина которых больше размера прогреваемого слоя (образцы толщиной 15–20 мм), время воспламенения определится в соответствии с выражением (3), а для термически тонких материалов, физическая величина которых меньше толщины прогреваемого слоя (образцы толщиной 1–2 мм), – в соответствии с выражением (4). Для образцов с промежуточной величиной – по выражению (5).

$$t_b = \frac{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c \cdot (T_b - T_0)^2}{4 \cdot q^2}, \quad (3)$$

$$t_b = \frac{\rho \cdot c \cdot L_o \cdot (T_b - T_0)}{q}, \quad (4)$$

$$t_b = \rho \cdot c \cdot (k \cdot L_o)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{(T_b - T_0)}{q} \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

где  $k$  – теплопроводность материала, Вт/(м·К);

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

$T_b$  и  $T_0$  – температура поверхности материала при воспламенении материала и начальная соответственно, °К;

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$L_o$  – толщина образца, м.

Подставляя в выражение (3) значения входящих в нее величин, получаем, что время воспламенения древесины составит примерно 1 ч.

Время горения можно определить и по величине обуглившегося слоя. После возгорания древесина начинает обугливаться со скоростью примерно 0,8 мм в минуту. В массивном лесоматериале очаг возгорания распространяется медленно, поскольку обугленная часть древесины задерживает продвижение огня и замедляет нагревание внутренних слоев древесины, и таким образом препятствует развитию пожара. Например, на расстоянии 15 мм от обугленной зоны температура древесины составляет ниже 100°С. Это свойство используется, например, при расчетах размеров несущих конструкций.

При дальнейшем повышении температуры это могло бы спровоцировать воспламенение опасного груза, перевозимого в контейнерах на открытой палубе.

Сделаны следующие выводы:

1. Капитаном судна были нарушены требования «Правил безопасности морской перевозки лесных грузов», п. 1.5 [11] в части представления «Информации о грузе», содержащей достоверную и полную информацию о транспортных характеристиках, всех особых и опасных свойствах груза, о мерах предосторожности, соблюдение которых необходимо для безопасной и сохранной перевозки груза, а также п. 4.4 [11] в части подготовки трюмов к транспортированию лесных грузов, пропитанных антисептическими материалами.

2. Экипажем судна был нарушен п. 4.7 [11], в котором указывается, что по окончании погрузки электроосвещение трюмов должно быть отключено. Вместо этого указывается, что отсутствовала письменная оформленная процедура или контрольный лист, в котором бы прописывалось, что освещение в трюме необходимо отключать перед погрузкой легковоспламеняющегося груза или после окончания погрузки и закрытия крышек люков.

3. Для соблюдения требований норм освещенности, предписанных в [3, 4], на судне применялись лампы бытового назначения большей мощности, изготовленные по ГОСТ [9], а не лампы, рекомендуемые для применения на морских судах по ГОСТ [8].

4. Стивидорной компанией были нарушены «Правила по охране труда при погрузочно-разгрузочных работах» [3] и «Правила построения электроустановок» [6] в части соблюдения безопасных расстояний между грузом и ЛН.

5. Фактически было составлено мировое соглашение между представителями грузоотправителя в лице порта и грузоперевозчика в лице капитана судна для минимизации возмещения материальных потерь грузополучателю, связанных с порчей груза.

6. Для предотвращения возгорания перевозимых в трюмах лесоматериалов неспециализированных судов рекомендуются светодиодные лампы.

### Литература

1. Постановление Минтранса РФ от 31.10.2003 № 10 «О правилах пожарной безопасности на морских судах» [Электронный ресурс]. – URL: <https://rulaws.ru/acts/Postanovlenie-Mintransa-RF-ot-31.10.2003-N-10/>

2. The Maritime Telegraph (Морская правда). – № 6 (0611). – Июнь 2019 – Одесса, 2019. – С. 14.

3. Правила по охране труда при погрузочно-разгрузочных работах и размещении грузов: Приказ Министерства труда № 753Н от 28 октября 2020 года [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573113861>.

4. Санитарные правила для морских судов СССР. – М.: Моркнига, 2018. – 184 с.

5. НПАОП 63.22-1.04-88. Правила безопасности труда в морских портах (1690) [Электронный ресурс]. – URL: [https://dnaop.com/html/1690\\_3.html](https://dnaop.com/html/1690_3.html)

6. НАПБ В.01.056-2005. Правила построения электроустановок. Противопожарная защита электроустановок (СОУ-Н МПЕ 40.1.03.310:2005) (3509) [Электронный ресурс]. – URL: [https://dnaop.com/html/3509\\_2.html](https://dnaop.com/html/3509_2.html).

7. ГОСТ 12.1.004-91. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2006. – 68 с.

8. ГОСТ 1608-88. Лампы накаливания судовые. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 28 с.

9. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52706-2007 (МЭК 60064:1993). Лампы накаливания вольфрамовые для бытового и аналогичного общего освещения. Эксплуатационные требования.

10. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров: Учебник для вузов. – СПб.: СПбЛТА, 1999. – 628 с.

11. Правила безопасности морской перевозки лесных грузов. РД 31.11.21.01-97. Том 2. – М.: ЦНИИМФ, 1996. – 70 с.

12. Правила морской перевозки опасных грузов (Правила МОПОГ). РД 3115 01-89. – Том I. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1990. – 664 с.

13. Mikkola E., Wichman I.S. On the Thermal Ignition of Combustible Materials // Fire and Materials. – 1989. – Vol. 14. – P. 87–96.

УДК 629.5.03:539.3/6

**С.Н. Царенко, А.А. Молчан, А.А. Мхоян**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: tzarenko@gmail.com*

### **ДИНАМИКА ВАЛОПРОВОДА ГРЕБНОГО ВИНТА ПРИ ЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ РАЗГОНА**

В работе представлена математическая модель крутильных колебаний валопровода гребного винта, возникающих в режиме разгона. Рассмотрен случай разгона, когда скорость меняется по линейной зависимости от времени. Получены расчетные зависимости для определения деформаций и крутящих моментов в сечениях вала. Выполнено сравнение динамических коэффициентов для двух случаев разгона: линейного и экспоненциального.

**Ключевые слова:** валопровод, режим разгона, математическая модель, динамические усилия, крутильные колебания, собственная частота, метод Фурье.

**S.N. Tzarenko, A.A. Molchan, A.A. Mkhoyan**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: tzarenko@gmail.com*

### **DYNAMICS OF THE PROPELLER SHAFT LINE IN LINEAR ACCELERATION MODE**

The paper presents a mathematical model of torsional vibrations of the propeller shaft line arising in the acceleration mode. The case of acceleration is considered, when the speed varies linearly with time. Calculated dependences for determining deformations and torques in shaft sections are obtained. The dynamic coefficients are compared for two cases of acceleration: linear and exponential.

**Key words:** shaft line, acceleration mode, mathematical model, dynamic forces, torsional vibrations, natural frequency, dissipative forces, Fourier method.

Валопровод предназначен для передачи крутящего момента от двигателя гребному винту. Помимо кручения, он испытывает продольные и поперечные воздействия статического и динамического характера [1]. Статические расчеты, как правило, выполняются классическими методами сопротивления материалов. Учет динамических воздействий – более сложная задача, для решения которой используют как точные, так и приближенные методы сопротивления материалов и математической физики [2–5].

Наиболее интенсивным динамическим воздействиям валопровод подвергается при переходных режимах работы (разгон, торможение) и аварийных ситуациях. В работе [6] проведено исследование динамики валопроводов для случая, когда выход на номинальную скорость вращения осуществляется по экспоненциальному закону, данная зависимость наилучшим образом отражает физическую природу процесса. Однако задать точно зависимость углов поворота при разгонном режиме не представляется возможным, так как она во многом будет зависеть от типа двигателя (дизельный, электрический), от системы управления движителем. Поэтому для решения многих технических задач используют линейную аппроксимацию, в частности для определения времени разгона электродвигателей.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) валопровода гребного винта в режиме разгона, когда угловая скорость изменяется по линейной зависимости.

### Расчетные зависимости

Основные допущения для вывода расчетных зависимостей примем такие же, как в работе [6]. А именно – систему валов валопровода заменим однородным упругим стержнем длиной  $l$ , крутильной жесткостью  $GJ_p$  и равномерно распределенным по длине моментом инерции масс  $\gamma J_p$  (рис. 1). На конце вала располагается гребной винт с моментом инерции  $I_M$  и учитывается момент гидродинамического сопротивления, пропорциональный квадрату угловой скорости. Левый торец вала поворачивается по заданному закону движения –  $\theta = f(t)$ , моделирующего разгонный режим. Движение произвольного сечения вала рассматривается как сложное, состоящее из переносного движения левого торца вала и относительного движения деформации вала. Углы поворота для произвольного сечения определяются зависимостью:

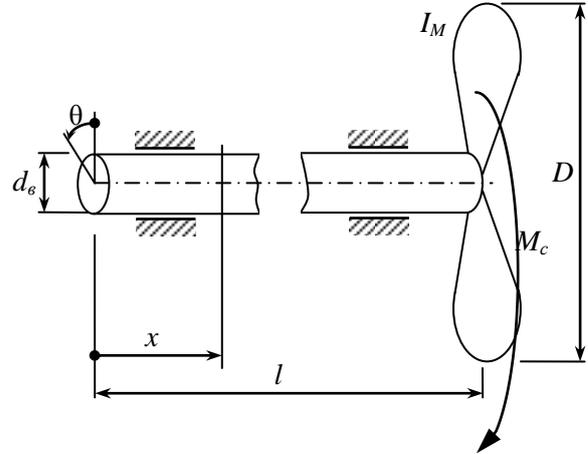


Рис. 1. Расчетная схема валопровода

$$\psi = \theta + \varphi, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол закручивания.

Уравнение углов закручивания имеет вид [6]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2} = 2\mu \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \delta(\xi - 1) + \tilde{R}_c \left( \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right)^2 \delta(\xi - 1) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2}, \quad (2)$$

здесь введены следующие обозначения:

$\xi = x / l$  – безразмерная координата;

$\tau = tc / l$  – безразмерное время,

$c = \sqrt{GJ_p / \gamma J_p}$  – скорость распространения крутильных волн в стержне;

$\delta(x)$  – дельта-функция Дирака;

$$\mu = \frac{R_c \dot{\theta}_{\text{ном}} c}{2GJ_p};$$

$R_c$  – коэффициент гидродинамического сопротивления;

$\dot{\theta}_{\text{ном}}$  – номинальная угловая скорость;

$$\tilde{R}_c = \frac{R_c c^2}{GJ_p l}.$$

При выводе угловой скорости вращения вала на номинальную величину  $\dot{\theta}_{\text{ном}}$  за промежуток времени  $T$  в соответствии с линейным законом с учетом ранее введенных обозначений получим зависимость:

$$\dot{\theta}(\tau) = \frac{\dot{\theta}_{\text{ном}} l}{Tc} \tau. \quad (3)$$

Дальнейшие обозначения будут: точка – для производных по  $\tau$ , штрих – по  $\xi$ . Постановку начальной и граничной задачи (2) сохраним, как в работе [6]:

$$\varphi(0, \tau) = 0; \quad \frac{GJ_p}{l} \varphi'(1, \tau) = \frac{I_M c^2}{l^2} \ddot{\varphi}(1, \tau), \quad (4)$$

$$\varphi(\xi, 0) = 0; \quad \dot{\varphi}(\xi, 0) = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (2) в соответствии с методом Фурье находится в виде ряда произведения функций:

$$\varphi(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(\xi) w_n(\tau). \quad (6)$$

Собственные функции  $\Phi_n$  принимаются, исходя из удовлетворения уравнения вида [7]:

$$\Phi_n'' + \lambda_n^2 \Phi_n = 0, \quad (7)$$

где  $\lambda_n$  – собственные значения.

В соответствии с первым граничным условием (4) решение уравнения (7) будет иметь вид:

$$\Phi_n(\xi) = \frac{\sin \lambda_n \xi}{\lambda_n}. \quad (8)$$

Второе граничное условие (4) дает уравнение для нахождения собственных значений:

$$\tan \lambda_n = \frac{1}{\zeta \lambda_n}, \quad (9)$$

здесь  $\zeta = I_M / (\gamma J_p l)$  – относительная инерционная нагрузка.

С учетом свойства ортогональности собственных функций с весом, уравнение для нахождения функций  $w_n$  будет иметь вид:

$$\ddot{w}_n + 2\tilde{\mu}_n \dot{w}_n + \lambda_n^2 w_n = -\frac{\tilde{R}_c \Phi_n(1)}{\Delta_n^2} \left( \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right)^2 + \frac{1}{\Delta_n^2 \lambda_n^2} (\Phi_n'(1) - 1 - \zeta \lambda_n^2 \Phi_n(1)) \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2}, \quad (10)$$

где  $\Delta_n^2 = (2\lambda_n - \sin 2\lambda_n + 4\zeta \lambda_n \sin^2 \lambda_n) / (4\lambda_n^3)$  – квадрат нормы собственных функций;

$$\tilde{\mu}_n = \mu \Phi_n(1) / \Delta_n^2.$$

Подставив выражение для скорости (3) в уравнение (10), его решение находим в виде:

$$w_n(\tau) = A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n \tau^2 + D_n \tau + E_n, \quad (11)$$

где  $\beta_n = \sqrt{\lambda_n^2 - \tilde{\mu}_n^2}$ ;

$A_n, B_n$  – произвольные постоянные, которые находятся из начальных условий (5);

$C_n, D_n, E_n$  – коэффициенты, определяемые из равенства значений при соответствующих степенях переменной  $\tau$  левой и правой частей уравнения (10).

Собственные частоты крутильных колебаний будут:

$$\omega_n = \beta_n c / l. \quad (12)$$

Выражения для углов поворота, угловых скоростей и крутящих моментов произвольных сечений вала можно представить в виде:

$$\psi(\xi, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n \xi}{\lambda_n} \left( A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n \tau^2 + D_n \tau + E_n \right) + \frac{\dot{\theta}_{\text{ном}} l^2}{2Tc^2} \tau^2; \quad (13)$$

$$\dot{\psi}(\xi, \tau) = \frac{c}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda_n \xi}{\lambda_n} \left( e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau (\beta_n A_n - \tilde{\mu}_n B_n) - e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau (\tilde{\mu}_n A_n + \beta_n B_n) + 2C_n \tau + D_n \right) + \frac{\dot{\theta}_{\text{ном}} l}{Tc} \tau; \quad (14)$$

$$M(\xi, \tau) = \frac{GJ_p}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda_n \xi \left( A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n \tau^2 + D_n \tau + E_n \right). \quad (15)$$

Динамический коэффициент примем как отношение крутящего момента в сечении вала к номинальному моменту сопротивления:

$$K_d(\xi, \tau) = \frac{GJ_p}{l R_c \dot{\theta}_{\text{ном}}^2} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda_n \xi \left( A_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \sin \beta_n \tau + B_n e^{-\tilde{\mu}_n \tau} \cos \beta_n \tau + C_n \tau^2 + D_n \tau + E_n \right). \quad (16)$$

### Результаты моделирования

Чтобы сопоставить результаты двух режимов разгона, параметры модели примем такими же, как в работе [6] для траулера «Механик Ковтун»: номинальная частота вращения  $\dot{\theta}_{\text{ном}} = 16,3$  рад/с; длина валопровода  $l = 11,35$  м; приведенная жесткость валопровода  $GJ_p = 1,33 \cdot 10^8$  Н · м<sup>2</sup>; скорость распространения волн крутильных колебаний в стальном стержне  $c = 3\,200$  м/с; относительная инерционная нагрузка  $\zeta = 22$ ; коэффициент гидродинамического сопротивления  $R_c = 587$  кг · м<sup>2</sup>; время разгона  $T = 0,105$  с.

На графике рис. 2 штриховой линией показана угловая скорость поворота левого торца вала в соответствии с законом движения (3), сплошной линией – угловая скорость правого торца вала по зависимости (14). На рис. 3 представлена зависимость динамического коэффициента (16) от времени для левого торца вала ( $\xi = 0$ ), численно максимальное значение динамического коэффициента составляет  $K_d \approx 6,6$ , что почти вдвое меньше динамического коэффициента, найденного для случая экспоненциального разгона ( $K_d = 11$ ) [6].

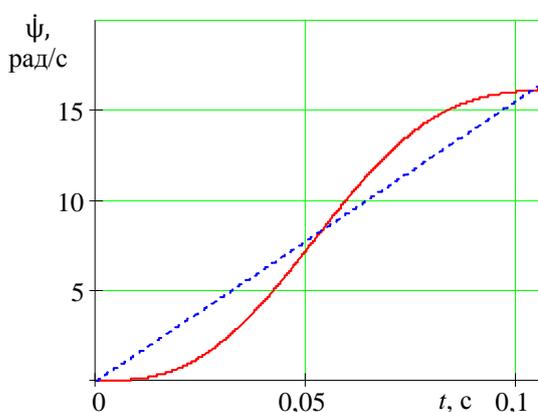


Рис. 2. Угловые скорости торцевых сечений валопровода

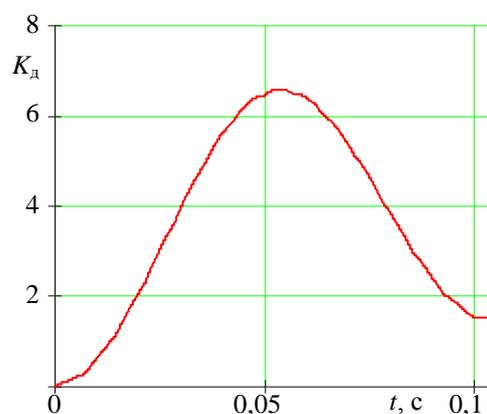


Рис. 3. Динамический коэффициент на левом торце вала

С одной стороны, очевидным является вывод о том, что линейный режим разгона является более благоприятным по сравнению с экспоненциальным. Использование линейного режима позволяет снизить динамические напряжения в валопроводе, а также при относительно небольшой перегрузке уменьшить время выхода на номинальную скорость вращения. Однако с другой стороны, следует принять во внимание, что на практике при выходе на номинальную скорость вращения инерционные нагрузки уменьшаются до нуля, а при линейном режиме разгона они сохраняют постоянную величину. Таким образом, линейная аппроксимация разгонного режима не в полной мере отражает физическую природу процесса, а ее использование в расчете может давать существенно заниженные значения динамических нагрузок.

### Литература

1. Судовой механик: Справ. / Под общ. ред. А.А. Фока. – Одесса: Фенікс, 2008. – Т. 1. – 1036 с.
2. *Ларин А.А.* Роль исследований крутильных колебаний валопроводов в развитии динамики машин // Питання історії науки і техніки. – 2009. – № 4. – С. 2–9.
3. *Коврижных М.Н., Глушков С.С.* Расчет амплитуд свободных колебаний дискретных многомассовых систем // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 162–164.
4. *Мартыанов В.В.* Оценка угрозы возникновения резонансных колебаний на примере расчета крутильных колебаний судового валопровода пассажирского теплохода пр. Р118 // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 359–368. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-359-368.
5. *Jee Jaehoon, Chongmin Kim, Yanggon Kim.* Design Improvement of a Viscous-Spring Damper for Controlling Torsional Vibration in a Propulsion Shafting System with an Engine Acceleration Problem // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – Vol. 8. – P. 428. DOI: 10.3390/jmse8060428.
6. *Царенко С.Н., Рак А.Н., Безлобенко Б.Н.* Динамика валопровода гребного винта при разгонных режимах // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 548–558. DOI:10.21821/2309-5180-2021-13-4-548-558.
7. *Филиппов А.П.* Колебания механических систем. – Киев: Наукова думка, 1965. – 716 с.

## СЕКЦИЯ 5. ГУМАНИТАРНАЯ СЕКЦИЯ

УДК 620.19:629.5.023

**Е.П. Белова**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kuroyatnikova@mail.ru*

### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИИ МОРСКИХ СУДОВ В ИНОСТРАННОЙ НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ

В вопросах исследования процессов коррозии и защиты корпусов морских судов учеными различных стран проводится большой объем научных исследований. Это обусловлено остротой общемировой проблемы защиты кораблей и судов от коррозии и необходимостью поиска эффективных путей ее решения. В научных публикациях многих авторов данной проблеме уделяется большое внимание. Основным объемом результатов этих исследований публикуется в англоязычных научных изданиях, что ограничивает возможность широкого доступа к ним русскоязычных исследователей. С учетом актуальности данного вопроса, существует объективная необходимость ознакомления с достижениями и мировым опытом обеспечения защиты кораблей и судов от коррозии. В статье проводится анализ некоторых иностранных научных публикаций по теме исследования коррозии морских судов.

**Ключевые слова:** корпус судна, электрохимическая коррозия, катодная защита, техническое обслуживание, техническая эксплуатация, надежность, безопасность.

**E.P. Belova**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: kuroyatnikova@mail.ru*

### THE MAIN RESEARCH TRENDS ON CORROSION OF MARINE VESSELS IN FOREIGN SCIENTIFIC LITERATURE

A large amount of scientific research is carried out by scientists from various countries in the study of corrosion processes and protection of marine hulls. This is due to the severity of the global problem of protecting ships and vessels from corrosion and the need to find effective ways to solve it. Much attention is paid to this problem in the scientific publications of many authors. The bulk of the results of these studies are published in English-language scientific publications, which limits the possibility of wide access to them by Russian-speaking researchers. Taking into account the urgency of this issue, there is an objective need to get acquainted with the achievements and world experience in providing protection of ships and vessels from corrosion. The article analyzes some foreign scientific publications on the topic of marine vessels corrosion.

**Key words:** ship hull, electrochemical corrosion, cathodic protection, maintenance, technical operation, reliability, safety.

Зарубежными учеными уделяется большое внимание исследованию проблемы организации защиты корпусов кораблей и судов от коррозии, а также задачам восстановления корпусов, повышению их прочности и надежности после устранения коррозионных деформаций и разрушений. В зарубежных научных изданиях широко освещаются вопросы организации контроля за состоянием корпуса судна в процессе эксплуатации, в том числе с использованием информационных технологий и применением специальных автоматизированных комплексов. Анализ этих публикаций подтверждает как актуальность темы исследований, так и многообразие рассматриваемых вопросов в объеме данной темы [1].

Так, еще в 2000 г. В.Х. Хартт (W.H. Hartt) в своем докладе «Морская катодная защита – исторические тенденции и последние достижения» (“Marine cathodic protection – historical trends and

recent accomplishments”) перечислил исторические отличительные достижения, связанные с проектированием и функционированием систем катодной защиты морских сооружений. Им представлен сравнительный анализ начальных принципов разработки защитных систем, основанных на методе параметров наклона и разработанном на его основе едином расчетном уравнении с современной стандартной практикой проектирования. В работе описано применение, в том числе преимущества и ограничения этого подхода как к гальваническим, так и к импрессионным токовым системам катодной защиты на пространственных каркасах (например, нефтедобывающие платформы), двухмерных (корпуса судов) и одномерных (трубопроводы и кабели) конструкциях. Автором показано преимущество этого метода в сравнении с существующими стандартными рекомендуемыми практиками [2].

В 2009 г. группой авторов под руководством Ф. Дарчивио (F. Darchivio) была опубликована статья «Катодная защита корпусов судов гальваническими анодами: проектная оценка» (“Cathodic protection of ship hulls by galvanic anodes: design evaluation”). В данной статье отмечается, что несмотря на совершенствование и развитие систем антикоррозионной защиты, затраты на восстановление судов и ремонт их корпусов, поврежденных коррозией, остаются высокими. Сокращение затрат на ремонт в современных реалиях является важной и актуальной задачей. Для решения этой задачи авторами предлагается методика моделирования электрохимии распределения тока по корпусу судна для лучшего понимания протекающих процессов и дальнейшего совершенствования антикоррозионной защиты судов, а также продления их срока службы. Авторы статьи обосновывают целесообразность проверки реального расхода гальванических анодов (протекторов) и дооснащения проектных критериев во время ремонта судна в сухом доке при очередном освидетельствовании. На сегодняшний момент такой подход не является стандартным, и продолжает использоваться технология удаления оставшихся протекторов в ходе подготовки корпуса судна к ремонту в сухом доке. В статье проводится оценка эффективности работы системы катодной защиты на примере нескольких судов и определяются основные возможности совершенствования их конструкции [3].

В это же время научному сообществу была представлена обширная работа в области исследования коррозии морских судов «Коррозия сталей в морской среде, мониторинг и стандарты» (“Corrosion of steels in marine environment, monitoring and standards”). Авторами этой публикации являются Маринела Панаётова (Marinela Panayotova), Йордан Горбатов (Yordan Garbatov) и Карлос Соарес (Carlos Soares). В данной работе подробно описываются различные формы коррозии стали в морской среде. Выполнен глубокий анализ коррозионных процессов, которым подвергаются конструкционные стали при нахождении в морской среде. Представлены различные модели коррозии, и проанализирована их способность прогнозировать развитие коррозионных процессов. Также рассматриваются дополнительные факторы, активизирующие коррозионные процессы на уровне составных компонентов конструкционных сталей в процессе эксплуатации металлических корпусов. В статье предлагается обсуждение влияния состава сталей и его разновидностей на интенсивность процессов коррозии. Авторами также рассматриваются и другие эксплуатационные факторы, влияющие на развитие коррозии балластных систем, нефтяных танков и грузовых трюмов. В статье выполнен анализ методов и средств мониторинга, натурных испытаний и комплексной оценки защиты от коррозии [4].

Некоторые исследователи отмечают необходимость комбинированной защиты корпуса судна. Так, в статье «Обзор морской защиты от коррозии с акцентом на катодную защиту и покрытия» (“An overview of marine corrosion protection with a focus on cathodic protection and coatings”) рассматривается эффективность существующих вариантов антикоррозионной защиты. Отмечается, что наиболее распространенными методами защиты от коррозии остаются катодная защита и использование специальных покрытий корпуса. Так как каждый из этих методов имеет свои недоработки, наиболее эффективным, по мнению авторов, является комплексный подход с сочетанием катодной защиты и лакокрасочных покрытий. Такое сочетание методов способствует повышению уровня антикоррозионной защиты и обеспечивает ее работоспособность в течение длительного периода времени. В статье авторами приводится пример расчета системы катодной защиты на основе производственных характеристик, применяемых в судоремонте лакокрасочных покрытий [5].

В этот же период многие авторы научных публикаций по данной теме обращают внимание на важность технического обслуживания и поддержание в работоспособном состоянии систем антикоррозионной защиты. В частности, Фернандо Б. Майнер (Fernando B. Mainier) и Витор Перассолли

(Vitor Perassolli) в статье «Коррозия корпуса судна, вызванная неисполнением и отсутствием технического обслуживания по импульсному току катодной защиты» (“Ship hull corrosion caused by default and lack of maintenance on the impressed current cathodeic protection”) рассматривают последствия коррозионных повреждений корпуса судна вследствие его эксплуатации с вышедшей из строя системой катодной защиты. Сама система катодной защиты: ее конструкция, технология монтажа, техническое обслуживание и эксплуатация – авторами статьи признается эффективной. При этом приводятся последствия воздействия активных коррозионных процессов на корпус в период полугодовой стоянки судна на якоре с нефункционирующей катодной защитой. Также авторами оценивается объем работ, выполненных в период ремонта судна для устранения последствий коррозионных разрушений и восстановления эксплуатационных качеств корпуса [6].

Особое место в зарубежных публикациях отводится вопросам моделирования коррозионных процессов и работы защитных систем. Рассмотрение этих вопросов представлено в статьях «Предотвращение коррозии корпуса судна при помощи ICCP и моделирования» (С. Fairclough “Avoiding Ship Hull Corrosion with ICCP and Simulation”) и «Имитация импрессионного тока катодной защиты» (В. Nistad “How to Simulate Impressed Current Cathodic Protection”). В статьях указывается, что катодная защита является распространенным методом защиты металлических конструкций от гальванической коррозии, и приводится описание, как работает этот метод и для каких приложений он обычно используется. Приведен пример такого моделирования на корпусе судна, а также объясняются ключевые моменты для его реализации. Подчеркивается, что эффективность этого метода зависит от таких факторов, как характеристики конструкции винта и гребного вала. В публикациях применяется моделирование, чтобы исследовать влияние характеристик конструкции винта и гребного вала на эффективность использования импрессионного тока катодной защиты (ICCP). В этой модели одним из важных аспектов является сигнатура электрического поля, возникающая в результате работы системы катодной защиты вала и гребного винта на борту [7, 8].

Подобные вопросы рассматриваются в статье «Использование информационных технологий при оценке коррозионных повреждений корпуса судна» (“The use of information technology in the assessment of the corrosion damage on ship hull”). Как известно, коррозия является одним из ключевых факторов деградации корпуса судна. В этой связи в статье обращается внимание на необходимость обеспечения бесперебойной работы и безопасности плавания судна на протяжении всего периода эксплуатации. В качестве необходимых условий для достижения данной цели авторы рассматривают возможности современных информационных технологий, программных средств и средств измерений. Приводится подробный анализ как самих информационных технологий, так и методов их применения при оценке технического состояния корпуса судна, анализа и прогнозирования активности протекания коррозионных процессов [9].

Следует отметить, что данное направление является весьма актуальным, что подтверждается наличием большого числа публикаций по этой теме как в зарубежных, так и в отечественных научных изданиях. Именно вопросам контроля, аналитического прогнозирования и оценки фактического состояния защищенности корпуса судна посвящен ряд работ представителей Камчатского государственного технического университета [10–15].

В статье «Экспериментальное исследование термоэлектрического генератора как источника импульсного тока катодной защиты корпуса судна» (“Experimental Study of Thermoelectric Generatoras Electrical Source of Impressed Current Cathodic Protection for Ship Hull”) группа ученых индонезийского университета в составе Ади Курниавана (Adi Kurniawan), Сутопо Пурвон Фитри (Sutopo Purwono Fitri), Мухаммада Рахмана (Muhammad Rahman) подчеркивает, что катодная защита импульсным током является эффективным методом защиты металлических конструкций, в том числе корпуса судна, от коррозии. С целью реализации способа катодной защиты импульсным током авторами исследования был разработан прототип термоэлектрического генератора с отбором мощности от системы выхлопных газов дизельной энергетической установки. Экспериментальные исследования прототипа термоэлектрического генератора на действующем судне позволили получить данные для вычисления требуемых параметров мощности генератора для эффективного электропитания системы катодной защиты импульсным током. Основным выводом по результатам данной работы показывает возможность снижения скорости протекания коррозионных процессов за счет применения метода катодной защиты импульсным током, и при этом не нести дополнительных затрат на производство необходимой для этого электроэнергии [16].

Одним из главных направлений в исследованиях проблемы коррозии является обеспечение параметров надежности эксплуатируемых систем. Этим вопросам посвящена статья «Надежность системы при коррозии набора корпуса судна» (“System reliability of corroded ship hull girders”). Основное внимание в данной статье уделяется оценке надежности, которая является одним из основных показателей планирования технического обслуживания судов, подверженных коррозии. Авторами используется апробированный и усовершенствованный метод расчета надежности первого порядка (МНПП). Эффективность данного метода продемонстрирована в представленных в публикации результатах оценки надежности корпуса морского танкера, подвергнутого воздействию коррозии. Методом параметрического анализа изучено влияние пространственной зависимости между переменными, связанными с различными участками, на вычисленную вероятность отказа судна. На основании этого сделан вывод о влиянии погрешностей математической модели прогнозирования поведения элементов корпусных конструкций при динамических нагрузках на вероятность их разрушения [17].

Восстановление судов, поврежденных коррозией, и оценка качества выполненных ремонтных работ являются продолжением темы обеспечения надежности и также часто встречаются в иностранной научной литературе. В своей статье «Анализ модернизации конструкции корпуса танкера, поврежденного коррозией» (“Retrofitting analysis of tanker ship hull structure subjected to corrosion”) Дэвид Чичи (David Chichi) и Йордан Гарбатов (Yordan Garbatov) определяют целью исследования изучение эффективности восстановления эксплуатационных свойств корпуса нефтяного танкера в ходе устранения коррозионных повреждений. Оценка производится с учетом финансовых затрат, связанных с дооснащением или заменой элементов корпуса. С использованием метода Монте-Карло моделируется неравномерность коррозионной деградации элементов корпуса судна и определяется степень вероятности выхода из строя. В качестве дооснащения рассматриваются варианты полной замены листов обшивки корпуса, применение дополнительных продольных и поперечных ребер жесткости и усиление фланцевых отверстий. Всего в статье рассматривается и анализируется более десятка возможных сценариев. Для оценки надежности различных решений во времени авторами также используется метод надежности первого порядка (МНПП). Для сравнения сценариев и определения наиболее подходящего проводится оценка затрат и связанных с ними рисков. Также сравниваются наиболее выгодные и наименее удачные решения с учетом вероятности отказа, стоимости и сопутствующих рисков [18].

Одной из последних публикаций по данной теме является статья «Оценка эксплуатационных характеристик металла корпуса судна в морской воде» (“Performance assessment of Ship hull metal in seawater media”), опубликованная в Journal of Engineering Research and Reports в августе 2020 г. учеными Нигерийского федерального университета нефтяных ресурсов (Federal University of Petroleum Resources). Ключевой целью данного исследования является определение влияния коррозии на свойства материалов, применяемых для эксплуатации в морской среде. Результат эксперимента показал, что без защитных покрытий металлических материалов процессы коррозии протекают более активно. С использованием оборудования для определения твердости материалов исследовались различные образцы до погружения в морскую воду и после погружения. Результаты этого исследования демонстрируют зависимость величины отклонения стандартных характеристик материалов как от качества покрытия, так и от вида используемого материала. В частности, экспериментально подтверждена лучшая устойчивость материалов из алюминия к коррозионному воздействию [19].

Таким образом, зарубежными учеными уделяется большое внимание вопросам организации контроля за состоянием корпуса судна в процессе эксплуатации, в том числе с использованием информационных технологий и применением специальных автоматизированных комплексов и программных средств. Задачи организации защиты корпусов кораблей и судов от коррозии, а также вопросы восстановления корпусов, повышения их прочности и надежности после устранения коррозионных деформаций и разрушений также продолжают оставаться актуальными. С учетом востребованности флотом эффективных методов и способов защиты от коррозии и контроля за состоянием корпуса судна эта информация является особенно актуальной.

## Литература

1. Белова Е.П., Белов О.А. Обзор иностранных научных публикаций по теме защиты от коррозии // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – С. 5–8.

2. *Hartt W.H.* Marine cathodic protection-historical trends and recent accomplishments. ConferencePaper OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. – Vol. 3. – 2000.
3. *Darchivio F., Cassanelli A., Simison S.* Cathodic protection of ship hulls by galvanic anodes: design evaluation // Nace International. Corrosion 2209: Conference and Expo. – January 2009. – P. 1–7.
4. *Panayotova M., Garbatov Y., Soares C.G.* Corrosion of steels in marine environment, monitoring and standards // Safety and Reliability of Industrial Products, Systems and Structures. – Taylor and Francis Group. – London, 2010. – P. 369–413.
5. *Tezdogan T., Demirel Y.K.* An overview of marine corrosion protection with a focus on cathodic protection and coatings // Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike. – Vol. 65. – June 2014. – P. 49–59.
6. *Mainier F.B., Perassolli V.* Ship hull corrosion caused by default and lack of maintenance on the impressed current cathodic protection // IOSR Journal of Engineering. – Vol. 04. – February 2014. – P. 34–39.
7. *Fairclough C.* Avoiding Ship Hull Corrosion with ICCP and Simulation. – URL: <https://www.comsol.com>. – 2015.
8. *Nistad B.* How to Simulate Impressed Current Cathodic Protection. – URL: <https://www.comsol.com>. – 2019.
9. *Ivocevic S., Bauk S.* The use of information technology in the assessment of the corrosion damage on ship hull // 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT). – February 2018.
10. К вопросу использования судовых электродов сравнения, выполненных из нержавеющей стали / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.О. Рогожников, Б.В. Тарабанов* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Третьей международной науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – С. 41–46.
11. К вопросу использования алюминиевых электродов для контроля защищенности от коррозии стальных корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов, Б.В. Тарабанов* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2021. – № 3. – С. 23–32.
12. О целесообразности использования хлорсеребряных электродов для контроля систем протекторной защиты стального корпуса судна / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, А.П. Ушакевич, Г.В. Кузнецов* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй международной науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 121–124.
13. К вопросу использования стальных пластин для контроля протекторной защиты корпусов судов и кораблей / *Д.П. Ястребов, О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина, С.А. Зайцев* // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Второй международной науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 125–129.
14. Разработка автоматизированной системы контроля протекторной защиты корпусов рыбопромысловых судов / *О.А. Белов, Д.П. Ястребов, А.О. Рогожников, В.А. Швецов, С.А. Зайцев, Б.В. Тарабанов* // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: Материалы XI Национальной (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2020. – С. 82–85.
15. *Белов О.А., Швецов В.А., Белавина О.А.* Способ контроля защищенности стальных корпусов кораблей и судов от электрохимической коррозии и электрокоррозии: Патент на изобретение RU 2643709 C1, 05.02.2018. Заявка № 2017115308 от 28.04.2017.
16. *Kurniawan A., Fitri S.P., Rahman M.* Experimental Study of Thermoelectric Generator as Electrical Source of Impressed Current Cathodic Protection for Ship Hull // International Journal of Marine Engineering Innovation and Research. – Vol. 1 (3). – June 2017. – P. 143–148.
17. *Gong Ch. Frangopol D.* System reliability of corroded ship hull girders // Structure and Infrastructure Engineering. – Vol. 16. – December 2019. – P. 1–9.
18. *Chichi D., Garbatov Y.* Retrofitting analysis of tanker ship hull structure subjected to corrosion // Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike. – Vol. 70. – June 2019. – P. 87–109.
19. *Udosoh N.E., Awwal S.I.* Performance assessment of ship hull metal in seawater media // Journal of Engineering Research and Reports. – Vol. 15. – August 2020. – P. 50–56.

УДК 378.14:372.881.111.1

**О.Г. Каверина<sup>1</sup>, Т.А. Сирота<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Донецкий национальный технический университет,  
Донецк, 83001;*

<sup>2</sup> *Донецкий национальный университет,  
Донецк, 83001  
e-mail: ansir2911@gmail.com*

### **РАЗВИТИЕ УМЕНИЯ РАБОТАТЬ С ИНФОРМАЦИЕЙ НА ИНОСТРАННОМ ЯЗЫКЕ КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РОСТА**

В статье рассматривается умение работать с информацией как системное образование. Обосновывается необходимость развития данного умения для повышения профессионального уровня. Раскрываются возможности процесса обучения иностранному языку для развития умения работать с информацией.

**Ключевые слова:** умение работать с информацией, системное образование, частные умения, обучение иностранным языкам, этапы работы с информацией.

**O.G. Kaverina<sup>1</sup>, T.A. Sirota<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Donetsk National Technical University,  
Donetsk, 83001;*

<sup>2</sup> *Donetsk National University,  
Donetsk, 83001  
e-mail: ansir2911@gmail.com*

### **DEVELOPMENT OF THE ABILITY TO WORK WITH INFORMATION IN A FOREIGN LANGUAGE AS A NECESSARY CONDITION FOR PROFESSIONAL GROWTH**

The article examines the ability to work with information as a system formation. The necessity of the development of this skill in order to improve the professional level is substantiated. The possibilities of the process of teaching a foreign language for the development of the ability to work with information are revealed.

**Key words:** ability to work with information, system formation, particular skills, foreign language learning, stages of work with information.

Происходящие изменения в мировоззрении, ценностях и нормах современного общества приводят к серьезным изменениям в процессе образования. Специалисты должны владеть не только суммой определенных знаний, но и обладать профессиональными компетенциями. В рамках информационного общества востребованным становится образование, которое позволяет человеку ориентироваться в постоянно меняющемся потоке информации, анализировать и интерпретировать полученные сведения. Поэтому умение работать с информацией является необходимым условием для специалистов любой отрасли.

Умение работать с информацией можно рассматривать по принципу вхождения как в общекультурные, так и в профессиональные компетенции. Развитие этого умения на высоком уровне возможно благодаря применению новых эффективных методов обучения. Формированию умений в образовательном процессе посвящены исследования многих ученых. Г.А. Атанов, Л.М. Перминова, В.Ф. Паламарчук, В.А. Кравец, Т.С. Фещенко, Е.Д. Павлова рассматривали формирование информационной грамотности и информационной культуры. Информационная компетентность является предметом исследований В.В. Бондарь, А.Н. Завьялова, Э.Ф. Морковиной, А.Л. Семенова, А.А. Темербековой, С.В. Тришиной. Однако несмотря на многочисленные исследования, уровень умения работать с информацией у студентов остается неудовлетворительным.

Согласно статистике, поток информации удваивается каждые три года. Поэтому на занятиях студенты должны получить фундаментальные знания, основу, на которую будут добавляться знания из индивидуального информационного поля. Умения вырабатываются в процессе деятельности. Поэтому применение активных методов обучения способствует формированию умений, проявляющихся впоследствии в профессиональной деятельности. Иноязычное обучение обладает широкими возможностями для развития умения работать с информацией, поскольку является одной из основ для развития общекультурных компетенций и позволяет продолжать профессиональное развитие в процессе работы с различными источниками на иностранном языке.

О.Н. Солуянова делает вывод о том, что содержание иноязычного обучения является основным интегрирующим моментом образовательного процесса, поскольку изучение иностранного языка происходит в рамках той или иной специальности [1]. Обучение успешно только в том случае, если учебные материалы представляют информационную ценность. В свою очередь информационное содержание увеличивает мотивацию к изучению другого языка. Иностраный язык, как правило, не является новым для студентов и в отличие от других профильных дисциплин строится на предыдущем опыте, способствуя эффективности обучения.

Иностранные языки отличаются метапредметностью. Перечень основных способностей, формирующихся в процессе изучения иностранного языка, были сформулированы Е.И. Пассовым [2]:

- способность к абстрагированию и обобщению;
- способность к логическому высказыванию;
- способность к формулировке понятий;
- способность к планированию своего высказывания;
- способность к стратегии и тактике коммуникации.

Кроме того, работа с материалами на иностранном языке позволяет повысить профессиональный уровень, изучить новые разработки, обменяться опытом с зарубежными коллегами.

Умение работать с информацией рассматривается с двух позиций. Одна группа ученых рассматривает данные умения в связи с использованием компьютерных технологий (А.А. Лукьянова, В.М. Монахов, Т.М. Сучкова). Другая группа исследователей относит данное умение к ключевым компетенциям, рассматривая его как работу с различными источниками информации, людьми и т. д. (И.А. Зимняя, И.В. Носко, Т.А. Перескокова). Сформированность умения работы с информацией позволяет решить следующие задачи:

- определить информационную проблему, идентифицировать информацию;
- подобрать все возможные источники, выбрать наиболее интересные из них;
- найти необходимую информацию из выбранных источников;
- переработать и представить материал должным образом;
- оценить качество своей работы;
- использовать имеющуюся информацию в соответствии с поставленной целью.

Л.В. Андрухив умение работать с информацией рассматривает как «теоретико-практическую деятельность, включающую в себя владение разнообразными способами практических действий по поиску (сбору), получению, обработке, анализу и представлению текстовой и цифровой информации с заданной целью», и представляет его в виде пяти последовательно осуществляемых действий.

1. Действие по осуществлению поиска информации включает следующие операции:
  - определение темы разыскиваемой информации;
  - установление необходимых информационных источников;
  - составление списка литературы, которая может оказаться полезной.
2. Действие по получению информации предполагает следующие операции:
  - слушание или конспектирование.
3. Действие по обработке информации охватывает следующие операции:
  - выделение в полученной информации главного;
  - структурирование материала и упорядочение данных.
4. Действие по анализу информации состоит из следующих операций:
  - составление информации из разных источников;
  - систематизация и обобщение сведений в соответствии с поставленной задачей;
  - выстраивание системы доказательств;

- составление вывода из частных заключений или из представленных данных;
- аргументация вывода.

5. Действия по предоставлению информации включает следующие операции:

- трансляция воспринятой информации в устной или письменной форме;
- обсуждение информационного материала (дискуссия, семинар, конференция) и высказывание собственного мнения в формальной и неформальной обстановке [3].

О.А. Митрахович представляет умение как системное образование, состоящее из частных умений, «направленных на решение задач, т. е. объединенные целью выполнения действия, взаимосвязанные друг с другом, взаимодействующие с внешней средой» [4]. Так, умение работать с учебником состоит из следующих умений:

- определять в тексте основную мысль;
- устанавливать связь между понятиями;
- разбивать текст на смысловые части;
- делать собственные выводы на основе прочитанного текста;
- составлять план;
- делать заметки по ходу чтения.

Умение как система имеет интегративные свойства, которыми не обладает каждое частное умение, входящее в его состав. Только в системе взаимодействия компонентов можно решить поставленную задачу. Более того, частные умения могут входить в различные системы, образуя новое системное образование. Слабая сформированность частных умений может привести к ослаблению, нарушению системы умений. Следовательно, формирование сложного умения должно быть основано на знаниях об уровне сформированности частных умений, выработки стратегий их становления и интеграции в новое системное образование.

Нами было установлено соотношение между частными умениями, входящими в общее умение работать с информацией и заданиями на основе английского языка, необходимыми для их развития (таблица).

Задания для развития работы с информацией на иностранном языке

Частные умения, входящие в общее умение	Задания на развитие частных умений
<b>Поиск информации</b>	
Умение определить тему	Работа с каталогами, списками литературы, базами данных, отбор необходимых аудио- и видеоматериалов (чтение, аудирование)
Умение определить область поиска	
Умение выделить наиболее интересные источники информации	
Умение проверить достоверность полученной из различных источников информации	
<b>Переработка информации</b>	
Умение проанализировать имеющуюся информацию	Работа с отобранным материалом из иностранных источников на определение основной идеи, выделение главного, сопоставление фактов, установление причинно-следственных связей, сокращение информации, поиск общих и различных свойств предметов или явлений. Форматирование и конструирование текстов в соответствии с поставленной целью. Составление тезисов для выступлений, отбор необходимой информации для презентаций (чтение, аудирование, говорение, письмо)
Умение выделить главное из источников	
Умение установить взаимосвязь между имеющимися фактами	
Умение обобщить информацию	
Умение оформить новый информационный продукт на основе собственных выводов в соответствии с необходимым форматом	
Умение представить работу аудитории	
<b>Хранение и передача информации</b>	
Умение систематизировать и сохранить информацию	Составление списков, каталогов, структуризация имеющейся информации в соответствии с адресатами (говорение, письмо)
Умение передать или обменяться информацией	

Основными формами развития умений работать с информацией на иностранном языке являются аудиторная и внеаудиторная учебно-познавательная деятельность. Особая роль принадлежит самостоятельной работе, которая «формирует готовность к самообразованию, создает базу непрерывного образования» в условиях быстрого обновления знаний [5]. Однако развитию умения работать с информацией для личностных целей должно предшествовать обучение работе с информацией под руководством преподавателя.

Одной из основных проблем в обучении является подбор и разработка материалов. Это следствие того, что преподаватели, как правило, ограничены во времени и не являются специалистами по профессиональным дисциплинам. Том Хатчинсон и Алан Уотерс [6] выделяют некоторые определяющие принципы, которые следует учитывать при разработке педагогических материалов:

1. Материалы должны стимулировать обучение. Другими словами, они не учат, а мотивируют учащихся к обучению, поэтому должны содержать интересные тексты; предусматривать увлекательные занятия, которые стимулируют мыслительные способности учащихся; давать возможность для учащихся использовать имеющиеся у них знания и навыки.

2. Подходящие материалы должны быть систематизированными и доступными для понимания, но достаточно гибкими, чтобы позволить работать творчески.

3. Материалы должны отражать природу языка и взгляд преподавателя на учебный процесс.

4. Материалы должны раскрывать содержание обучения, создавая баланс между сложностью задач и реальными перспективами их реализации.

5. Материалы должны стимулировать преподавателя для использования обновленных методов обучения.

6. Материалы должны обеспечивать надлежащее и правильное представление об использовании языка.

В целом роль преподавателя заключается в создании или представлении материалов, необходимых для совершенствования академических или профессиональных знаний.

Таким образом, для подготовки специалистов, способных продолжать свое профессиональное развитие в постоянно меняющихся условиях, необходимо умение работать с информацией, в том числе и на иностранном языке. Иноязычное обучение обладает интеграционным потенциалом для развития и совершенствования этого умения посредством профессионально-ориентированных текстов, аудио- и видеоматериалов. Обучение всем видам речевой деятельности позволяет научить ориентироваться в потоке информации. Для этого преподавателю необходимо правильно организовать учебный процесс, подобрать разнообразные материалы, представляющие интерес для студентов, использовать различные методы и приемы, позволяющие получать, анализировать, представлять информацию в соответствии со стратегической личностной целью.

### Литература

1. *Солуянова И.В.* Развитие общепрофессионального умения работать с информацией в иноязычном обучении студентов нелингвистических вузов: Автореф. дис. ... канд. пед. наук. – Пермь, 2014. – 26 с.

2. *Пассов Е.И.* Коммуникативный метод обучения иноязычному говорению: Пособие для учителей иностранного языка. – М.: Просвещение, 1985. – 208 с.

3. *Андрухив Л.В.* Формирование у будущих экономистов умения работать с информацией: Автореф. дис. ... канд. пед. наук. – Ставрополь, 2008. – 24 с.

4. *Митрахович О.А.* Формирование у старшеклассников умения работы с информацией: Дис. ... канд. пед. наук. – М., 2012. – С. 55–56.

5. *Загвязинский В.И.* Теория обучения: современная интерпретация: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2001. – 192 с.

6. *Hutchinson T., Waters A.* English for Specific Purposes: A learning centred approach. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997. – 183 p.

УДК 378.17

**И.А. Ковалев**

*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: kovalevigor56@mail.ru*

### **К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗДОРОВЬЯ КУРСАНТОВ**

Оценка уровня здоровья обучаемых является важной задачей в процессе профессиональной подготовки курсантов и студентов морских специальностей. Это связано с необходимостью формирования у представителей морских профессий высоких физических показателей силы, выносливости, ловкости и общей стрессоустойчивости организма. Согласно требованиям образовательных стандартов, дисциплина «Физическая культура и спорт», а также занятия по общей физической подготовке, должны обеспечить у обучаемых формирование способности поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности. Для реализации этих требований и эффективного построения учебного процесса необходимо иметь сведения о состоянии здоровья обучаемых. Это позволит регламентировать не только персональную физическую нагрузку, но и сформировать комплексный подход в реализации программы подготовки для обучаемых с разным уровнем здоровья и физических возможностей. В статье представлены материалы по оценке и определению уровня состояния здоровья контрольной группы курсантов мореходного факультета. Исследование проводилось на основе экспресс-метода профессора Г.Л. Апанасенко.

**Ключевые слова:** профессиональная подготовка, морская подготовка, физические нагрузка, оценка уровня здоровья, экспресс-метод профессора Г.Л. Апанасенко.

**I.A. Kovalev**

*Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: kovalevigor56@mail.ru*

### **TO THE ISSUE OF ASSESSING THE LEVEL OF CADETS' HEALTH**

Assessment of the trainees' health level is an important task in the process of professional training of cadets and students of maritime specialties. This is due to the need for the formation of high physical indicators of strength, endurance, dexterity and general stress resistance of the body in representatives of marine professions. According to the requirements of educational standards, the discipline "Physical culture and sports" as well as general physical training should provide students with the formation of the ability to maintain the proper level of physical fitness to ensure full-fledged social and professional activity. For the implementation of these requirements and the effective construction of the educational process, it is necessary to have information about the state of health of the trainees. This will allow to regulate not only personal physical activity, but also to form an integrated approach to the implementation of the training program for trainees with different levels of health and physical capabilities. The article presents materials on assessing and determining the level of health of the control group of cadets of the Faculty of Navigation. The research was carried out on the basis of the express method of Professor G.L. Apanasenko.

**Key words:** professional training, maritime training, physical activity, health assessment, express method of professor G.L. Apanasenko.

Состояние здоровья для любого человека является основным критерием эффективности реализации его социальных и биологических функций, а также оно обеспечивает необходимые условия для профессиональной и духовной реализации личности. Общая оценка состояния здоровья современной молодежи вызывает серьезную тревогу и требует широкого исследования с применением современных методов.

Вместе с тем работа в море требует высоких физических показателей силы, выносливости, ловкости и общей стрессоустойчивости организма. Поэтому у курсантов и студентов морских специальности крайне необходимо формировать компетенции поддержания на должном уровне физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности. Кроме того, подготовка морских инженерных кадров и методика реализации морских образовательных программ строится, исходя из соответствующего уровня здоровья обучаемых [1–3].

Для достижения поставленной нами цели были решены следующие задачи:

1. В период подготовки к занятиям по физической культуре и спорту было проведено комплексное исследование и определение уровня здоровья выборочной группы курсантов мореходного факультета согласно авторской методике.

2. На основе полученных в результате исследования материалов провели статистическую обработку и анализ полученных данных.

Основной целью проводимого исследования в рамках совершенствования образовательного процесса и методики преподавания дисциплин «Физическая культура и спорт» и «Общая физическая подготовка» является отработка алгоритма определения уровня здоровья курсантов по критериям экспресс-метода по методике профессора Г.Л. Апанасенко [4].

Экспресс-система оценки уровня здоровья состоит из ряда простейших показателей, которые ранжированы, и каждому рангу присвоен соответствующий балл. Общая оценка здоровья в соответствии с рекомендациями представленной методики определяется итоговой суммой баллов. Каждому значению итоговой суммы баллов соответствует определенный статистический уровень условного состояния здоровья, что позволяет распределить всех практически здоровых лиц на пять уровней здоровья, соответствующих определенному уровню аэробного энергетического потенциала.

Исследовательский материал и методы, использованные при проведении данных мероприятий, соответствуют общим рекомендациям по организации учебного процесса в высших учебных заведениях. За основу проведения исследования был взят экспресс-метод определения уровня соматического здоровья, предложенный профессором Г.Л. Апанасенко. Данный метод имеет высокий уровень апробации и позволяет с высокой точностью характеризовать уровень здоровья как отдельных обучаемых, так и физическое состояние в составе профессиональной группы. При проведении исследования для каждого курсанта в исследуемой группе был приготовлен индивидуальный лист, в который по мере проведения требуемых измерений вносились полученные данные.

Для оценки уровня здоровья измеряются в состоянии покоя:

- жизненная емкость легких (ЖЕЛ);
- частота сердечных сокращений (ЧСС);
- артериальное давление (АД);
- масса тела;
- длина тела;
- динамометрия кисти.

Затем выполняется функциональная проба (проба Мартинета). Учитывается время восстановления ЧСС в течение 3 минут.

На основании полученных данных рассчитываются показатели следующих индексов:

1. Индекс массы тела:

$$\text{Масса тела, кг} / (\text{рост, м}^2), \text{ кг/м}^2$$

2. Жизненный индекс:

$$\text{ЖЕЛ, мл} / (\text{масса тела, кг}), \text{ мл/кг}$$

3. Силовой индекс:

$$\text{Сила кисти, кг} / \text{масса тела, кг}, \%$$

4. Индекс Робинсона:

$$(\text{ЧСС пок, уд/мин}) * (\text{АД сист}) / 100, \text{ усл. ед.}$$

5. Функциональная проба (проба Мартинета).

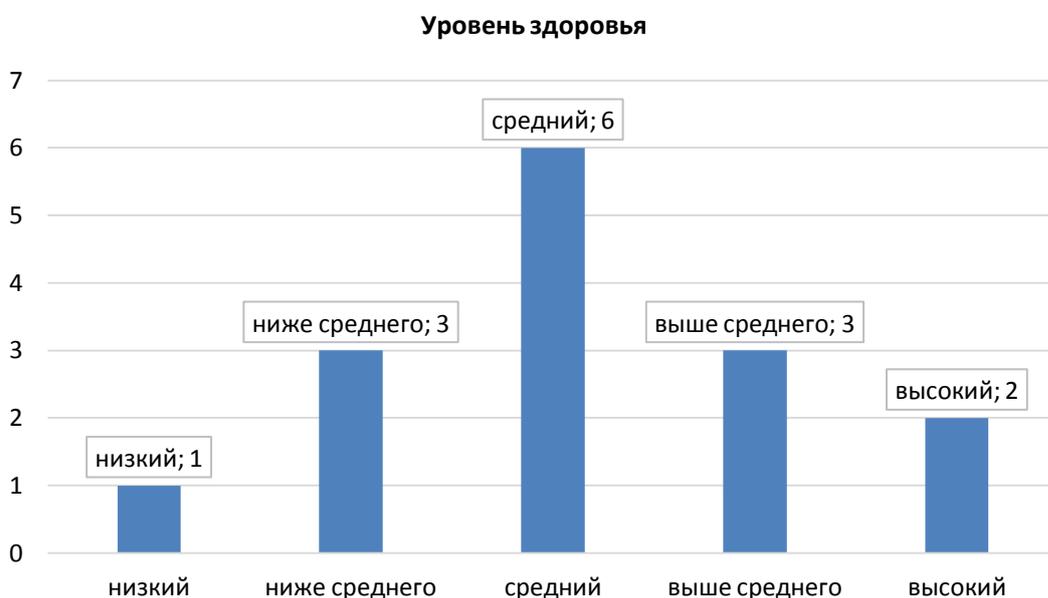
Контрольные замеры и оценка показателей согласно предлагаемой методике производились в следующей последовательности:

- измерение пульса (ЧСС) в состоянии покоя проводилось после пятиминутного отдыха с интервалом в десять секунд с последующим пересчетом в уд/мин путем умножения полученного результата на шесть;
- организм подвергается кратковременной нагрузке путем выполнения 20 приседаний за 30 секунд, что соответствует установленному уровню нагрузки за короткий период при среднем темпе одно приседание за 1,5 с;
- непосредственно после выполненной нагрузки измеряется ЧСС за шесть секунд в положении стоя с последующим пересчетом в уд/мин путем умножения полученного результата на десять;
- далее испытуемый по 10-секундным отрезкам времени в течение трех минут продолжает измерять частоту пульса;
- все результаты замеров в соответствующей последовательности вносятся в индивидуальный контрольный лист.

Для определения периода восстановления организма после кратковременной нагрузки фиксируется (в минутах и секундах) момент, когда пульс стал равен исходному уровню. Умножая подсчитанное количество ударов на цифру шесть, обследуемый получает количество сердечных сокращений за одну минуту. Для повышения точности эксперимента замеры основных физических показателей производились несколько раз, и в случае значительного расхождения показаний за основу принималось их осредненное значение.

Таким же образом определялись и другие показатели физического уровня здоровья обучаемых с индивидуальной фиксацией данных. В качестве средств измерений в ходе исследования применялись сертифицированные приборы и устройства.

Суммируя баллы по всем пяти показателям и сопоставляя их со шкалой, испытуемый определяет уровень своего физического здоровья. Суммарная оценка уровня здоровья представлена на рисунке.



### Оценка результатов исследований

После получения результатов исследования проведены их изучение и анализ с применением метода математической статистики. Общая оценка уровня здоровья определялась как сумма баллов по показателям.

Методика количественной экспресс-оценки уровня физического здоровья основана на показателях антропометрии (длина тела, масса тела, динамометрия), а также на данных о состоянии сердечно-сосудистой системы. После получения каждого показателя определяется общий балл,

который оценивается по уровню физического здоровья: 3 балла и менее – низкий, 4–6 – ниже среднего, 7–11 – средний, 12–15 – выше среднего, 16–18 – высокий уровень здоровья.

Всего в исследовании приняли участие 15 курсантов. Все студенты были отнесены к категории подростков, их средний возраст составлял  $(18,3 \pm 0,5)$  года. Численные результаты исследования приведены в таблице.

Таблица сводных результатов оценки уровня здоровья контрольной группы

Показатель	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий
Показатель 1 (индекс массы тела)	$\leq 18,9$	19,0–20,0	20,1–25,0	25,1–28,0	$> 28,0$
Баллы	–2	–1	0	–1	–2
Показатель 2 (жизненный индекс)	$\leq 50$	51–55	56–60	61–65	$> 65$
Баллы	–1	0	1	2	3
Показатель 3 (силовой индекс)	$\leq 60$	61–65	66–70	71–80	$> 80$
Баллы	–1	0	1	2	3
Показатель 4 (индекс Робинсона)	$\geq 111$	110–95	94–85	84–70	$< 70$
Баллы	–2	–1	0	3	5
Показатель 5 (время восстановления)	$\geq 180$	179–120	119–90	89–60	$< 60$
Баллы	–2	1	3	5	7
Общая оценка уровня здоровья	$\leq 3$	4–6	7–11	12–15	16–18

Анализируя приведенные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Большинство курсантов (73,3%) показали уровень здоровья не ниже среднего, что может свидетельствовать о хорошей физической подготовке.

2. Проведенные исследования позволяют выявить у курсантов возможный спектр анатомических, антропометрических, морфологических и иных изменений, зачастую комбинированных, которые необходимо учитывать в процессе профессиональной подготовки [5].

3. Перспектива дальнейших исследований будет заключаться в определении уровня здоровья у группы курсантов после прохождения ими плавательной практики для получения сравнительных характеристик имеющегося на момент обследования уровня здоровья.

### Литература

1. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты / Международная морская организация. – Лондон: ИМО, 2013. – 413 с.
2. Белов О.А., Белова Е.П. Инженерное образование как фактор развития техники и технологий // Наука, образование, инновации: пути развития: Материалы Десятой национал. (всерос.) науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – С. 106–108.
3. Белов О.А., Толстова Л.А. Моделирование процесса обучения курсантов для формирования навыков технической эксплуатации // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2016. – № 3 (16). – С. 78–81.
4. Апанасенко Г.Л., Попова Л.А. Медицинская валеология. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 243 с.
5. Белов О.А. Оценка технической готовности системы с учетом влияния человеческого фактора // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – № 30. – С. 11–16.

УДК 376.2

**Е.В. Шаповалова<sup>1</sup>, А.С. Нистор<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Информационно-библиотечный центр «Доступный город»,  
Петропавловск-Камчатский, 683024;*

<sup>2</sup> *Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, 683003  
e-mail: yuvaku@gmail.com*

### **РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАБОТЫ С ЛЮДЬМИ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ**

В статье поднимается вопрос о необходимости создания учебно-методического комплекса, созданного с помощью 3D-моделирования в САД-программах и последующей распечаткой на 3D-принтере. Данный комплекс будет применяться в работе с лицами с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ). Применение данного учебно-методического комплекса в образовательных и культурно-просветительских целях для людей с ОВЗ повысит познавательную активность и будет способствовать успешной интеграции этих людей в общество.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, краеведение, лица с ОВЗ, медиапродукт, инклюзия, фотограмметрия.

**E.V. Shapovalova<sup>1</sup>, A.S. Nistor<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Information and library center “Dostupniy gorod”,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683024;*

<sup>2</sup> *Kamchatka State Technical University,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003  
e-mail: yuvaku@gmail.com*

### **DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL AND METHODOLOGICAL COMPLEX WITH THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR WORKING WITH PEOPLE WITH DISABILITIES**

The article raised the issue of the necessity of development of an educational and methodological complex created using 3D modeling in CAD programs and subsequent printing on a 3D printer. The educational and methodological complex will be used by people with disabilities. The use of this educational complex for educational and cultural purposes will increase their cognitive activity and will contribute to the successful integration of disabled people into society.

**Key words:** additive technology, 3D-printing, regional history, disabled people, inclusive media product, inclusion, photogrammetry.

Согласно статистическим данным на 1 января 2020 г., в Камчатском крае число инвалидов составляет 13 985 человек, 1 293 человека из них – дети-инвалиды. По сравнению с 2019 г. наблюдается уменьшение численности инвалидов старше 18 лет, однако растет инвалидизация среди несовершеннолетних.

МБУК «Централизованная библиотечная система» г. Петропавловска-Камчатского столкнулась с проблемой обеспечения равных информационных прав людям с ОВЗ, что не всегда предоставляется возможным в полной мере. Особенно остро стоит вопрос, который относится к раскрытию краеведческого книжного фонда для данной категории людей. В доступе имеется краеведческая информация по культуре и истории Камчатского края только на традиционных носителях, что является преградой в удовлетворении информационных потребностей маломобильных, слабовидящих, незрячих людей, в том числе и детей с данными ограничениями.

Проблемы доступной среды сейчас довольно часто поднимаются в Камчатском крае, постепенно появляются пути решения и их реализации. Однако если говорить об инфраструктуре г. Петропавловска-Камчатского, то становится очевидно, что беспрепятственный доступ к историческим и культурным объектам города весьма затруднителен. Уровень доступности городских исторических и культурных объектов не соответствует ожиданиям инвалидов.

Неразвитая инфраструктура города и отсутствие краеведческой информации в комплексе могут стать причинами низкой социальной адаптации людей с ОВЗ в обществе. Вследствие этого у данной категории людей могут возникнуть сложности в социализации и интеграции в городское пространство. В свою очередь, это влечет за собой низкую интеграцию людей с ОВЗ в социальную жизнь. Как известно, проблема социальной интеграции инвалидов в Камчатском крае и в России в целом стоит остро.

Адаптация инфраструктуры города под инвалидов – процесс весьма длительный и финансово затратный. Но информационное поле города, адаптированное для людей с ОВЗ, рассказывающее об истории, культуре, облике города и края возможно наполнить с помощью применения аддитивных технологий, тем самым компенсировать отсутствие личного присутствия людей или зрительного контакта с культурными и историческими объектами ввиду определенных ограничений здоровья и удовлетворить их потребность в получении краеведческой информации.

Трехмерные модели реальных объектов являются эффективным средством передачи информации, а их использование в образовательных и культурно-просветительских процессах может существенно повысить результативность усвоения необходимого материала, оказать положительное влияние на познавательную мотивацию. Применение инновационных методов и средств в инклюзивном образовании, раскрывающих краеведческий компонент, расширит возможности специалистов, работающих с людьми с ОВЗ, что в свою очередь будет способствовать успешной адаптации инвалидов в социальной и городской среде. Тем самым будет решаться проблема предоставления равного доступа к информации и создания условий для приобщения людей с ОВЗ к национальной культуре, что, безусловно, будет содействовать их социализации [1–3].

При изучении опыта российских специалистов, работающих в образовательных и просветительских организациях с людьми с ОВЗ, становится очевидным, что инновационные методы используются не очень активно, особенно это относится к аддитивным технологиям. Однако специалисты признают, что наглядность, адаптированная под людей с определенными ограничениями, существенно может повысить и интерес к изучаемому материалу, и его усвоение [2].

На данный момент в России в основе традиционного обучения слабовидящих и незрячих людей применяются рельефно-графические пособия, книги с рельефно-точечным шрифтом Брайля, рельефные координатные плоскости, географические и исторические карты, а также «озвученные» учебники, фонические материалы, аудиоучебники, записанные на цифровые носители [3]. При этом трехмерные 3D-модели, созданные с помощью аддитивных технологий, широко не применяются.

Научная новизна поставленного нами вопроса о создании учебно-методического комплекса с применением аддитивных технологий заключается в том, что на территории Камчатского края в образовательных и культурно-просветительских учреждениях, работающих с людьми с ОВЗ, на данный момент не применяются технологии 3D-печати. Отсутствуют адаптированные под людей с ОВЗ информационные продукты краеведческой тематики, в том числе касающиеся исторических и культурных памятников г. Петропавловска-Камчатского, знакомясь с которыми люди с ограничениями могут получить более полное представление об облике города и его культурном и историческом наследии, развить познавательную активность и включенность в жизнь общества и города. Особенно важно повышать эффективность обучения детей с ОВЗ, слепых и слабовидящих детей (в том числе с комплексными нарушениями развития: задержкой психического развития, нарушением интеллекта, опорно-двигательного аппарата, расстройствами аутистического спектра, нарушением слуха и с задержкой развития, оказавшихся в условиях ограниченной доступности образования и культуры, в том числе после периода пандемии, применяя традиционные и инновационные технологии [3].

Изучая зарубежный опыт работы специалистов с людьми ОВЗ, становится очевидным, что специалисты, работающие с данной категорией людей, активно применяют аддитивные технологии. Республика Корея и Соединенные Штаты Америки занимают лидирующую позицию по использованию технологии 3D-печати для создания обучающих развивающих информационных продуктов для людей с ОВЗ.

Проводя анализ конкурентоспособности разрабатываемого нашей командой продукта, можно выделить несколько проектов, схожих по техническим и целевым характеристикам. Рассмотрим некоторые из них.

Доцент из Колорадского университета Том Йе реализовывает проект «Build a book» совместно с сообществом преподавателей и студентов университета, публичной библиотекой г. Боулдер, США. Суть проекта заключается в создании книг с трехмерными объемными картинками и шрифтом Брайля для слепых и слабовидящих детей с применением аддитивных технологий, вовлекая тем самым в процесс создания сообщество вокруг. Участники проекта не только развивают и применяют свои умения и навыки в моделировании трехмерных изображений, но также участвуют в огромном творческом процессе, который ведет к толерантности по отношению к людям с ОВЗ и разрушает стереотипы, существующие в обществе о таких людях [4].

Однако иностранные аналоги нецелесообразно адаптировать под российского потребителя не только из-за языкового барьера, но и в экономических целях. Экономичнее создавать свой информационный продукт, соответствующий потребностям людей с ОВЗ, проживающих в России, и производить его на территории РФ.

Другой проект по созданию «тактильного музея», реализовывающийся в России, был инициирован группой студентов Южного федерального университета в г. Ростове-на-Дону. Суть проекта заключалась в изготовлении разноплановых 3D-фигур, не объединенных определенной тематикой для тактильного восприятия незрячими и слабовидящими людьми. Модели не имеют звукового сопровождения, дающего информацию о данных объектах, что снижает их информативность и не позволяет инвалидам самостоятельно использовать данный носитель информации.

На данный момент на российском рынке отсутствуют аналоги краеведческого информационного продукта, в том числе в Камчатском крае.

Ввиду всего вышесказанного возникает необходимость создания учебно-методического комплекса с применением аддитивных технологий, в частности применения 3D-моделей исторических и культурных объектов Камчатского края в образовательных и культурно-просветительских целях для людей с ОВЗ. Данный комплекс будет включать в себя:

- 3D-модели памятников Камчатского края, оснащенные озвученными аудиофайлами;
- аудио-приложения на электронных носителях с дополнительной информацией об объекте;
- методический материал для специалистов, инструкцию по применению данного учебно-методического комплекса.

Другими словами, мы предлагаем создание уникального инклюзивного медиапродукта, несущего краеведческую информацию для людей с ОВЗ и адаптированного для восприятия людьми с определенными ограничениями [5].

Реализация данного проекта ведется совместно со Школой молодых ученых, функционирующей при кафедре «Энергетические установки и электрооборудование судов» ФГБОУ ВО «КамчатГТУ». Молодые инженеры работают над разработкой цифровых 3D-моделей в CAD-программах. Созданы первые цифровые модели камчатских памятников, объемные объекты напечатаны на 3D-принтере, имеющемся в Школе молодых ученых. Ниже представлена технология создания 3D-объектов.



Рис. 1. Памятники Витусу Берингу и Курильскому десанту, созданные в программе Fusion 360

Памятник Витусу Берингу (слева) и верхняя часть памятника Курильскому десанту (справа), изображенные на рис. 1, изготовлены в САD-программе Fusion 360, поскольку они состоят из простых геометрических фигур. Нижняя часть памятника Курильскому десанту изготовлена с помощью технологии фотограмметрии (рис. 2). На местности была отснята серия фотографий объекта, которая необходима для дальнейшей фотограмметрической обработки.

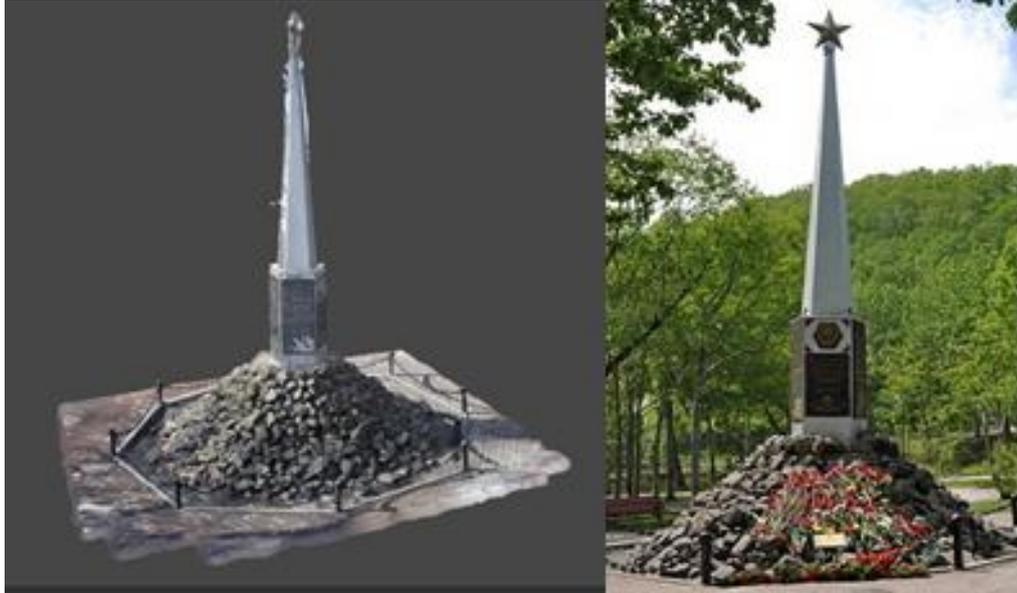


Рис. 2. Плотное облако точек (слева); памятник Курильскому десанту (справа)

Для изготовления цифровых 3D-моделей памятников, имеющих сложные скульптурные формы, была применена программа Agisoft Metashape. Результат применения этой программы показан на рис. 2. С помощью данной программы была построена каменная насыпь у основания скульптуры. Сетка, полученная в программе Agisoft Metashape, была использована в последующем моделировании сверки соотношения сторон памятника в САD-программе.

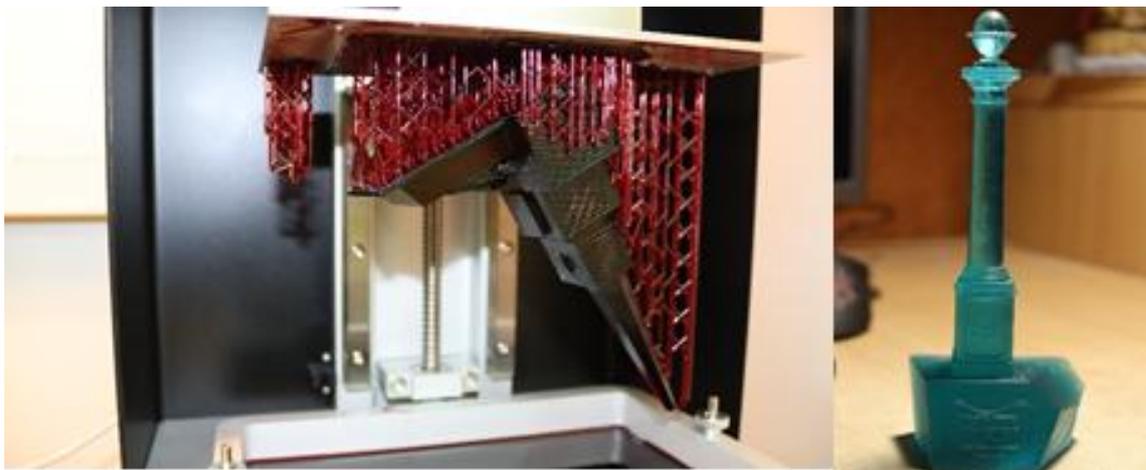


Рис. 3. Памятники, напечатанные по технологии стереолитографии

В дальнейшем 3D-модели были распечатаны на принтере Phrozen Shuffle XL, как показано на рис. 3. Данный принтер печатает по технологии стереолитографии светоотверждаемым полимером. Это позволит добиться наилучшей детализации мелких деталей и надписей, что повысит информативность напечатанного 3D-объекта. Объемная модель в комплексе с аудиоприложением даст расширенную информацию, удовлетворяющую информационную потребность, а также будет способствовать познавательной активности людей с ОВЗ и интересу к родному краю.



Рис. 4. Модель памятника Витусу Берингу

Напечатанные на 3D-принтере модели впоследствии окрашиваются акриловыми красками, как показано на рис. 4. После окрашивания модели готовы к использованию.

С помощью описанных выше технологий будут создаваться цифровые 3D-модели остальных памятников города. Также будет использоваться квадрокоптер для фотографирования памятников, которые нельзя сфотографировать со всех сторон фотоаппаратом. Далее по технологии фотограмметрии будут созданы цифровые модели и распечатаны на 3D-принтере для их дальнейшего использования людьми с ОВЗ, а также специалистами, работающими с людьми с ОВЗ.

Учебно-методический комплекс является универсальным продуктом. Его можно применять в рамках инклюзивного образования в работе с лицами с ОВЗ не только в Камчатском крае, но также специалистами других городов РФ, сотрудниками библиотек, общеобразовательных и культурных организаций, заинтересованных в ознакомлении детей и взрослых с краеведческой медиаинформацией и планирующих

использовать данный УМК в своей работе. Комплекс также будет полезен и в обычных общеобразовательных школах, детских садах и других образовательных учреждениях, которые ведут краеведческую работу. Для выполнения определенных конкретных задач педагогов данных организаций комплекс может быть дополнен дополнительными моделями, изготовленными под индивидуальные запросы (отдельно изготовленные модели зданий, объектов инфраструктуры, бытовых предметов), модели могут быть изготовлены из различных материалов, в том числе с различными тактильными свойствами, а также из бактерицидного пластика.

## Литература

1. Инклюзивное профессиональное образование: состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Российского государственного социального университета. – М., 2019. – URL: [https://abilympicspro.ru/netcat\\_files/userfiles/Inklyuzivnoe\\_prof\\_obrazovanie.pdf](https://abilympicspro.ru/netcat_files/userfiles/Inklyuzivnoe_prof_obrazovanie.pdf) (дата обращения: 13.11.2021).
2. Осмоловская И.М. Наглядные методы обучения: Учеб. пособ. для студентов высших педагогических учебных заведений. – М.: Академия, 2009. – 183, [2] с.
3. Петрова Г.Г., Беседина И.А., Носонова Е.Ю. Опыт обучения и социализации слепых и слабовидящих детей (в том числе с комплексными нарушениями развития) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-obucheniya-i-sotsializatsii-slepyh-i-slabovidschih-detey-v-tom-chisle-s-kompleksnymi-narusheniyami-razvitiya/viewer> (дата обращения: 13.11.2021).
4. Build a Better Book / University of Colorado. – URL: <https://www.colorado.edu/project/bbb/> (дата обращения: 13.11.2021).
5. Сафина З.Ш., Анайчева Н.Ф. Медиапродукт как технология, направленная на организацию начального этапа инклюзивного образования // Инклюзия в образовании. – 2016. – № 2. – С. 48–53. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 13.11.2021). – Режим доступа для зарегистрир. пользователей: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

## **СПИСОК ОРГАНИЗАЦИЙ – УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ И ИХ АДРЕСА**

**ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**  
286123, Донецкая Народная Республика, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2  
Тел.: +38-062-343-7033  
E-mail: mailbox@donnasa.ru

**ГОУ ВПО «Донецкая академия гражданской защиты»**  
283050, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, д. 34а  
Тел.: +38(062) 332-17-01  
E-mail: agz@mail.dnmchs.ru

**ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»**  
283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24  
Тел.: +380 62 302-07-22  
E-mail: rector@donnu.ru

**ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»**  
83001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Артема, д. 58  
Тел.: +38 (062) 301-07-09  
E-mail: donntu.info@mail.ru

**МБУК «ЦГБ» Информационно-библиотечный центр «Доступный город»**  
г. Петропавловск-Камчатский, пр-кт Рыбаков, д. 13  
Тел.: +7 (415) 230-52-99  
E-mail: cultrf@mkrf.ru

**ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН»**  
683002, г. Петропавловск-Камчатский, Северо-Восточное шоссе, 30, а/я 56  
Тел., факс: 8 (415-2) 49-54-35  
E-mail: nigtc@nigtc.ru

**ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»**  
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4  
Тел.: (812) 575-05-34  
E-mail: rector@spbgasu.ru

Ответственный за выпуск  
*О.А. Белов*

***ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА:  
ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РАЗВИТИЯ***

*Материалы  
Четвертой международной научно-технической конференции  
(25–26 ноября 2021 г.)*

В авторской редакции  
Верстка, оригинал-макет Е.Е. Бабух

Подписано в печать 28.01.2022 г.  
Формат 60\*84/8. Печать цифровая. Гарнитура Times New Roman  
Авт. л. 13,93. Уч.-изд. л. 14,62. Усл. печ. л. 17,44  
Тираж 100 экз. Заказ № 2

Издательство  
Камчатского государственного технического университета

Отпечатано полиграфическим участком издательства КамчатГТУ  
683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35

