

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ЭКОЛОГИЯ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С СУДОВ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

НАДЕЖНОСТЬ СУДОВЫХ МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ



№ 72/73
декабрь
2023

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 72/73, 2023

Научно-технический и информационно-аналитический журнал, издается с 1916 года.

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.А. Кутейников

E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

С.А. Шишкин – председатель, заместитель генерального директора, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

М.С. Бойко – к.т.н., заместитель председателя, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

А.С. Большев – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого

А.В. Григорьев – к.т.н., доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

А.А. Иванченко – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

А.В. Ильин – д.т.н., доцент, заместитель генерального директора по научной работе, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

М.А. Кутейников – д.т.н., помощник по научно-технической деятельности, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

А.В. Марченко – д.т.н., проф., Сvalbardский международный университет (UNIS)

В.Н. Половинкин – д.т.н., проф., научный руководитель, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

А.А. Родионов – д.т.н., проф., заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

К.В. Рождественский – д.т.н., проф., проректор в области международного сотрудничества и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

А.Е. Сазонов – д.т.н., проф., член-корр. РАН, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

О.Я. Тимофеев – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

В.Н. Тряскин – д.т.н., проф., заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Подписка на журнал может быть оформлена по каталогу «Прессинформ». Подписной индекс 87730.

Электронная версия журнала доступна по адресу:

www.rs-class.org.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru, Реферативный журнал и фонд научно-технической литературы ВИНИТИ РАН, международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал зарегистрирован Министерством связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64086 от 25 декабря 2015 г.

Решением Президиума ВАК журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук <http://perechen.vak2.ed.gov.ru/>

Ответственность за содержание информационных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы.

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 72/73, 2023

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor-in-Chief

Mikhail Kuteynikov

E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

ISSN 2223-7097

Editorial board

Sergei Shishkin – Deputy Director General, Chairman of Editorial Board, RS

Maxim Boyko – Candidate of Technical Science, Deputy Chairman of Editorial Board, RS

Alexander Bolshev – Doctor of Science, professor of St. Petersburg State Polytechnic University

Andrey Grigoriev – Candidate of Technical Science, Admiral

Alexander Ivanchenko – Doctor of Technical Science, professor, Head of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants Department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Alexey Ilin – Doctor of Technical Science, associate professor, Deputy General Director and Head of Research and Production Complex, NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Mikhail Kuteynikov – Doctor of Technical Science, Assistant, Scientific and Technical Activity, RS

Aleksey Marchenko – Doctor of Technical Science, professor, University Centre in Svalbard, Norway

Valery Polovinkin – Doctor of Technical Science, professor, Research Manager, Krylov State Research Centre

Aleksander Rodionov – Doctor of Technical Science, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

Kirill Rozhdestvenskiy – Doctor of Technical Science, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

Anatoliy Sazonov – Doctor of Technical Science, professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, corresponding member of Russian Academy of Science

Oleg Timofeev – Doctor of Technical Science, St. Petersburg State Marine Technical University

Vladimir Tryaskin – Doctor of Technical Science, professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Pressinform catalog.

On-line version of the journal is available on website:

www.rs-class.org.

The journal is included in Russian index of scientific citing www.elibrary.ru, VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Ulrich's Periodicals Directory international database.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media. Registration Certificate ПИ № ФС77-64086 of 25.12.2015.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading peer-reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of doctoral and post-doctoral theses (in application for the scientific degrees of Doctor and Candidate of Science) shall be published <http://perechen.vak2.ed.gov.ru/>

Authors are responsible for the contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 72/73

RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» публикует результаты научных исследований по широкому спектру вопросов безопасности мореплавания судов и морских объектов, охраны человеческой жизни на море, сохранности грузов, экологической безопасности, обзорные материалы и информацию о существенных изменениях действующих правил и руководств Регистра. Журнал предназначен для широкого круга специалистов, связанных с вопросами безопасности человеческой жизни на море, охраны окружающей среды, проектирования и строительства судов и средств освоения шельфа. Также журнал будет интересен студентам и курсантам профильных технических образовательных учреждений.

Регистр выражает признательность авторам статей и приглашает ученых и специалистов к публикациям научных работ в журнале.

Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

2.5.18 – Проектирование и конструкция судов

2.5.20 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping is a periodical covering a wide range of questions in the areas of shipbuilding and shipping, offshore development facilities, up-to-date maritime technology, environmental protection and maritime safety. New research results and scientific developments in the area of shipbuilding, are introduced in our journal.

The journal is intended for specialists of shipbuilding and ship repair companies, design engineering bureaus, research institutes, professors and postgraduate students of marine universities.

Russian Maritime Register of Shipping expresses appreciation to the authors and invites scientists and specialists to submit articles for publication in the journal.

The journal is distributed at trade events, conferences and exhibitions.

The Research Bulletin publishes the articles on the specialties in accordance with the nomenclature of specialties of scientific workers:

2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics

2.5.18 – Design and construction of ships

2.5.20 – Ship energetics and its components (main and auxiliary)

2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург
2023



СОДЕРЖАНИЕ

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА РС ADDRESS OF RS DIRECTOR GENERAL	4
БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	
<i>Ложкин В.Н. Обеспечение экологической безопасности силовых установок пожарной техники в условиях глобальных вызовов</i>	6
<i>V.N. Lozhkin Ensuring the environmental safety of fire equipment power plants in global challenges</i>	
<i>Толмачев С.А. Вопросы и проблемы, связанные с осуществлением стратегии ИМО 2023 года по сокращению выбросов парниковых газов с судов</i>	13
<i>S.A. Tolmachev Questions and issues related to the implementation of the IMO strategy 2023 on the reduction of GHG emissions from ships</i>	
<i>Буянов А.С., Якимов В.В., Реуцкий А.С. Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов</i>	21
<i>A.S. Buyanov, V.V. Yakimov, A.S. Reutsky Energy efficiency coefficient as a tool for determining the carbon footprint from the operation of sea-going ships of ice classes</i>	
<i>Михеева А.А. Бондаренко А.И. Математические моделирование процессов сжигания водоугольного топлива в судовых котлах малой мощности.....</i>	32
<i>A.A. Mikheeva, A.I. Bondarenko Mathematical modeling of combustion processes of coal-water fuel in low-power marine boilers</i>	
ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES	
<i>Кулеш В.А., Кутейников М.А., Суров О.Э., Фам Чунг Хиен Проект локальной внешней конструктивной защиты днища судна от грунта.....</i>	39
<i>V.A. Kulesh, M.A. Kuteynikov, O.E. Surov, Pham Trung Hiep Design of local external structural protection from ground for vessel's bottom</i>	
МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА MATERIALS AND WELDING	
<i>Филин В.Ю., Ильин А.В., Ларионов А.В., Назарова Е.Д. Обоснование требований МАКО и Регистра к выбору материалов корпусных конструкций, эксплуатируемых при низких климатических температурах Часть I — сопротивление старта трещины</i>	48
<i>V.Yu. Filin, A.V. Ilyin, A.V. Larionov, E.D. Nazarova Substantiation of IACS and RS requirements for the selection of hull materials for structures operated at low climatic temperatures.</i>	
<i>Part 1 — crack start resistance</i>	

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Гирин С.Н., Матвеев Ю.И. Оценка качества центровки судовых валопроводов с учетом напряженного состояния материала	59
<i>S.N. Girin, Yu.I. Matveev Assessment of ship shafting alignment quality taking into account the stress state of the material</i>	
Буров М.Н., Пономарев В.А., Владимиров М.Ю. Метод определения затрат для обеспечения заданной вероятности безотказной работы газотурбинного агрегата	68
<i>M.N. Burov, V.A. Ponomarev, M.Yu. Vladimirov Method for determinimng the costs to ensure a given probability of failure-free operation of a gas turbine unit</i>	
Покусаев М.Н., Хоменко Т.В., Горбачев М.М. Применение систем мониторинга крутильных колебаний для повышения надежности судовых машинно-движительных комплексов	78
<i>M.N. Pokysaev, T.V. Khomenko, M.M. Gorbachev Use of torsional vibration monitoring systems to improve the reliability of marine propulsion systems</i>	
Ким Ю.В., Пономарева А.Ю., Шайтанов А.В. Исследование гидравлического сопротивления малогабаритных судовых обратных клапанов	87
<i>Yu.V. Kim, A.Yu. Ponomareva, A.V. Shaitanov Research of hydraulic resistance of small-size ship non-return valves</i>	
Шурпяк В.К., Голуб Е.С. Разработка требований по контролю вибрации трубопроводов судовых систем	93
<i>V.K. Shurpyak, E.S. Golub Development of requirements for vibration control of ship systems pipelines</i>	

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ
ELECTRICAL EQUIPMENT, AUTOMATION AND APPLICATION OF COMPUTER SYSTEMS

Миклух С.В., В.А. Миклух Технология цифровизации мониторинга и управления сложными производственными процессами судостроительного предприятия: постановка задачи и основные критерии	102
<i>S.V. Miklush, V.A. Miklush Technology of monitoring and management digitalization for complex production processes of a shipbuilding enterprise: problem statement and main criteria</i>	
Юшков А.В., Дядик А.Н. Блок-модуль электрохимического генератора с твердополимерным электролитом	108
<i>A.V. Yushkov, A.N. Dyadik Block-module of an electrochemical generator with a solid polymer electrolyte</i>	

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляем вам новый выпуск журнала "Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства". На страницах журнала публикуются результаты прикладных научных исследований в области охраны окружающей среды, безопасности человеческой жизни на море, внедрения новых материалов и технологий при проектировании, строительстве и эксплуатации морской техники.

В 2023 году Регистр изменил свою организационную структуру. Цель изменений — повысить эффективность внутренних процессов и усилить конкурентные позиции РС за счет консолидации профильных компетенций. Созданы специальные подразделения: Управление разработки и совершенствования нормативных документов и Управление научно-исследовательской деятельности и инжиниринга. Таким образом Регистр акцентирует внимание на преобразовании знаний в стройную архитектуру Правил и Руководств, научно-техническое взаимодействие с предприятиями отрасли в режиме совместных проектов, поиск оптимальных и обоснованных конструктивных решений, выявление перспективных технологий и сопутствующих рисков. Мы выражаем готовность сопровождать передовые судостроительные проекты и постепенно расширять область применения наших возможностей. Вновь сформированное Управление сертификации одобряет продукцию и производства общепромышленного назначения, освидетельствовать изготовителей, имеющих собственное производство, сертифицировать системы менеджмента на соответствие стандартам серий ISO 9000, ISO 14000, ISO 45000, ISO 27000, ISO 29001, ISO 50001, ISO 31000. Услуги РС включают освидетельствование морских образовательных организаций, сертификацию тренажеров и тренажерных комплексов, отдельных учебных курсов для подготовки членов экипажей морских судов, наблюдение за морскими подводными трубопроводами и плавучими добывающими комплексами, рассмотрение проектов и техническое наблюдение за проведением морских операций. В качестве независимой третьей стороны РС способен проводить оценку готовности судов, оборудования, необитаемых подводных аппаратов перед началом работ на шельфе. Новое Управление технического наблюдения за контейнерами, опасными грузами и тарой занимается оценкой безопасности перевозки различных видов грузов (включая опасные и навалочные грузы). В ведении подразделения — освидетельствование контейнеров и транспортного оборудования для перевозки опасных грузов, система верификации одобренной массы брутто контейнеров.

Реализуя стратегию развития, нацеленную на повышение компетенции по всему спектру высокотехнологичного морского флота, консолидации внутренних сил в области технической экспертизы и правильной расстановке приоритетов для предоставления предприятиям промышленности и транспорта максимально широкого спектра услуг, Регистр активно участвует в передовых проектах морской индустрии.

Российский морской регистр судоходства принимает участие в реализации мероприятий федерального проекта «Автономное судовождение». Для сопровождения проектов в области автономного судоходства РС разработал Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). Документ основан на результатах научно-исследовательской работы по МАНС и дополняет обязательные требования РС в соответствии с классом и назначением судна. Примером практической реализации участия РС в проекте МАНС стало подтверждение соответствия паромов «Маршал Рокоссовский» и «Генерал Черняховский» (проект CNF19M), а также центра дистанционного управления судами (ЦДУ) Положениям по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). Удостоверения соответствия выданы 25 и 29 сентября 2023 года.

Мы участвуем в проекте по освоению технологии подводной сварки. Работа организована ЦКБ МТ «Рубин» с привлечением Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и УНТЦ «Сварка». Планируется, что в результате будет разработан, протестирован и аттестован технологический процесс подводной сварки и сварочных материалов для проведения подводных сварочных работ. Регистр разработал и внедрил в Правила классификации и постройки морских судов новую главу, регламентирующую подводную сварку.

22 сентября 2023 года в Главном управлении РС состоялось первое заседание новой секции Научно-технического совета Регистра «Морская робототехника». В заседании приняли участие порядка 40 ведущих специалистов из более чем 20 предприятий и организаций отрасли. На встрече обсуждались предложения по развитию Правил классификации и постройки необитаемых подводных аппаратов (Правила НПА), которые Регистр выпустил в январе 2023 года. В частности, на рассмотрение был представлен ряд уточнений и дополнений к требованиям для корпусных конструкций НПА и спускодъемных устройств.

Нами учреждена рабочая группа по кибербезопасности на судах. Вводное совещание группы состоялось 31 июля 2023 года. Рабочая группа создана в преддверии вступления в силу унифицированных требований МАКО E26 и E27, согласно которым суда, контракт на постройку которых заключен с 1 января 2024 года, должны соответствовать требованиям кибербезопасности. Основная задача группы — разработка и внедрение требований по кибербезопасности для применения в процессе проектирования, постройки и эксплуатации судов с классом РС, а также при подготовке инженерно-инспекторского состава Регистра, выполняющего освидетельствования. Сегодня вопросы, связанные с принятием мер по исключению или снижению последствий киберинцидентов, решаются судоходными компаниями самостоятельно на основании внутренних процедур. Разработка и внедрение требований РС в отношении обеспечения кибербезопасности на судах позволит применять единый подход для всех судов в классе и повысит уровень безопасности как внутреннего, так и международного судоходства.

Регистр наращивает участие в проектах по мультимодальной перевозке СПГ. В рамках проекта, направленного на импортозамещение в сфере транспортировки СПГ, РС одобрил техническую документацию, провел техническое наблюдение за изготовлением и испытаниями для запуска серийного производства двух моделей контейнеров-цистерн для перевозки и хранения сжиженного природного газа производства компании «РМ Рейл»: НКЦ-СПГ 43,5 с внутренним сосудом из нержавеющей стали и АКЦ-СПГ 42,7 — из инновационного алюминиевого сплава.

Укрепляя связи с научно-технической общественностью, мы заключили ряд важных соглашений о сотрудничестве и проводим активную реализацию закрепленных в них положений.

Один из примеров — это соглашение о сотрудничестве с ведущим центром подготовки специалистов кораблестроительных специальностей — Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом (СПбГМТУ). В соответствии с соглашением Институт информационных технологий (ИИТ) СПбГМТУ совместно с РС будут работать над совершенствованием электронной библиотеки требований нормативных документов, регламентирующих процесс проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации морских судов. Соглашение направлено на объединение компетенций и усилий ведущего отечественного классификационного общества и одного из главных морских кораблестроительных вузов страны.

Регистр заключил соглашение о сотрудничестве в сфере подготовки кадров для морской отрасли с одним из ведущих отраслевых вузов страны — ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. Сотрудничество сторон в области подготовки специалистов морского транспорта позволит объединить научный потенциал вуза и практический опыт классификационного общества в области технического наблюдения за проектированием, строительством и эксплуатацией морского флота. Основные направления сотрудничества — развитие института стажировок для обмена знаниями между преподавателями ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова и инженерно-инспекторским составом РС, проведение научных исследований, практическая подготовка обучающихся университета, помочь в выборе актуальных тем для дипломных проектов и консультирование при работе над ними.

На Транспортной неделе 2023 подписано соглашение с Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Российский университет транспорта». Основными направлениями сотрудничества станут совместное проведение научно-исследовательских работ, в том числе, в рамках Совета РАН «Окружающая среда и транспорт», участие Регистра в реализации образовательных программ университета.

РС и разработчик инженерного программного обеспечения АСКОН объединяют свои усилия в целях цифровизации процессов технического наблюдения в сфере строительства и эксплуатации гражданской морской техники. Одной из главных целей сотрудничества является переход Регистра на электронное согласование с заказчиками, проектантами и верфями решений по управлению инженерными данными с использованием отечественного программного обеспечения. В перспективе вместо традиционных чертежей будут использоваться инструменты электронного согласования цифровых моделей для классификации судна на всех этапах (проектирование, строительство, освидетельствование в эксплуатации), предусмотрено создание единого архива 3D-моделей проектов. Сегодня Регистр уверенно идет по пути цифровой трансформации производственных процессов, совершенствования принципов и алгоритмов оказания услуг и взаимодействия с клиентами. Использование сквозного PLM-решения в процессах классификации и технического наблюдения обеспечит более эффективное управление данными и проектами, повысит точность контроля за процессами проектирования, строительства и эксплуатации судов.

Результаты научных исследований, проводимых Российским морским регистром судоходства, используются не только при совершенствовании требований нормативных документов. В качестве примера прикладной реализации стоит упомянуть запуск с 15 сентября 2023 года услуги по оформлению Паспорта ледовой безопасности судна. Услуга ориентирована на суда действующего флота. Паспорт может оформляться как на суда в классе РС, так на суда в других классах, независимо от наличия у судна ледового класса РС. В процессе разработки документа, в соответствии с собственной методикой, РС выполняет необходимые расчеты прочности бортовых конструкций судна, параметров энергетической установки и винторулевого комплекса. С учетом конструктивных особенностей судна просчитываются допустимые сценарии и оптимальные эксплуатационные режимы (скорость, дистанцию при проводке ледокола, и т.п.), которые обеспечивают снижение риска повреждений корпуса при взаимодействии со льдом.

Регистр ввел ряд дополнительных знаков в символ класса для контейнеровозов и судов, перевозящих контейнеры, а также для судов обеспечения, перевозящих наливом опасные и вредные жидкые вещества, разработал требования для присвоения нового знака **HNLS** судам обеспечения, перевозящим наливом опасные и вредные жидкые вещества. В числе нововведений также требования для присвоения новых знаков для морских судов, на борту которых размещено специальное оборудование для интенсификации скважин на нефтяных и газовых месторождениях **WSV1**, и судов, специально подготовленных для установки такого оборудования **WSV2**. Оборудование используется для извлечения остаточных запасов нефти, объем которых в среднем составляет 55 — 75 % от первоначальных геологических запасов в недрах, и позволяет повысить отдачу месторождений. Суда обеспечения с дополнительными знаками **WSV1** и **WSV2** в символе класса осуществляют также транспортировку веществ, применяемых для интенсификации скважин.

Результаты всех научно-исследовательских работ, которые используются для совершенствования нормативных документов Регистра, развития спектра предоставляемых нами услуг публикуются в виде статей в журнале "Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства".

Все выпуски журнала размещаются в свободном доступе на сайте Регистра, а предложения и замечания по содержанию статей заинтересованные читатели могут направлять непосредственно в адрес Редакционной коллегии журнала. Авторы, заинтересованные в публикации статей, могут воспользоваться электронным сервисом подачи статей, размещенном на сайте Регистра. Статьи, прошедшие все этапы рецензирования и отработки замечаний, принимаются к публикации на бесплатной основе.

Генеральный директор Куликов С.А.



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 591; 629.5.064; UDC 591; 629.5.064

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ

В.Н. Ложкин, д-р техн. наук, профессор, ФБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России имени героя Российской Федерации генерала Армии Е.Н. Зиничева», Санкт-Петербург, e-mail: vnlojkin@yandex.ru

В статье проанализированы техническое состояние двигателей пожарных автомобилей, эксплуатируемых на территории Российской Федерации, и требования, предъявляемые к техническим нормативам их экологической безопасности применительно к условиям производства (сертификации при выпуске в обращение) и эксплуатации в России. Приведены научно обоснованные концепция, технические и технологические решения по обеспечению нормативов на поллютанты и парниковые газы двигателей пожарных автомобилей. В качестве стратегического направления улучшения их экологического состояния в эксплуатации, предлагается концепция, основанная на технологии диагностики технического состояния двигателей по данным анализа состава выхлопных газов, их нейтрализации на выпуске и применения водно-топливных микроЭмульсий дизельного топлива, стабилизированных поверхностно-активными веществами. Показано, что внедрение предлагаемых решений повышает безопасность на два экологических класса.

Ключевые слова: пожарный автомобиль, отработавшие газы, экологический класс, технические и технологические решения

ENSURING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF FIRE EQUIPMENT POWER PLANTS IN GLOBAL CHALLENGES

V.N. Lozhkin, DSc, professor, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia named after the Hero of the Russian Federation General of the Army E.N. Zinichev, St. Petersburg, e-mail: vnlojkin@yandex.ru

The article analyzes technical condition of engines of fire trucks operated in the territory of the Russian Federation and the requirements for the technical standards of their environmental safety in relation to the conditions of production (certification upon release into circulation) and operation in Russia. Science-based concepts, technical and technological solutions to ensure standards for pollutants and greenhouse gases of fire engine engines have been presented. As a strategic direction for improving their ecological state in operation, a concept based on the technology for diagnosing the technical condition of engines according to the analysis of the composition of exhaust gases, their neutralization at the outlet and the use of water-fuel micro-emulsions of diesel fuel stabilized surfactants has been proposed. It has also been shown that the implementation of the proposed solutions increases safety by two environmental classes.

Keywords: fire truck, exhaust gases, environmental class, technical and technological solutions

Лесные пожары [1], вместе с силовыми установками автомобильного транспорта [2], к которым относятся и поршневые двигатели (ДВС) пожарных автомобилей (ПА) [3] в местах эксплуатации загрязняют атмосферу отработавшими газами (ОГ), в составе которых содержатся CO, NO_x, частицы сажи PM_{2,5}, SO_x [4], парниковые газы [5], и шумом [6].

Исполнение Государственной противопожарной службой МЧС России требований Федерального закона № 123-ФЗ сопровождается разработкой, производством и обновлением эксплуатируемого парка ПА, ориентированных на передовые отечественные, зарубежные технические показатели и требования, в частности к многофункциональности, что приводит к постепенному освоению отечественным производством новых типа-размерных рядов и моделей ПА и их ДВС [3, 7].

Однако в силу объективных внутренних причин и внешних политических обстоятельств [8] к 2020 году сложилась ситуация, при которой уровень технического состояния ДВС эксплуатируемого парка ПА перестал удовлетворять требованиям к их экологическому классу [7, 8] (см. рис. 1) (по наблюдениям, не менее 40 % ДВС ПА, в среднем по РФ, соответствовали уровню Euro-0) и обеспечения качества воздушной среды в местах применения [9]. Загрязненность воздуха рядом с ПА зависит от их технологического и эксплуатационного технического состояния (года разработки, определяющего совершенство высоких технологий, и степень изношенности, деградации, характеризуемой возрастом), режима работы их ДВС и физического состояния атмосферы (штиль, приземная инверсия температуры) [2, 9].

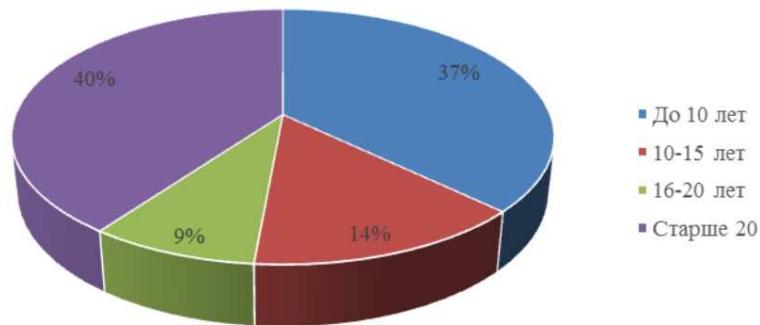


Рис. 1 Возраст парка специальных автомобилей пожарно-спасательного гарнизона Архангельской области [7]

Лишь незначительная часть ПА в РФ соответствует 4-му и 5-му экологическим классам (см. рис. 2 [7]). Это ПА зарубежных или отечественных производителей [7], оснащенных западным оборудованием и компонентами 4 — 5-го экологических классов: "common rail system", "CRT system" (окислительный катализ с фильтрацией сажи), "SCR system" (селективный катализ NO_x), Multi-Point-Injection-Jetronic-Motronic (бензиновые двигатели) и т.д. [2, 5]. Ситуация усугубилась тем, что в 2022 году отечественные производители лишились возможности закупать, устанавливать на новые отечественные и собираемые западные ДВС или ремонтируемые по регламенту технического обслуживания ДВС в эксплуатации такую оснастку западного производства [8]. Ситуация была смягчена своевременно введенным Постановлением Правительства РФ № 1269 от 15.06.2022 года [10] «О внесении изменений в Правила применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия».

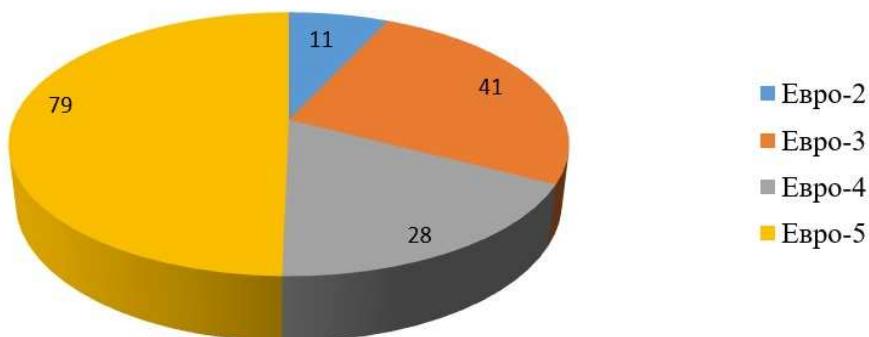


Рис. 2 Распределение дизельных ПА (единиц техники), выпущенных с 2006 года, по экологическим классам [3]

В такой ситуации в системе эксплуатации ПА МЧС России может возрасти интерес к национальным авторским оригинальным разработкам концепции [8] и реализующих ее, научно обоснованным техническим и технологическим решениям [11, 12].

Авторская концепция [8] выстраивается на комплексном внедрении в эксплуатацию безразборной (по составу ОГ) диагностики и устранения отказов топливных систем ДВС ПА, применения водно-топливных микроэмulsionей (ВТМЭ — с оригинальными химическими составами и устройствами ее приготовления), а также окислительных каталитических нейтрализаторов-глушителей шума (КНГШ) [11] и тепловых аккумуляторов фазового перехода (ТАПФ) [12]. Много десятилетними исследованиями и внедрениями в промышленность и эксплуатацию автор совместно с учениками, профессионально, доказали возможность повышения данными средствами уровень экологической безопасности ДВС ПА не менее, чем на два экологических класса от достигнутого или существующего [2, 6, 8, 11, 12].

Следует отметить, что концепция смогла быть реализована благодаря новым, полученным автором, знаний о кинетике (температуре пламени) внутрицилиндровых процессов образования NO_x и частиц сажи $\text{PM}_{2,5}$ с помощью уникальной аппаратуры лазерного индцирования [2].

В настоящее время пожарные автомобили (ПА) и аварийно-спасательные машины (АСМ) являются основными боевыми техническими средствами специальной аварийно-спасательной техники (САСТ) государственной противопожарной службы (ГПС) Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Российской Федерации (МЧС России). Применение в ГПС МЧС России ранее упомянутого Федерального закона № 123-ФЗ сопровождается коренными реформированием структуры сил и средств быстрого (аварийного) реагирования на природные и техногенные чрезвычайные ситуации (ЧС) [3], создания и производства ПА: разработана и внедрена нормативно-правовая база в виде национальных и межгосударственных стандартов, определивших подходы к классификации, выбору номенклатуры показателей и технических требований к ПА, что ознаменовалось созданием типа-размерных рядов и прогрессивных моделей ПА с инновационными техническими и технологическими решениями [3].

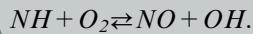
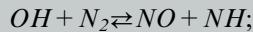
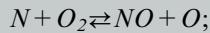
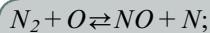
Вместе с гармонизацией организационно-кадрового обеспечения аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) и повышения уровня профессиональной подготовки оперативного состава пожарных, удалось в течение 2004 — 2019 гг. уменьшить время прибытия пожарно-спасательных подразделений на дорожно-транспортные происшествия с 18 до 7 мин и, тем самым, своевременно предотвратить опасное развитие ЧС, сохранить жизни пострадавшим и существенно сократить объемы ущерба от потерь материальных ресурсов [2].

Констатируя позитивные технические изменения в структуре САСТ последних лет, нельзя не обратить внимание на то, что, к сожалению, по данным МЧС России и Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации количество пожаров, особенно лесных, имеет тенденцию к росту [1, 7, 9]. Существенно обострились факторы техногенного роста негативного воздействия смога лесных пожаров и отработавших газов (ОГ) транспортных средств на состояние здоровья населения от поллютантов и катастрофического изменения (потепления) климата на планете [1, 2, 5, 9]. В связи с ростом парка САСТ [3], неудовлетворительными их возрастной структуры и экологического состояния [7], обострились природоохранные проблемы в местах их эксплуатации, в том числе, — на особо охраняемых территориях РФ [9]. Современными исследованиями [8, 9, 10] установлено, что в ОГ поршневых двигателей ПА и АСМ САСТ содержатся чрезвычайно опасные для человека и изменения климата (загрязняющие) химические вещества, такие, как угарный газ CO , углеводороды CH_4 , оксиды азота NO_x , бензо(а)пирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, твердые частицы сажи опасных размеров $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} и парниковые газы: диоксид углерода CO_2 , метан CH_4 .

Как ранее было установлено [2, 8], эффективным методом повышения экологических характеристик эксплуатируемого парка САСТ является применение, вместе с планово-предупредительным техническим их обслуживанием, безразборной диагностики потенциальных отказов двигателей путем расчета удельных топливных показателей с использованием данных прямого измерения газоанализаторами содержания в ОГ O_2 и CO_2 . По мнению автора, точность оценки удельных топливных показателей может быть существенно повышена путем дополнительного учета компонент, являющихся продуктами неполного сгорания топлива, и реализации предлагаемой методологии организации последовательных расчетных этапов.

Этап 1. Учет влияния наличия окислов азота в отработавших газах на результаты расчетов.

Окисление азота происходит по цепному механизму и, при наличии паров воды в продуктах сгорания, может быть представлено совокупностью следующих реакций



Из уравнения реакции образования NO по бимолекулярному механизму видно, что на образование одной грамм-молекулы NO требуется 0,5 грамм-молекулы O₂.

Этап 2. Учет наличия не окисленного углерода в отработавших газах.

Проводя аналогичные рассуждения, получим выражение для вычисления скорректированного значения содержания двуокиси углерода в ОГ

$$CO'_2 = CO_2 + CO + CH + 0,187C_{OG}, \quad (2)$$

На окисление 1 грамм-атома углерода (12 г) требуется 1 грамм-моль кислорода (32 г). Соответственно, на окисление 1 г углерода требуется 2/12 = 2,666 г кислорода. Это количество составляет 2,666/32 = 8,333 • 10⁻² грамм-моль кислорода.

Этап 3. Расчет сажесодержания в зависимости от измеренной приборами дымности отработавших газов.

Анализ показал, что при контроле дымности ОГ прибором Hartridge сажесодержание в них может быть описано полиномом с вероятностью 0,95.

$$C_{OG} = 1,26255 \cdot 10^{-4} \cdot K^2 - 1,97748 \cdot 10^{-3} \cdot K + 3,67243 \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

где COG — концентрация сажи, г/м³;

K — коэффициент ослабления светового потока по шкале Hartridge, %.

Этап 4. Расчет удельной цикловой подачи топлива без корректирующих процедур.

Зависимости без корректировки объема [2] ОГ для удельной цикловой подачи топлива g'_u мг/цикл·л. примут вид

$$g'_u = 5,441 \cdot 10^2 \frac{CO^2 G_b}{iV_h n}; \quad (4)$$

$$g'_u = 3,988 \cdot 10^2 \frac{(21 - O_2) G_b}{iV_h n}, \quad (5)$$

где G_b — измеренное (рассчитанное) значение массового расхода воздуха;

V_h — рабочий объем цилиндра, л;

i — число цилиндров;

n — частота вращения, мин⁻¹.

Этап 5. Расчет удельной цикловой подачи топлива с учетом содержания в топливе воды.

Уточненные зависимости с корректировкой объема ОГ для удельной цикловой подачи топлива в этом случае примут вид

$$g'_u = 1,373 \cdot 10^5 \frac{1}{iV_h n} \cdot \frac{G_b}{237,8/CO_2 + 1}; \quad (6)$$

$$g'_u = 1,373 \cdot 10^5 \frac{1}{iV_h n} \cdot \frac{G_b}{315,14/(21 - O_2) + 1}. \quad (7)$$

Научная новизна комплексной методики расчета удельной цикловой подачи с учетом компонентов отработавших газов, являющихся продуктами неполного сгорания топлива состоит в том, что она, в отличие от существующих, основана на учете стехиометрического расхода воздуха и максимального содержания двуокиси углерода в ОГ и предлагает уточненную зависимость расчета коэффициента избытка воздуха, учитывающего элементарный состав водородосодержащего топлива на основе физико-химического и термодинамического описания процессов сгорания топлива в зависимости от рабочих параметров двигателя, учете соотношения между сажесодержанием и дымностью отработавших газов, полученной дымомерами

различных производителей, а также содержания оксида углерода и состава водородосодержащего топлива. Все это позволяет повысить точность определения удельной цикловой подачи топлива по данным простого анализа отработавших газов и более точно производить корректировку показателей измерителей непрозрачности ОГ.

Модель учета влияния компонентов отработавших газов позволила доработать методику оценки топливных показателей силовых установок пожарных автомобилей и аварийно-спасательных машин при расчетном определении расхода воздуха. Сущность данной методики заключается в расчете и корректировке определения массового расхода воздуха в зависимости от качества наполнения цилиндров двигателя САСТ свежим зарядом [2, 8]. Важным этапом отработки комплексной методики оценки топливных показателей двигателей САСТ оказалась проверка ее адекватности по результатам широких испытаний на двигателях Д-240 и Д-240Т, результаты которой для наглядности представлены на диаграмме рис. 3.

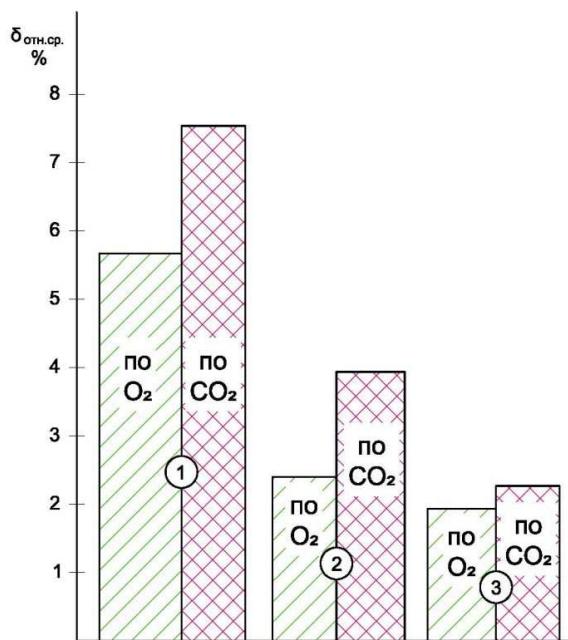


Рис. 3 Диаграмма средних отклонений ($\delta_{\text{отн.ср.}}$ %) значений g'_u , рассчитанных по составу ОГ, от значений, полученных по результатам непосредственных измерений:
1 — по зависимостям без корректировки объема ОГ;
2 — по зависимостям с корректировкой объема ОГ без учета неполноты сгорания;
3 — по зависимостям с корректировкой объема ОГ и с учетом неполноты сгорания

Разработанный метод позволяет, последовательно, с корректировкой объема ОГ и учета неполноты сгорания минимизировать погрешности оценок удельной цикловой подачи топлива на всех эксплуатационных режимах работы ДВС ПА и АСМ САСТ в эксплуатации. Проверки в реальной эксплуатации показали, что за счет своевременного выявления и устранения причин отказов в нарушениях регулировок топливоподачи в системах питания ДВС и которые легко устраивались на производственно-технических центрах МЧС РФ, удалось получить не менее 12 % экономии дорогостоящих сегодня, горючесмазочных материалов.

Для ослабления отравляющего воздействия ОГ на личный состав и население в местах эксплуатации двигателей ПА и АСМ САСТ были разработаны окислительные каталитические нейтрализаторы. Особенностью оригинальной конструкции являлось то, что эти устройства одновременно способны обеспечивать две функции: обезвреживать и глушить шум выпуска ОГ [6, 11, 12]. Конструкции разработанного каталитического устройства по своим габаритным и присоединительным параметрам соответствует штатному глушителю, что облегчает его монтаж в выпускной тракт САСТ на производственно-технических базах МЧС РФ.

Исследования показали, что прогрев носителя катализатора до 660 °C от внешнего источника энергии позволяет уменьшить содержание в ОГ СО до 75 — 77 %, СН — до 43 — 47 % и понизить выброс смога с ОГ до 75 % в момент холодного запуска дизеля и при работе на холостом ходу при прогреве [6, 11]. Эксперименты, проведенные в ОАО «КАМАЗ», показали высокую эффективность устройства нейтрализации

ОГ: 90 % по СО, и до 67 % по СН при номинальных оборотах ($n=2600$ мин $^{-1}$) и на оборотах максимального крутящего момента ($n=1700$ мин $^{-1}$) внешней скоростной характеристики [6, 12].

Разработанная автором стратегическая концепция повышения экологической безопасности поршневых ДВС САСТ в эксплуатации предполагает использовать рассмотренные технические и технологические решения совместно с топливом, балластируемым водой, что сопровождается дополнительным эмурдженным эффектом [2, 8] (см. рис. 4).

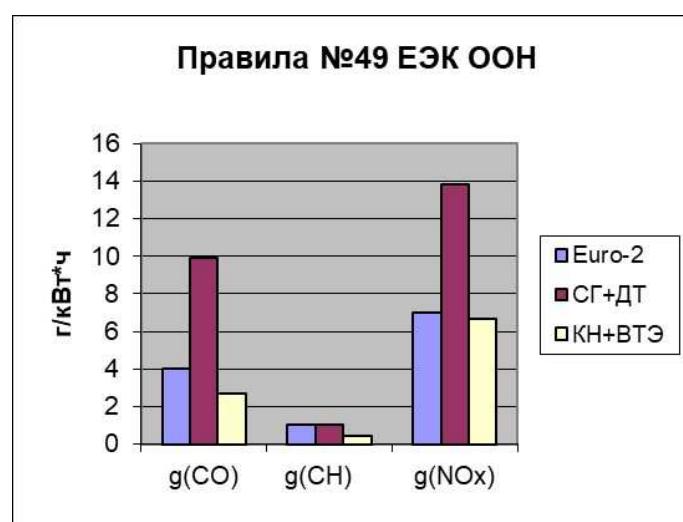


Рис. 4 Сравнительные испытания по процедурам [11] экологической эффективности применения дизеля Д21А1 при его работе на дизельном топливе со штатным глушителем шума (СГ+ДТ) и на водно-топливной микроэмulsionи ВТЭ оригинального состава с каталитическим нейтрализатором-глушителем шума (КН+ВТЭ)

Как можно увидеть из анализа результатов испытаний на рис. 4 применение разработанных технических и технологических, научно обоснованных, решений позволяет повысить экологические характеристики дизельного двигателя ПА на два экологических класса в соответствии с требованиями документа [10].

ВЫВОДЫ

1. Внедрение разработанного метода диагностирования аварийных режимов эксплуатации дизельных ПА и АСМ позволит существенно сократить затраты времени и труда на выявление причин отказов, обеспечить уменьшение расхода топлива и существенно сократить выброс в атмосферу токсичных веществ и парниковых газов.
2. Предлагаемое решение совместного применения каталитических нейтрализаторов и водно-топливных микроэмulsionий дает возможность повысить экологический уровень двигателей ПА и АСМ САСТ по СО, СН, NO_x, бензо(а)пирену, РМ и парниковым газам, не менее, чем на два экологических класса от достигнутого уровня.
3. Все выше отмеченное отвечает требованиям Постановления Правительства РФ № 1269 от 15.06.2022 года. «О внесении изменений в Правила применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия» [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasileva A., Moiseenko K., Skorokhod A., Belikov I., Kopeikin V., Lavrova O. Emission ratios of trace gases and particles for Siberian forest fires on the basis of mobile ground observations. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, 2017, V. 17, No. 20, 12303-12325. DOI: 10.5194/acp-17-12303-2017.
2. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Контроль и прогнозирование эффективности управления чрезвычайным воздействием транспорта на городскую среду и население/Монография//под общей редакцией Б.В. Гавкалюка. — СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. — 220 с.
3. Логинов В.И. Этапы и направления создания и производства пожарных автомобилей в современной России/В.И. Логинов, Д.Г. Мичудо, Н.В. Навценя, А.И. Пичугин, К.Ю. Яковенко // Пожарная безопасность. — 2022. — № 2 (103), — с. 51 — 59. — DOI: 10.37657/vnipo.pb.2021.49.96.006.

4. Weilenmann M., Favez J.-Y., Alvarez R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories. *Atmospheric Environment* 43, pp. 2419 — 2429. DOI:10.1016/j.atmosenv.2009.02.005.
5. Wael K. Al-Delaimy and others Health of People, Health of Planet and Our Responsibility. *Climate Change, Air Pollution and Health* / eBook, Springer, XXIII, 2020. — 417 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31125-4>.
6. Саватеев А.И. Модификация систем выпуска отработавших газов пожарных автомобилей, разогреваемыми каталитическими конверторами: специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/А. И. Саватеев. — Санк-Петербург, 2002. — 163 с. — EDN: RYBLTT.
7. Сацук И.В. Закономерности распределения и технического состояния эксплуатируемых пожарных автомобилей по показателям конструктивной безопасности силовых установок/Сибирский пожарно-спасательный вестник», 2022, № 2, — с. 31 — 38. doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.27.97.004.
8. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Теоретическая концепция контроля топливно-экономических параметров управляемого процесса горения в силовых агрегатах пожарных машин/Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 1 (53), с. 65 — 71.
9. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году» Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/821/%D0%93%D0%94-2018.pdf>.
10. Постановление Правительства РФ от 15.06.2022 года № 1269 «О внесении изменений в Правила применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207180029>.
11. Lozhkin, V.N. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus / V. Lozhkin, O. Lozhkina // *Transportation Research Procedia*. — 2017. — V. 20. — pp. 412 — 417. DOI:10.1016/j.trpro.2017.01.067.
12. Ложкин В.Н., Шульгин В.В., Максимов М.А. О моделировании систем очистки отработавших газов ДВС с использованием нейтрализаторов и тепловых аккумуляторов фазового перехода / Технико-технологические проблемы сервиса, № 3(17), СПб., 2011. — с. 46 — 51. — EDN: OGBGMP. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16910308>.

REFERENCES

1. Vasileva A., Moiseenko K., Skorokhod A., Belikov I., Kopeikin V., Lavrova O., Emission ratios of trace gases and particles for Siberian forest fires on the basis of mobile ground observations. *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow*, 2017, v. 17, No. 20, 12303-12325. DOI: 10.5194/acp-17-12303-2017.
2. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. *Kontrol i prognozirovaniye effektivnosti upravleniya chrezvychaynym vozdeystviem transporta na gorodskuyu sredu i naselenie* [Monitoring and forecasting the effectiveness of managing the emergency impact of transport on the urban environment and population] / Monograph // edited by B.V. Gavkalyuk. — St. Petersburg: St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020. — 220 p. ISBN 978-5-906765-66-6.
3. Loginov V.I. *Etapy i napravleniya sozdaniya i proizvodstva pozharnykh avtomobiley v sovremennoy Rossii* [Stages and directions of creation and production of fire trucks in modern Russia] // V.I. Loginov, D.G. Michudo, N.V. Navtsenya, A.I. Pichugin, K.Yu. Yakovenko // *Fire safety*. — 2022. — No. 2 (103). — pp. 51 — 59. — DOI: 10.37657/vniipo.pb.2021.49.96.006.
4. Weilenmann M., Favez J.-Y., Alvarez, R. Cold-start emissions of modern passenger cars at different low ambient temperatures and their evolution over vehicle legislation categories. *Atmospheric Environment* 43, pp. 2419 — 2429. DOI:10.1016/j.atmosenv.2009.02.005.
5. Wael K. Al-Delaimy et al. Health of People, Health of Planet and Our Responsibility. *Climate Change, Air Pollution and Health* / eBook, Springer, XXIII, 2020. — 417 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31125-4>.
6. Savateev A.I. *Modifikatsiya sistem vypuska otrobotavshikh gazov pozharnykh avtomobiley, razogrevaemymi kataliticheskimi konvertorami: spetsialnost 05.26.03 «Pozharnaya i promyshlennaya bezopasnost (po otrasslyam)* [Modification of exhaust gas systems for fire trucks, heated by catalytic converters: specialty 05.26.03 "Fire and industrial safety (by industry)]: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / A.I. Savateev. — St. Peterburg, 2002. — 163 p. — EDN: RYBLTT.
7. Satsuk I.V. *Zakonomernosti raspredeleniya i tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemых pozharnykh avtomobiley po pokazatelyam konstruktivnoy bezopasnosti silovykh ustyanovok* [Patterns of distribution and technical condition of operated fire trucks in terms of the design safety of power plants] / *Siberian Fire and Rescue Gazette*, 2022, No. 2. — pp. 31 — 38. doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.27.97.004.
8. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. *Teoreticheskaya kontsepsiya kontrolya toplivno-ekonomicheskikh parametrov upravlyayemogo protessa goreniya v silovykh agregatakh pozharnykh mashin* [Theoretical concept of control of fuel and economic parameters of the controlled combustion process in the power units of fire engines] / *Problems of risk management in the technosphere*. 2020. No. 1 (53). pp. 65 — 71.
9. State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018" of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. URL: <https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/821/%D0%93%D0%94-2018.pdf>.
10. Decree of the Government of the Russian Federation No 1269 dated 15.06.2022 "On Amendments to the Rules for the Application of Mandatory Requirements for Certain Wheeled Vehicles and the Assessment of Their Compliance". URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207180029>.
11. Lozhkin, V.N. Catalytic Converter with Storage Device of Exhaust Gas Heat for City Bus/V. Lozhkin, O. Lozhkina // *Transportation Research Procedia*. — 2017. — V. 20. — pp. 412 — 417. DOI:10.1016/j.trpro.2017.01.067.
12. Lozhkin V.N., Shulgin V.V., Maksimov M.A. *O modelirovaniyi sistem ochistki otrobotavshikh gazov DVS s ispolzovaniem neytralizatorov i teplovykh akkumulyatorov fazovogo perekhoda* [On modeling exhaust gas cleaning systems for internal combustion engines using neutralizers and phase transition heat accumulators] / *Technical and technological problems of service*, No. 3 (17), St. Petersburg, 2011. — pp. 46 — 51. — EDN: OGBGMP. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16910308>.

УДК 629.5

ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОСУЩЕСТВЛЕНИЕМ СТРАТЕГИИ ИМО 2023 ГОДА ПО СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С СУДОВ

С.А. Толмачев, Представительство Российской Федерации при Международной морской организации, Лондон, e-mail: tolmachev-s@yandex.ru

В статье представлен анализ принятой Международной морской организацией в июле 2023 года новой Стратегии по сокращению выбросов парниковых газов с судов. Отмечены основные изменения по сравнению с предыдущим аналогичным документом 2018 года, в частности, касательно масштаба задач по декарбонизации международного судоходства и предлагаемых мер-кандидатов практического характера. Обозначены потенциальные проблемы и вопросы, связанные с осуществлением Стратегии ИМО 2023 посредством разработки новых требований МАРПОЛ и планируемого пересмотра существующих требований по эксплуатационной углеродоемкости судов. В итоговой части представлены основные выводы о возможном воздействии Стратегии ИМО 2023 на деятельность ИМО по созданию международно-правовых рамок для судоходства на ближайшую и отдаленную перспективу в части реагирования на климатические изменения.

Ключевые слова: сокращение выбросов парниковых газов с судов, эксплуатационная углеродоемкость, чистые нулевые выбросы, жизненный цикл интенсивности выбросов парниковых газов, альтернативные виды судового топлива, береговое электропитание судов, рыночные меры

QUESTIONS AND ISSUES RELATED TO THE IMPLEMENTATION OF THE IMO STRATEGY 2023 ON THE REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS

S.A. Tolmachev, Mission of the Russian Federation to the International Maritime Organization, London, e-mail: tolmachev-s@yandex.ru

The article contains analysis of the new Strategy on the reduction of GHG emissions from ships adopted by the International Maritime Organization in July 2023. Main changes comparing to the similar document of 2018 in particular regarding the levels of ambition to decarbonize the international shipping and proposed practical candidate measures have been highlighted. Potential problems and questions arising from the implementation of the IMO Strategy 2023 by means of development of new MARPOL requirements and scheduled revision of the existing requirements on operational carbon intensity of ships have been outlined. Main outcomes which relate to the possible effect of the IMO Strategy 2023 on the IMO activities to develop legal international framework for shipping in near and distant future as response to climate change have also been presented.

Keywords: reduction of GHG emissions from ships, operational carbon intensity, net zero emissions, GHG intensity life cycle, alternative marine fuels, ships on-shore power supply, market-based measures

ВВЕДЕНИЕ

Реагирование на изменение климата является сегодня одним из наиболее резонансных направлений международного сотрудничества в различных форматах. Для содействия этой работе были разработаны и приняты несколько многосторонних международных инструментов, основными из которых на сегодня являются Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) 1992 года., Киотский протокол к РКИК ООН 1997 года, а также Парижское соглашение 2015 года.

Судоходная отрасль не осталась в стороне. В статье 2 Киотского протокола Международная морская организация обозначена в качестве межправительственной площадки, в рамках которой государства должны договариваться о снижении выбросов парниковых газов в судоходстве [1].

Принятие Парижского соглашения 2015 года подстегнуло разработку в рамках ИМО стратегического документа, который был призван задать генеральный курс для работы Организации по реагированию на климатические изменения, установить цели, задачи и предложить набор вариантов их достижения. Таким документом стала принятая в апреле 2018 года Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов [2]. Документ формально не является обязательным, но его влияние

непосредственно на отрасль трудно переоценить. Закрепленные в нем ориентиры по сокращению выбросов и снижению углеродоемкости судоходства напрямую были использованы при разработке требований Приложения VI «Правила по предотвращению загрязнения атмосферы с судов» к МАРПОЛ, которая была выбрана в качестве практического механизма приложения усилий по реагированию судоходной отрасли на климатические изменения. Ведь сторонами Протокола 1997 года к МАРПОЛ, посредством которого было принято Приложение VI, на сегодня являются 105 государств с валовой вместимостью флота под своим флагом 96,81 % от суммарной валовой вместимости мирового торгового флота [3].

В июле 2023 года была принята пересмотренная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов (Стратегия ИМО 2023) [4]. Ввиду высокой степени важности и влияния этого документа на текущую и перспективную деятельность ИМО представляет интерес анализ его положений, внесенных изменений по сравнению с предыдущей версией стратегии, а также определение проблемных моментов и наиболее важных тенденций, которые будут оказывать воздействие на разработку международно-правовых рамок для международного судоходства в ближайшие годы и десятилетия.

ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ИМО ПО СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ — ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ И ПЕРЕСМОТР

После принятия Первоначальной стратегии в рамках профильных органов ИМО началась прикладная работа по ее реализации в части т.н. краткосрочных мер международно-правового регулирования, т.е. мер, разработанных и принятых между 2018 и 2023 гг. В июне 2021 года было принято пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ с новыми требованиями технического и эксплуатационного характера: коэффициентом энергоэффективности для существующих судов (*EEXI*) и показателем и рейтингом эксплуатационной углеродоемкости судна (*CII*) [5]. Более подробно с этими требованиями можно ознакомиться в статье, вышедшей в Научно-техническом сборнике Российского морского регистра судоходства №№ 64/65 [6].

Параллельно в ИМО велась работа по другим направлениям, обозначенным в Первоначальной стратегии как краткосрочные меры-кандидаты, а именно, по совершенствованию (ужесточению) требований по энергоэффективности для новых судов (*EEDI*), обсуждение способов регулирования выбросов метана и летучих органических соединений, разработка рекомендаций по береговому электропитанию судов и по использованию альтернативных видов топлива.

Также началось обсуждение подходов по реализации отдельных среднесрочных мер-кандидатов (меры, которые должны быть приняты в период 2023 — 2030 гг.), в первую очередь рыночного механизма для уравнивания стоимости нефтяного и альтернативного судового топлива и содействовать скорейшему выводу низко- и безуглеродных видов топлива (аммиак, водород, метanol и др.) на мировой рынок.

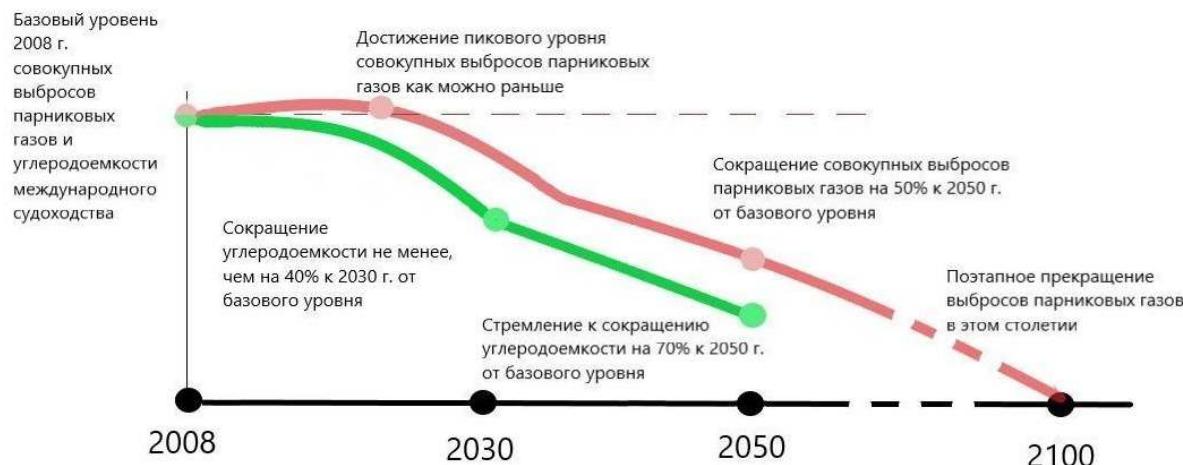
В Первоначальной стратегии был заложен ее пересмотр в 2023 году. Основой для пересмотра предполагалось сделать всеобъемлющее исследование ИМО по парниковым газам [7], которое должно было обозначить изменения структуры и объема выбросов углекислого газа и других парниковых газов в атмосферу с судов, помочь государствам принять обоснованные и технически выверенные решения. По факту пересмотр Первоначальной стратегии, проходивший со второй половины 2022 года до июля 2023 года, представлял собой торг между различными группами государств, в котором каждый использовал результаты исследования ИМО в своих интересах. Экономически развитые государства выступали за радикальное усиление климатических амбиций, развивающиеся государства ожидали придерживаться необходимости постановки реалистичных задач, ухода от непропорциональных негативных последствий для национальных экономик и международного судоходства в целом.

Пересмотр Первоначальной стратегии завершился принятием нового документа, который теперь будет определять вектор развития отрасли как минимум на ближайшие пять лет и в практическом плане будет лежать в основе пересмотра требований МАРПОЛ по эксплуатационной углеродоемкости, а также разработки новых требований технического и рыночного характера.

СТРАТЕГИЯ ИМО 2023 ГОДА — ОСНОВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Наиболее важные изменения в Стратегии ИМО 2023 года по сравнению с Первоначальной стратегией касаются раздела «Масштаб задач», т.е. целевых показателей и сроков декарбонизации морского судоходства, как представлено на рис. 1.

Первоначальная стратегия ИМО



Стратегия ИМО 2023

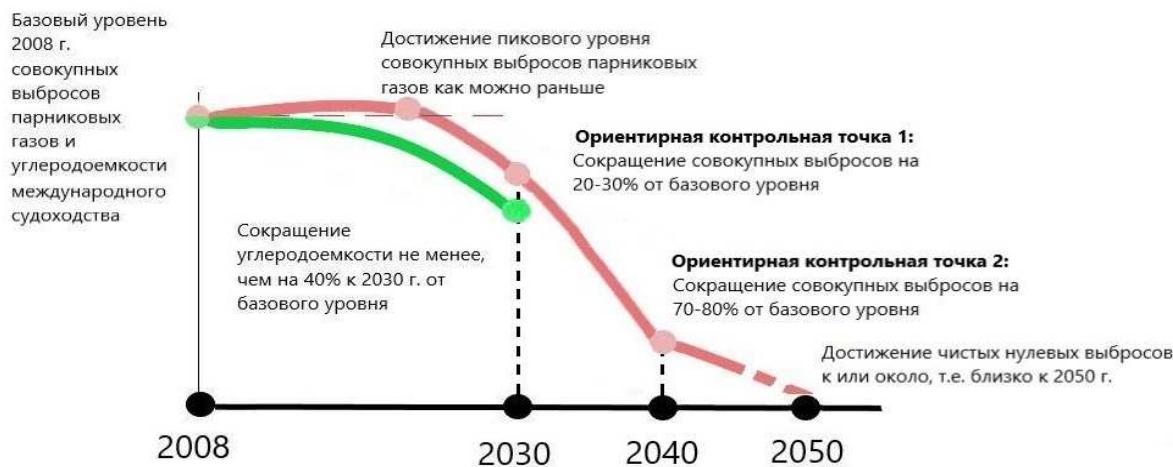


Рис. 1 Сравнение масштаба задач Первоначальной стратегии ИМО и Стратегии ИМО 2023

Из Стратегии ИМО 2023 исключена задача по сокращению углеродоемкости на 70 % к 2050 году по сравнению с 2008 годом. Кажущееся на первый взгляд послабление на самом деле таковым не является, поскольку снижение углеродоемкости привязывается ко второй задаче — достижению чистого нулевого уровня выбросов «к или около, т.е. близко к 2050 г.». В этой части Стратегия ИМО 2023 является существенно более амбициозной, чем ее предыдущий вариант. Срок прекращения или радикального сокращения выбросов, фактически, сдвинут со второй половины века на его середину, а такая неоднозначная формулировка отражает всю сложность переговоров и является хрупким компромиссом между желавшими зафиксировать 2050 год как крайний срок декарбонизации, и теми, кто хотел сохранить гибкость в этом вопросе.

Добавлены т.н. «ориентирные контрольные точки» — сокращение общих ежегодных выбросов от международного судоходства на 20 — 30 % к 2030 году и 70 — 80 % к 2040 году по сравнению с 2008 годом. При этом отмечено, что масштаб задач и ориентирные контрольные точки должны учитывать выбросы на всем жизненном цикле (добыча сырья, производство топлива и его потребление на судне), а также препятствовать переносу выбросов в другие сектора.

Изменились сроки разработки и перечень конкретных мер регулирования. Краткосрочные меры (требования по энергоэффективности) указаны как завершенные, при этом отмечена необходимость и важность их пересмотра, как это определено в правилах 25.3 и 28.11 Приложения VI к МАРПОЛ.

В перечне среднесрочных мер-кандидатов отмечена разработка т.н. «пакета», состоящего из технического и экономического (рыночного) элементов. Подробнее о представленных предложениях по составу «пакета» мер-кандидатов можно ознакомиться в [8].

В настоящее время ведется работа по комплексной оценке последствий социально-экономического характера и поиску оптимальных и непротиворечивых сочетаний предложенных мер. Если с техническим элементом имеется ясность — это будет целеориентированный стандарт содержания парниковых газов в судовом топливе с поэтапным ужесточением значений, то формат будущего экономического элемента на данном этапе не определен. В Стратегию ИМО 2023 внесено упоминание о механизме ценобразования на выбросы как основе экономического элемента. Под это подпадают все представленные на сегодня предложения, и самая простая с точки зрения администрирования и имеющая наибольшую поддержку в ИМО мера (углеродный сбор/налог с потребленного судового топлива) может быть по итогам переговоров дополнена положениями, например, по смягчению последствий или учету особенностей применения рыночных механизмов в судоходной отрасли.

Контуры будущего «пакета» мер в соответствии со Стратегией ИМО 2023 должны быть сформированы до конца 2024 года с прицелом на разработку и принятие новых положений МАРПОЛ в 2025 году и вступления в силу в районе 2027 года.

Из Первоначальной стратегии в новый документ перенесен ряд вспомогательных среднесрочных мер-кандидатов, которые призваны поддерживать осуществление основного «пакета» мер: сбор данных, оценка результативности, совершенствование необходимых процессов и процедур, создание стимулов для распространения новых технологий и альтернативных видов топлива.

Из Стратегии ИМО 2023 убраны долгосрочные меры-кандидаты, которые были указаны в Первоначальной стратегии, с пометкой, что такие меры будут сформулированы на этапе очередного пересмотра документа в 2028 год.

Незначительно дополнены разделы по оценке последствий и техническому сотрудничеству, однако эти разделы описывают отдельные процессы и вспомогательные направления работы и не затрагивают фундаментальные положения документа.

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ ИМО 2023 — ВОПРОСЫ И ПРОБЛЕМЫ

Принятие Стратегии ИМО 2023 было представлено как существенное достижение Организации и ее членов, подтверждение единства международного морского сообщества и согласие на более амбициозные действия по реагированию на изменение климата в отдельно взятой отрасли.

Внимательное же прочтение некоторых положений принятого документа позволяет обоснованно говорить, скорее, о растущем расколе между развитыми и развивающимися государствами, недостатке научно-технической проработки в угоду очевидным политическим амбициям, желании поднять авторитет на популярной климатической повестке, не сильно задумываясь о последствиях для судоходной отрасли.

Стратегия ИМО 2023 сохранила или даже повысила уровень неопределенности в отношении задач, путей и сроков их решения, хотя цель пересмотра была противоположной.

Так, например, не удалось решить заложенное еще в Первоначальной стратегии противоречие между двумя руководящими принципами документа, которые должны лежать в основе разработки международных требований в ИМО по реагированию на изменение климата. Речь идет об одном из основных принципов Конвенции МАРПОЛ, заложенном в статье 5 (непредоставление более благоприятных условий судам под флагами государств, не являющихся сторонами конвенции) [9] и одном из руководящих принципов Парижского соглашения 2015 года, указанных в статье 2 (общая, но дифференцированная ответственность государств и соответствующие возможности) [10].

Указание в Стратегии ИМО 2023 этих двух принципов крайне осложняет практическую ее реализацию, что было характерно и для этапа разработки краткосрочных мер. Так, ссылаясь на заложенный в Первоначальной стратегии руководящий принцип Парижского соглашения, некоторые государства пытались внести в проект требований МАРПОЛ исключения для судов под флагами развивающихся или малых островных государств, пользующихся соответствующими привилегиями в рамках механизмов РКИК ООН.

Вопросы вызывает и упоминание в Стратегии ИМО 2023 необходимости предотвращать перенос выбросов в другие сектора мировой экономики. При своей внешней логичности этот постулат противоречит одному из актуальных сегодня направлений работы ИМО — созданию мер регулирования для использования берегового электропитания судов. В 2023 году было принято соответствующее Временное руководство ИМО [11]. В ряде государств услуга берегового электропитания активно развивается, Европейский союз рассматривает это как важную часть собственного пакета региональных мер для судоходства по реагированию на изменение климата и планирует ввести в ближайшем будущем требование об обязательном предоставлении такой услуги в европейских портах [12].

Очевидно, что использование только возобновляемой энергии для обеспечения берегового электропитания судов на сегодня возможно только в рамках пилотных проектов. В остальных же случаях (использование электроэнергии, полученной из ископаемых источников) береговое электропитание формально будет являться переносом загрязнения с судна на берег. Тем не менее, береговое электропитание может быть эффективным механизмом по сокращению выбросов в отдельных акваториях, и указанное положение Стратегии ИМО 2023 может препятствовать работе ИМО по созданию унифицированных международных мер регулирования. Вероятно, к этому вопросу придется вернуться при очередном пересмотре стратегии в 2028 году.

Не добавило ясности включение в Стратегию ИМО 2023 «ориентирных контрольных точек» на 2030 и 2040 гг. Ввиду отсутствия определения в документе, их можно понимать или как проверки выполнения масштаба задач в момент времени или как промежуточные цели. Во втором случае требования инструментов ИМО, разработанные в рамках Стратегии ИМО 2023, могут подгоняться под достаточно амбициозные значения контрольных точек. Если абсолютное сокращение выбросов от международного судоходства в пределах 20 — 30 % к 2030 по сравнению с 2008 годом не представляется фантастическим, то для достижения второй «ориентирной контрольной точки» (70 — 80 % сокращения к 2040 году) потребуется серьезно ужесточить существующие и перспективные требования МАРПОЛ в начале 2030-х гг. Особенно это будет актуально, если промежуточная цель на 2030 год не будет выполнена. В этой связи стоит отметить, что итоговые значения для «ориентирных контрольных точек» были внесены в Стратегию ИМО 2023 по результатам поиска компромисса между группами государств, т.е. никаких расчетов на основе доступных статистических данных и научного прогнозирования за этими цифрами не имеется.

В качестве компромисса в Стратегии ИМО 2023 указана необходимость достижения «чистых нулевых выбросов» парниковых газов от международного судоходства в районе 2050 года.

Определение чистых нулевых выбросов (углеродной нейтральности) имеется в документах Международной группы экспертов ООН по изменению климата (МГЭИК) и означает равновесие между антропогенными выбросами парниковых газов в атмосферу и антропогенными удалениями из атмосферы в результате целевой деятельности человека [13]. Последняя включает увеличение биологических поглотителей (накопителей) углерода, химическую инженерию для удаления углерода из атмосферы, а также его улавливание и хранение.

Очевидно, что концепцию углеродной нейтральности, как она определена МГЭИК, нельзя напрямую применить к судоходной отрасли, где отсутствует возможность компенсации выбросов парниковых газов за счет биологического поглощения. Технологии же улавливания и хранения судовых выбросов углерода пока неразвиты, и их применение ограничено.

При этом в ходе переговоров в ИМО государства старательно обходили необходимость выработки единого понимания «чистых нулевых выбросов». В итоге на сегодня этот вопрос остается неурегулированным и открытым для интерпретаций государствами.

Альтернативой могут выступать схемы компенсаций за счет участия в деятельности по повышению биологического поглощения в других отраслях, т.е. зачет выбросов с судов посредством инвестиций судоходных компаний в «зеленые» проекты на берегу. В этом случае не требуется кардинальных изменений в структуру потребления бункерного топлива мировым торговым флотом. Это только один из возможных вариантов практической реализации концепции «чистых нулевых выбросов», и на сегодня нет ясности, насколько подобный вариант будет приемлем на момент разработки требований МАРПОЛ в рамках реализации Стратегии ИМО 2023. Уже сейчас часть государств готовы поддержать подобные схемы, другие же выступают категорически против.

С этим вопросом связан еще один потенциально проблемный аспект Стратегии ИМО 2023, а именно, указание в ней необходимости учета выбросов на протяжении всего жизненного цикла судового топлива.

Параллельно с пересмотром Стратегии Международная морская организация в спешке разработала и приняла соответствующее рекомендательное руководство [14]. Этот технически сложный документ вызывает вопросы в связи с неоднозначностью использованных в нем т.н. критериев экологической устойчивости и предложенной схемы маркировки различных видов топлива на основе этих критериев. При определенных условиях некоторые альтернативные виды топлива будут считаться углеродно-нейтральными на своем жизненном цикле, хотя по факту использование таких видов топлива на судне будет сопряжено с выбросами CO₂. Предложенные в документе методики оценки и маркировки ориентированы в первую очередь на дискриминацию ископаемого топлива, даже его видов, связанных с пониженными выбросами CO₂ в атмосферу, таких как СПГ или сжиженные углеводородные газы.

Как для механизма компенсаций, так и для оценки жизненного цикла создается ситуация, когда углеродная нейтральность международного судоходства может достигаться «на бумаге», т.е. в рамках отчетности, хотя по факту выбросы с судов сохранятся. И если для компенсационных механизмов можно говорить хотя бы о реальных действиях, направленных на поглощение парниковых газов, пусть и через проекты на берегу, то в случае с оценкой жизненного цикла основной задачей может стать не сокращение выбросов, а обоснование отказа от ископаемого топлива в пользу альтернативного. При этом на этапе производства такие виды топлива, зачастую, могут быть связаны с повышенными объемами выбросов вредных веществ, чем при производстве топлива на основе углеводородов. Это фундаментальные вопросы, которые потребуется решать в ближайшие годы.

Однозначно положительным итогом пересмотра Первоначальной стратегии можно считать уход от повышения параметров сокращения углеродоемкости международного судоходства. Приложение VI к МАРПОЛ предполагает необходимость последовательного ужесточения значений показателя и рейтинга эксплуатационной углеродоемкости судна в соответствии с масштабом задач стратегии. Итоговые параметры должны быть зафиксированы по результатам пересмотра требований в 2024 — 2025 гг. То, что целевой показатель сокращения углеродоемкости в Стратегии ИМО 2023 остался на уровне «как минимум на 40 % к 2030 году по сравнению с уровнем 2008 г.», а не повысился до 65 % к 2030 году и 98 % к 2040 году, как предлагали некоторые государства в ходе переговоров [15], вселяет надежду, что пересмотр требований МАРПОЛ пойдет по более реалистичному сценарию.

Также тот факт, что из Стратегии ИМО 2023 убрали упоминание о целях по сокращению эксплуатационной углеродоемкости после 2030 года, позволяет с оптимизмом рассчитывать, что эти неоднозначные требования будут применяться только до 2030 года при понимании, что дальнейшее сокращение эксплуатационной углеродоемкости международного судоходства будет обеспечиваться уже за счет среднесрочных мер.

ВЫВОДЫ

Стратегия ИМО 2030 не устранила, а, напротив, добавила неопределенности в работу ИМО по декарбонизации международного судоходства.

К сожалению, подобная неопределенность в способах и возможностях достижения целей при всей амбициозности самих целей не играет на руку судовладельцам. Ведь судно, построенное всего через несколько лет, может эксплуатироваться в горизонте 2050 года, когда по планам ИМО отрасль должна достичь чистых нулевых выбросов в атмосферу. И соответственно, уже сейчас необходимо понимать какие технические решения следует закладывать в такое судно, что непосредственно будет влиять на капитальные затраты.

Более того, заложенный в Стратегии ИМО 2023 плановый пересмотр в 2028 году с учетом временных рамок введения в действие среднесрочных мер обусловливает повторение ситуации с пересмотром Первоначальной стратегии. Т.е. эта работа будет проводиться, фактически, в отрыве от результатов осуществления мер. К 2028 году в распоряжении ИМО еще не будет достаточных данных об эффективности принятых требований МАРПОЛ технического и экономического характера.

Далее, радикальное сокращение выбросов зафиксировано в Стратегии ИМО 2023 не на текущий десятилетний период, а на период 2030 — 2040 гг. Можно трактовать это как отложенное решение в связи с трудностями по достижению компромисса между государствами на данном этапе (что имело место), отсутствием эффективных и доступных низко- и безуглеродных видов судового топлива и технологий сегодня в надежде получить их в горизонте 2030 года.

В таком решении виден расчет на успех среднесрочных мер как основы для широкого использования новых видов топлива и технологий, обеспечения зафиксированного в Стратегии ИМО 2023 радикального сокращения выбросов после 2030 года, пусть даже путем создания искусственных механизмов по удорожанию традиционных видов топлива.

Соответственно, чтобы такой расчет оправдался, среднесрочные меры должны быть достаточно жесткими. Это означает, что предстоящие два года станут определяющими с точки зрения формирования облика будущего международного судоходства.

В этой связи крайне важной представляется работа по разработке конкретных параметров будущих требований ИМО в отношении топливного стандарта и рыночного механизма в рамках Конвенции МАРПОЛ, а также проведение собственных оценок потенциального воздействия требований с учетом специфики национального торгового флота, производства судового топлива и структуры морской торговли.

В практическом плане также немаловажное значение будет иметь анализ собираемых судовладельцами данных для расчета показателя и рейтинга эксплуатационной углеродоемкости, определение особенностей эксплуатации конкретных судов или флота компаний в привязке к этому пакету требований МАРПОЛ.

Собранные судовладельцами данные могут быть использованы во время пересмотра этих требований МАРПОЛ в 2024 — 2025 гг. с целью избежать избыточного ужесточения и обеспечить более гибкий подход к их реализации в промежутке 2027 — 2030 гг. В практическом плане такая информация поможет выявить тенденции и факторы, влияющие на эксплуатационную углеродоемкость судна при различных условиях эксплуатации, подготовить обоснованные предложения в ИМО по включению уточнений в правовые рамки, например в части размера ежегодных понижающих коэффициентов для расчета эксплуатационной углеродоемкости, перечня и значений поправочных коэффициентов, исключений и рейсовых корректировок.

В погоне за декарбонизацией отрасли государствам будет необходимо найти баланс между климатическими амбициями и здравым смыслом, основанным на достоверных научных и статистических данных. В противном случае велика вероятность нанести необоснованными решениями серьезный и долговременный вред судоходной отрасли и международной торговле в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. ООН, 1998 года.
2. Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов, резолюция МЕРС.304(72)
3. International Maritime Organization. Status of IMO Treaties. Comprehensive information on the status of multilateral Conventions and instruments in respect of which the International Maritime Organization or its Secretary-General performs depositary or other functions, 12 July 2023.
4. Стратегия ИМО 2023 по сокращению выбросов парниковых газов с судов, резолюция МЕРС.377(80)
5. Поправки к Приложению VI к Конвенции МАРПОЛ (Пересмотренное Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 2021 года), резолюция МЕРС.328(76)
6. Шурпяк В.К., Толмачев С.А., Мусонов М.В. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. №№ 64/65, Санкт-Петербург, 2021, с. 4 — 17.
7. Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020, документ Секретариата ИМО на 75-ю сессию Комитета по защите морской среды, МЕРС 75/7/15.
8. Толмачев С.А. Перспективы введения мер рыночного характера по сокращению выбросов парниковых газов с судов. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. № 70/71, Санкт-Петербург, 2023, с. 4 — 12.
9. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, консолидированное издание, Международная морская организация, 2017.
10. Парижское соглашение, ООН, 2015.
11. Interim guidelines on safe operation of onshore power supply (OPS) service in port for ships engaged on international voyages, Circular MSC.1/Circ.1675.
12. Regulation (EU) on the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transports, and amending Directive 2009/16/EC, Brussels, 13 July 2023.
13. Специальный доклад МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1,5 °C выше доиндустриальных уровней и о соответствующих траекториях глобальных выбросов парниковых газов в контексте укрепления глобального реагирования на угрозу изменения климата, а также устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты. Приложение I: Глоссарий, 2018. [Мэтьюз, Д.Б.Р. (ред.)].
14. Руководство по интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла судового топлива, резолюция МЕРС.376(80)
15. Refining the level of ambition in the Revised IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. Документ Канады, США и Великобритании на 14-е совещание Межсессионной рабочей группы по сокращению выбросов парниковых газов с судов, ISWG-GHG13/2/9.

REFERENCES

1. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations, 1998.
2. Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships, Resolution MEPC.304(72).
3. International Maritime Organization. Status of IMO Treaties. Comprehensive information on the status of multilateral Conventions and instruments in respect of which the International Maritime Organization or its Secretary-General performs depositary or other functions, 12 July 2023.
4. 2023 IMO Strategy for reduction of GHG emissions from ships, Resolution MEPC.377(80)
5. Amendments to MARPOL Annex VI (2021 Revised MARPOL Annex VI), Resolution MEPC.328(76)
6. Shurpyak V.K., Tolmachev S.A., Musonov M.V. *Novye trebovaniya IMO po umensheniyu vybrosov uglekislogo gaza s morskikh sudov, sovershayushchikh transportnyu rabotu* [New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. Nos. 64/65, Saint Petersburg, 2021, pp. 4 — 17.
7. Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020, Submission by the IMO Secretariat to MEPC 75, MEPC 75/7/15
8. Tolmachev S.A. *Perspektivi vvedeniya mer rynochnogo kharaktera po sokrashcheniyu vybrosov parnikovykh gazov s sudov* [Perspectives of the introduction of market-based measures to reduce greenhouse gas emissions in the shipping sector]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. Nos. 64/65, St. Petersburg, 2021, pp. 4 — 12.
9. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, consolidated edition, International Maritime Organization, 2017.
10. Paris Agreement, United Nations, 2015.
11. Interim guidelines on safe operation of onshore power supply (OPS) service in port for ships engaged on international voyages, IMO Circular MSC.1/Circ.1675.
12. Regulation (EU) on the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transports, and amending Directive 2009/16/EC, Brussels, 13 July 2023.
13. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Annex I: Glossary, 2018. [Matthews, J.B.R. (ed.)].
14. Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels, IMO Resolution MEPC.376(80).
15. Refining the level of ambition in the Revised IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. Submission by Canada, United Kingdom and United States to ISWG-GHG14, ISWG-GHG13/2/9.

КОЭФФИЦИЕНТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ОТ РАБОТЫ МОРСКИХ СУДОВ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ

А.С. Буянов, канд. экон. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: BuyanovAS@cniimf.ru

В.В. Якимов, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: YakimovVV@cniimf.ru

А.С. Реутский, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: ReutskyAS@cniimf.ru

В работе рассматриваются вопросы определения углеродного следа транспортных услуг при использовании судов с ледовым классом, эксплуатирующихся на арктических трассах. Целью исследования является выявление альтернативных способов оценки конструктивного коэффициента эффективности транспортных ледовых судов для дальнейшего его использования в целях корпоративного учета углеродных единиц, определения углеродного следа транспортной услуги, а также оценки влияния погодных условий трассы Северного морского пути на величину углеродного следа, оставляемого судном, совершающим грузовой переход от Обской губы в восточном направлении в летне-осенний период. В исследовании даны рекомендации по использованию методик расчета углеродного следа транспортной услуги, базирующихся на конструктивных коэффициентах энергоэффективности судов, позволяющие использовать методику для решения задач по планированию деятельности транспортных компаний, направленной на модернизацию флота и извлечения прибыли из совокупности профильной деятельности и участия в новообразованной торговле углеродными единицами.

Ключевые слова: Углеродный след, корпоративный учет, углеродный след, транспортной услуги, углеродный след продукции, EEDI, EEXI, EKPI, нормативное обеспечение

ENERGY EFFICIENCY COEFFICIENT AS A TOOL FOR DETERMINING THE CARBON FOOTPRINT FROM THE OPERATION OF SEA-GOING SHIPS OF ICE CLASSES

A.S. Buyanov, PhD, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: BuyanovAS@cniimf.ru

V.V. Yakimov, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: YakimovVV@cniimf.ru

A.S. Reutsky, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: ReutskyAS@cniimf.ru

The paper deals with the issues of determining the carbon footprint of transport services when using ships with an ice class operating on Arctic routes. The aim of the study is to identify alternative methods for assessing the constructive coefficient of efficiency of ice ships for its further use for corporate accounting of carbon units, determining the carbon footprint of a transport service, as well as assessing the impact of weather conditions along the Northern Sea Route on the carbon footprint left by a ship passed from the Gulf of Ob to the eastward during summer and autumn. The study provides recommendations on the use of methods for calculating the carbon footprint of a transport service, based on the constructive coefficients of the energy efficiency of ships, allowing the use of the methodology for solving problems of planning the activities of transport companies aimed at modernizing the fleet and deriving profit from the set of core activities and participation in the newly formed trade in carbon units.

Keywords: Carbon footprint, corporate accounting and reporting, transport service carbon footprint, product carbon footprint, EEDI, EEXI, EKPI, regulatory framework.

ВВЕДЕНИЕ

Появившиеся в последние годы зарубежные и отечественные инструментарии по оценке конструктивного коэффициента энергоэффективности и углеродного следа транспортных услуг [1, 2, 3] формулируют ряд задач, лежащих на стыке современных экологических требований и экономической эффективности работы судна.

До недавнего времени вопрос перехода на альтернативные виды топлива ставился только с точки зрения удовлетворения требованиям ИМО по ограничению объема вредных выбросов в атмосферу. Теперь же появилась дополнительная мотивация использования альтернативных топлив: возможность получить дополнительную прибыль за счет реализации недоиспользованных организацией углеродных единиц.

Действующая российская нормативная база создает инструментарий, направленный на создание реестра углеродных единиц. Однако методическая его часть, связанная с расчетами количества образующихся выбросов CO_2 эквивалента применительно к морскому транспорту, имеет архаичную структуру и ряд недостатков:

- не учитывает связь технических характеристик судна и его расхода топлива;
- не учитывает выполненную судном транспортную работу [3];
- количество использованного судами топлива определяется по окончанию расчетного периода, а не после каждого рейса, что с одной стороны повышает сложность расчета из-за «размытости» границ отчетного периода, а с другой стороны снижает качество полученного результата.

Эти особенности методики затрудняют ее использование для решения задач по планированию деятельности судоходной компании, направленной на модернизацию флота и извлечение прибыли, в том числе и от участия в новообразованной торговле углеродными единицами.

В настоящий момент происходит активное освоение Северного морского пути (далее — СМП), при этом используются суда с высокими ледовыми классами, характеристики которых оказывают значительное влияние на выполняемую ими транспортную работу. Через повышение удельной мощности судна и одновременное снижение удельной грузоподъемности изменяются в худшую сторону показатели транспортной работы, выполняемой судами с высоким ледовым классом, а схема эксплуатации, подразумевающая низкую скорость судна в ледовых условиях в совокупности с высоким расходом топлива лишь усугубляет эту ситуацию.

В связи с этим, становятся актуальными вопросы определения углеродного следа транспортных услуг при использовании судов с ледовым классом, эксплуатирующихся на арктических трассах.

Существующая в настоящий момент нормативная база учета выбросов парниковых газов энергоустановками судов выглядит следующим образом. Для судна, совершающего международные рейсы, действуют требования в части энергоэффективности судов в соответствии с требованиями главы 4 Приложения VI к МАРПОЛ 73/78. В соответствии с ними, каждое судно валовой вместимостью 400 и более, которое подпадает под требования главы 4 Приложения VI к МАРПОЛ 73/78 [4], подлежит первоначальному освидетельствованию с последующей выдачей Международного свидетельства об управлении энергоэффективностью судна (Свидетельство *IIE*) в соответствии с резолюцией ИМО МЕРС.203(62) [5], принимая во внимание Руководство 2022 года по освидетельствованию и сертификации конструктивного коэффициента энергоэффективности (*EEDI*), приведенное в резолюции ИМО МЕРС.365(79) [6] с учетом резолюций ИМО МЕРС.364(79) [7] и ИМО МЕРС.328(76) [8]. В результате освидетельствования подтверждается достигнутый конструктивный коэффициент энергоэффективности (достигнутый *EEDI*) судна, определяемый по формуле (1).

В настоящий момент формула по определению достигнутого конструктивного коэффициента энергоэффективности (достигнутый *EEDI*) судна помимо физических величин, таких как, мощностные характеристики оборудования энергетической установки (P_{ME} , P_{AE}), переводные коэффициенты (C_F), удельный расход топлива (SFC) и характеристики транспортной работы ($Capacity$, V_{ref}) включает в себя коэффициенты, описывающие влияние проектных характеристик судна — его типа, параметров энергетической установки и влияние на ее состав и мощность агрегатов категории ледовых усилий (f_l), снижения скорости в морских условиях (f_w), использования энергоэффективных технологий (f_{eff}), ограничения вместимости судна с учетом его конструктивного исполнения и действующих в отношении него норм

и правил (f_i), влияния формы корпуса судна (f_c), наличия специального грузового оборудования (f_l), ледового класса (f_m) — и имеет вид

$$EEDI_{Attained} = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \\ + \frac{((\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} - \frac{\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \quad (1)$$

Соответствие судна или проекта судна экологическим требованиям достигается путем сравнения расчетанного достигнутого значения конструктивного коэффициента энергоэффективности $EEDI_{Attained}$, (1) этого судна с величиной требуемого значения $EEDI_{Required}$ для судна этого типа и соответствующего дедвейта с учетом года постройки судна. В настоящий момент использование актуальной методики [7] расчета достижимого коэффициента энергоэффективности ($EEDI_{Attained}$) в отношении судов с высокими ледовыми классами невозможно в связи с тем, что в ней отсутствует учет влияния ледовых классов выше **Arc5**. Также методология в целом не предполагает процедуры выбора особого значения требуемого коэффициента энергоэффективности ($EEDI_{Required}$) для судов с ледовыми классами а учет влияния дизель-электрической энергетической установки на значение $EEDI_{Attained}$ выполняется только для газовозов СПГ.

Для наглядности произведем расчет значений $EEDI_{Attained}$ и $EEDI_{Required}$ для двух судов-газовозов LPG для перевозки сжиженного аммиака одинаковой грузоподъемности, отличающихся наличием у одного из них ледового класса **Arc5**. Параметры судов представлены в табл. 1. В качестве прототипа неледового газовоза выступает судно Anafi (IMO 9411733), в качестве расчетного ледового судна — проектное судно, полученное в результате использования математической модели судов этого типа.

Таблица 1
Основные характеристики газовозов LPG для перевозки аммиака

Характеристика	LPG-30-Arc5	LPG-30
Ледовый класс	Arc5	нет
Грузовместимость (98 %), Q , m^3	34513	
Грузоподъемн. при летней осадке, M_{FB} , т	23517	
Экипаж, $n_{\text{эк}}$, чел	32	
Суммарная мощность ГД, кВт	22800	9981*
Длина наибольшая, L_{OA} , м	180,97	174
Длина между перпендикулярами, L_{BP} , м	172,10	165
Ширина, B , м	28	28
Осадка летн., $d_{\text{летн.}}$, м	11,00	10,419
Дедвейт летн., т	28311	26348
Водоизм летн., $\Delta_{\text{летн.}}$, т	42664	37124
Водоизмещение порожнем, $\Delta_{\text{топ.}}$, т	14352	10776
Скорость экспл., v_S , уз	16,5	16,5
Кол-во и тип пропульсивной установки	2 Azipod VI 2300	1 ВФШ
Мощность на валах на экспл., $P_{d\sigma}$, кВт	15740	9499
Мощность ЭУ суммарная, Ne , кВт	22800	12581
Валовая регистровая вместимость судна, GT	24764	22954
Чистая регистровая вместимость судна, NT	7686	6886

* — дефорсирован, паспортная мощность 11620 кВт при 127 об/мин.

Расчет значений $EEDI_{Required}$ и $EEDI_{Attained}$ произведем в соответствии с методиками из [7] и [8], при условии, что суда имеют одинаковую вместимость, скорость хода и ширину.

Результаты расчета $EEDI_{Attained}$ представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Расчет коэффициентов $EEDI_{Attained}$ для газовозов LPG

Таблица 2

S/N	Parameter	Formula or Source Unit	Unit	LPG-30-A5	LPG-30
1	MCR_{ME}	MCR rating of main engine	kW	22800	9981
2	$Capacity$	Deadweight of the ship at summer load draft DWT	tons	28311	26348
3	V_{ref}	Ships speed as defined in EEDI regulation	kn	16,5	16,5
4	MPP_{Motor}	Rated output of motor specified in the certified document	—	22800	11620
5	P_{ME}	$0,75 \times MPP_{Motor}$	kW	17100	8715
6	P_{AE}	$0,025 \times MCR_{ME} + 250$	kW	678	468
7	CF_{ME}	CF factor of Main engine using MDO	—	3,206	3,206
8	CF_{AE}	CF factor of Auxiliary engine using MDO	—	3,206	3,206
9	SFC_{ME}	Specific fuel consumption of at PME	g/kWh	165	165
10	SFC_{AE}	Specific fuel consumption of at PAE	g/kWh	210	210
11	f_j	Correction factors for power f_j for ice-classed ships	—	0,282	—
12	f_j, min		—	0,628	—
13	f_j	Correction factor for power f_j for ice-classed ships, $\max(f_j; f_j, \text{min})$	—	0,628	—
14	$f_i(\text{IA Super})$	Capacity correction factor for ice-strengthening of the hull	—	1,02	—
15	f_{iCb}	Capacity correction factor for improved ice-going capability	—	1,00	—
16	f_i	Capacity correction factor for ice-classed ships	—	1,02	—
17	f_m	Factor for ice-classed ships having IA Super and IA	—	1,05	—
18	$EEDI_{Attained}$	$(f_j \cdot (P_{ME} \cdot CF_{ME} \cdot SFC_{ME}) + (P_{AE} \cdot CF_{AE} \cdot SFC_{AE})) / (f_i \cdot V_{ref} \cdot Capacity \cdot f_m)$	gCO ₂ /tnm	12,23	—
19	$EEDI_{Attained}$	$((P_{ME} \cdot CF_{ME} \cdot SFC_{ME}) + (P_{AE} \cdot CF_{AE} \cdot SFC_{AE})) / (V_{ref} \cdot Capacity)$	gCO ₂ /tnm	—	11,33

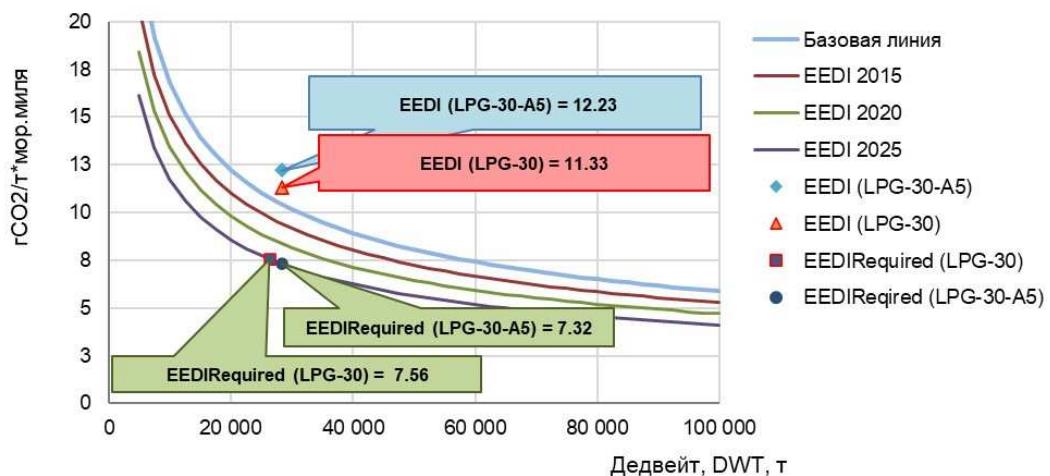


Рис. 1 Результаты расчетов коэффициентов $EEDI_{Attained}$ для газовозов LPG

Значение требуемого $EEDI_{Attained}$, определяется по формуле (2):

$$EEDI_{Attained} \leq EEDI_{Required} = (1 - X/100) \cdot \text{Reference line value}, \quad (2)$$

где X — редукционный коэффициент, определяемый согласно [8];
 $\text{Reference line value}$ — значение базовой линии.

Значение редукционного коэффициента X для судов-газовозов с дедвейтом более 15000 тонн построенных позже 1 апреля 2022 года равен 30, а значение базовой линии определяется по формуле 3 [8]:

$$\text{Reference line value} = a \cdot b^{-c}, \quad (3)$$

где коэффициенты:

- a — для судов-газовозов равен 1120;
- b — принимает значение дедвейта судна;
- c — равен 0,456.

Таким образом, значения $EEDI_{Required}$ для судов LPG-30 и LPG-30-Arc5 принимают значения 7,32 и 7,56 г СО₂/т-мор.милю соответственно, что существенно меньше полученных фактических значений $EEDI_{Attained}$. В основном этот факт связан с типом используемого топлива для ЭУ и значительной величиной отношения дедвейта к мощности энергетической установки, которое характерно для газовозов LPG в общем и судов с ледовыми усилениями в частности. Вопрос влияния типа топлива на величину выбросов парниковых газов в процессе совершения транспортной услуги водным транспортом заслуживает отдельного внимания и в данной статье не рассматривается.

В результате расчета индекса конструктивной энергоэффективности $EEDI_{Attained}$ его значение для конкретного расчетного судна с ледовыми усилениями выше на 7,9 % по сравнению с аналогичным параметром расчетного неледового судна и это несмотря на почти двукратную разницу в мощности на валах при одинаковой расчетной скорости этих судов.

Таким образом, представленная в [7] расчетная схема существенно занижает реальные значения выбросов с судов с классами ледовых усиленй в угоду сложившейся методологии при помощи введения коэффициентов f_j, f_i и f_m , что приводит к значительному уменьшению значения $EEDI_{Attained}$, в представленных расчетных случаях достигающему около 50 %. Такое искусственное снижение значения конструктивного коэффициента энергоэффективности $EEDI_{Attained}$ для судов с ледовыми усилениями вызвано одновременно несколькими причинами, которые можно условно разделить на организационные и технические. К числу организационных наравне с консервативным подходом к определению требуемого значения $EEDI_{Required}$ следует отнести косвенный учет опасностей, которые присущи навигации в ледовых условиях, через искусственную редукцию значения $EEDI_{Attained}$ при помощи коэффициента f_j . К числу технических причин следует отнести особенности судов с повышенным ледовым классом, для которых средняя потребляемая мощность на маршруте обычно значительно меньше, чем мощность на валах на скорости V_{ref} . Также к числу технических причин следует условно отнести тот факт, что величина $Capacity$ в знаменателе формулы (1) для большинства типов судов принимается равной дедвейту или его значительной части, а для судов с ледовыми классами отношение суммарной мощности энергетической установки к дедвейту составляет значительно большую величину, чем для неледовых.

Для судов с ледовыми классами ниже Arc5 величина $EEDI$ в большинстве случаев имеет заниженное значение, в то время как для судов с ледовыми классами выше Arc5 определяющие коэффициенты f_j не рассчитаны. Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующая методика определения $EEDI$ хорошо подходит для оценки углеродного следа транспортных услуг, оказываемых при помощи неледовых судов, в то время как для решения этой задачи с применением ледовых судов требуется создание отдельного нормативного обеспечения и подкрепляющего его методического аппарата.

Таким образом, важной целью исследования является выявление альтернативных способов оценки конструктивного коэффициента эффективности транспортных судов с категориями ледовых усиленй для дальнейшего его использования в целях корпоративного учета углеродных единиц, определения углеродного следа транспортной услуги, а также оценки влияния типа используемого судового топлива на результирующие значения определяемых величин.

УЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ

В исследовании [3] помимо прочего указано, что углеродный след отдельно взятой транспортной услуги с помощью коэффициента энергоэффективности следует представить в виде

$$CF_{TO} = \sum_{i=1}^b CF_i = \sum_{i=1}^b Capacity \cdot EKPI_i \cdot L_i, \quad (4)$$

где CF_{TO} — углеродный след на всем маршруте, тCO₂-экв.;

CF_i — углеродный след на участке маршрута i , тCO₂-экв.;

i — участок маршрута;

$Capacity$ — характеристика полезной грузоподъемности судна на рассматриваемом маршруте, принимаемая для навалочных судов, танкеров, газовозов, и всех видов сухогрузных судов, включая ро-ро, равной дедвейту (DWT), для пассажирских судов — равной валовой вместимости (GT), а для контейнеровозов как 70 % дедвейта;

$EKPI_i$ — коэффициент энергоэффективности судна на участке i , гCO₂/т-мор.миль;

L_i — длина участка маршрута i , мор. миль;

b — количество участков с различными навигационными условиями.

Таким образом, углеродный след для маршрутов, проходящих в условиях чистой воды, параметр b равен 1, а значение коэффициента энергоэффективности $EKPI$ имеет постоянное значение для всего маршрута. Углеродный след транспортной перевозки, выполняемой в условиях чистой воды, может быть определен в соответствии с формулой (6), где для судов, имеющих сертификат *IEE* коэффициент энергоэффективности $EKPI_i$ следует принять равным достигнутому конструктивному коэффициенту энергоэффективности *EEXI* судна. В том случае, если используемое судно не имеет сертификата *IEE*, но исходя из общих условий для него можно произвести расчет коэффициента энергоэффективности *EEDI_{Attained}* в соответствии с [7], а маршрут его следования проходит по чистой воде, следует принять $EKPI_i = EEDI_{Attained}$.

Углеродный след транспортной перевозки, выполняемой на маршруте с тяжелыми навигационными условиями, может быть определен в соответствии с формулой (6), где для неконвенциональных судов (судов класса А согласно Полярному кодексу и судов с дизель-электрической энергетической установкой, не являющихся газовозами СПГ) значение коэффициента энергоэффективности следует представить в следующем виде:

$$EKPI_i = \frac{(\sum_{j=1}^{n_{ME}} P_{ME} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(j)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{Capacity \cdot V_i} \quad (5)$$

где P_{ME} — мощность главных двигателей на скорости V_i , кВт;

n_{ME} — количество главных двигателей, ед.;

$C_{FME(j)}$ — переводной коэффициент количества израсходованного главными двигателями топлива в тCO₂ эквивалента;

$SFC_{ME(j)}$ — удельный расход топлива главными двигателями, г/кВт·ч;

P_{AE} — мощность вспомогательного дизель-генератора, кВт;

C_{FAE} — переводной коэффициент количества израсходованного вспомогательным дизель-генератором топлива в тCO₂ эквивалента;

SFC_{AE} — удельный расход топлива вспомогательного дизель-генератора, г/кВт·ч;

$Capacity$ — характеристика полезной грузоподъемности, принимаемая для навалочных судов, танкеров, газовозов, и всех видов сухогрузных судов, включая ро-ро, равной дедвейту, для пассажирских судов — равной валовой вместимости (GT), а для контейнеровозов как 70 % дедвейта;

V_i — средняя скорость судна на участке i , уз.

Таким образом, для выполнения прогнозирования количества выброшенных углеродных единиц, а также израсходованного топлива при совершении рейсов в любых навигационных условиях удобно пользоваться методиками, использующими коэффициенты энергетической эффективности судов. Однако, при этом следует методологически разделить подходы к их определению на:

- выполнение расчетов при помощи коэффициента конструктивной энергоэффективности, определяемого в соответствии со сложившейся зарубежной нормативной базой и не меняющегося при совершении рейса конвенциональным судном; и

- выполнение расчетов при помощи коэффициента энергоэффективности, определяемого в соответствии с формулой (7) и принимающего переменные значения на различных участках маршрута в зависимости от средней скорости движения на этом участке и соответствующей ей потребной мощности энергетической установки неконвенционального судна.

Обозначим различия между коэффициентом энергетической эффективности судна $EKPI$ в постановке данного исследования и конструктивным коэффициентом энергоэффективности судна $EEDI_{Attained}$. В постановке [3] различия выражаются как в намеренном исключении из формулы коэффициентов, не имеющих под

собой физическую природу (f_j , f_w и других), а также разделение маршрута следования на участки с различными навигационными условиями и с соответствующими значениями средних скоростей движения на этих участках, а также переменными значениями потребляемой мощности энергетической установки.

Таким образом, осуществлен переход от постоянного значения индекса конструктивной энергоэффективности, не меняющегося в течении периода эксплуатации судна к индексу энергоэффективности судна $EKPI$, отражающего колебания выбросов ПГ на сложном с навигационной точки зрения маршруте.

РАСЧЕТ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ПРИ ПОМОЩИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ В СЛОЖНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Используя оба методологических подхода, представленный в методике [7] и в исследовании [3], определим конструктивный коэффициент энергоэффективности $EEDI_{Attained}$ и коэффициент энергоэффективности $EKPI$ для газовоза LPG-30-A5, характеристики которого представлены в табл. 2, совершающего грузовой рейс в условиях СМП в восточном направлении от Обской губы в летне-осенний период при средних ледовых условиях.

Трасса плавания судов во льдах в восточном направлении, от Обской губы до кромки льда в Беринговом море, включает девять последовательных участков, которым присвоены соответственные числовые индексы i от 1 до 9:

1. Обская губа — Северная оконечность острова Белый;
2. Северная оконечность острова Белый — Меридиан острова Диксон;
3. Меридиан острова Диксон — Меридиан мыса Челюскин;
4. Меридиан мыса Челюскин — Меридиан островов Дунай;
5. Меридиан островов Дунай — Меридиан мыса Кигилях;
6. Меридиан мыса Кигилях — Меридиан устья реки Колыма;
7. Меридиан устья реки Колыма — 180-й меридиан;
8. 180-й меридиан — Восточная граница акватории СМП;
9. Восточная граница акватории СМП — Кромка льда в Беринговом море.

Определим значение углеродного следа для участка маршрута № 9 «Восточная граница акватории СМП — Кромка льда в Беринговом море», для которого в обозначенные месяцы характерным режимом плавания является плавание по чистой воде, при помощи коэффициента конструктивной энергоэффективности $EEDI_{Attained}$. Длина участка маршрута составляет 682 мили, характеристики $EEDI_{Attained}$ и $Capacity$ определены в табл. 2 и равны 12,23 гCO₂-экв/т·м и 28311 т соответственно. Таким образом, углеродный след на участке маршрута составит 236,1 тCO₂-экв.

Однако движение во льдах подразумевает частую смену режимов работы пропульсивного комплекса, а также целый ряд тактических мероприятий по преодолению ледовых условий СМП, что однозначно сказывается на потреблении топлива энергетической установкой, а также снижает среднюю скорость движения. Так как обе величины прямо учитываются в формуле (7), возможно оценить динамику выбросов в зависимости от времени года и навигационных условий на маршруте СМП для уже рассмотренного ранее судна LPG-30-A5.

Расчетные значения средних скоростей хода судна во льдах получены из сопоставления результатов оценки гидрометеорологических и ледовых условий на рассматриваемых участках и значений скоростей хода, определенных по требованиям к ледовой ходкости судна и к ледовой прочности его корпуса, и соответствующим минимальным из них [9]. В качестве средней скорости хода расчетного транспортного судна во льдах по требованиям к ледовой прочности принята допустимая скорость хода, т.е. максимальная скорость хода, с которой судно может двигаться в заданных ледовых условиях, не получая никаких ледовых повреждений.

При плавании судов во льдах коэффициент использования мощности, характеризующий степень утилизации номинального потенциала пропульсивного комплекса судна, принят постоянным и равным 0,85, за исключением случаев, когда скорость хода судна во льдах ограничивается в соответствии с требованиями к ледовой прочности или скоростью хода впереди идущего ледокола.

Результаты расчета углеродного следа судна-газовоза LPG-30-A5, совершающего грузовой переход по СМП от Обской губы в восточном направлении в летне-осенний период, представлены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты расчета углеродного следа судна-газовоза LPG-30-A5, совершающего грузовой переход по СМП
от Обской губы в восточном направлении в летне-осенний период

Месяц	Участок СМП, i	Протяженность, L_i , мор. миль	Режим плавания	V_i , уз.	$EKPI$, $\text{tCO}_2\text{-экв/т-м}$	CF_i , $\text{tCO}_2\text{-экв}$	$CF_{\text{то}}$, $\text{tCO}_2\text{-экв}$
VII	1	303	самостоятельно носом вперед	16,5	20,34	174,49	3170,14
	2	164	самостоятельно носом вперед	16,3	20,59	95,60	
	3	364	самостоятельно носом вперед	12,5	26,85	276,69	
	4	293	самостоятельно носом вперед	14,2	23,64	196,06	
	5	271	самостоятельно носом вперед	15,3	21,94	168,30	
	6	407	самостоятельно кормой вперед	5,0	67,12	773,45	
	7	377	самостоятельно кормой вперед	4,0	83,91	895,55	
	8	328	самостоятельно носом вперед	15,8	21,24	197,25	
	9	682	чистая вода	16,5	20,34	392,74	
VIII	1	303	чистая вода	16,5	20,34	174,49	1887,20
	2	164	самостоятельно носом вперед	16,5	20,34	94,44	
	3	364	самостоятельно носом вперед	16,5	20,34	209,62	
	4	293	самостоятельно носом вперед	16,3	20,59	170,80	
	5	271	самостоятельно носом вперед	16,4	20,46	157,01	
	6	407	самостоятельно носом вперед	16,4	20,46	235,81	
	7	377	самостоятельно носом вперед	13,6	24,68	263,40	
	8	328	самостоятельно носом вперед	16,5	20,34	188,89	
	9	682	чистая вода	16,5	20,34	392,74	
IX	1	303	чистая вода	16,5	20,34	174,49	1962,37
	2	164	самостоятельно носом вперед	16,5	20,34	94,44	
	3	364	самостоятельно носом вперед	14,9	22,53	232,13	
	4	293	самостоятельно носом вперед	16,2	20,72	171,85	
	5	271	самостоятельно носом вперед	15,5	21,65	166,13	
	6	407	самостоятельно носом вперед	16,5	20,34	234,38	
	7	377	самостоятельно носом вперед	11,7	28,69	306,17	
	8	328	самостоятельно носом вперед	16,4	20,46	190,04	
	9	682	чистая вода	16,5	20,34	392,74	
X	1	303	чистая вода	16,5	20,34	174,49	2391,16
	2	164	чистая вода	16,5	20,34	94,44	
	3	364	самостоятельно носом вперед	16,3	20,59	212,19	
	4	293	самостоятельно носом вперед	12,1	27,74	230,09	
	5	271	самостоятельно носом вперед	14,7	22,83	175,17	
	6	407	самостоятельно носом вперед	9,4	35,70	411,41	
	7	377	самостоятельно носом вперед	7	47,95	511,74	
	8	328	чистая вода	16,5	20,34	188,89	
	9	682	чистая вода	16,5	20,34	392,74	
XI	1	303	самостоятельно носом вперед	14,9	22,53	193,23	2889,44
	2	164	самостоятельно носом вперед	13,6	24,68	114,58	
	3	364	самостоятельно носом вперед	12,7	26,43	272,34	
	4	293	самостоятельно кормой вперед	7,8	43,03	356,93	
	5	271	самостоятельно носом вперед	11,4	29,44	225,88	
	6	407	самостоятельно кормой вперед	5,5	61,02	703,14	
	7	377	под проводкой	8,5	39,49	421,44	
	8	328	самостоятельно носом вперед	14,9	22,53	209,17	
	9	682	чистая вода	16,5	20,34	392,74	

Различные гидрометеорологические и ледовые условия, наблюдаемые на рассматриваемых участках СМП в летне-осенние месяцы оказывают значительное влияние на количество выброшенного в ходе рейса CO_2 эквивалента (см. рис. 2).

Помимо общей картины выбросов представляет интерес динамика выбросов парниковых газов в зависимости от тяжести условий на различных участках маршрутов для разных месяцев, что показано на графике на рис. 3.

На графике (см. рис. 3) видно, что результаты расчета выбросов хорошо корреспондируются с данными о тяжести навигации на участках «Меридиан мыса Кигилях — Меридиан устья реки Колыма» (№ 6) и «Меридиан устья реки Колыма — 180-й меридиан» (№ 7).

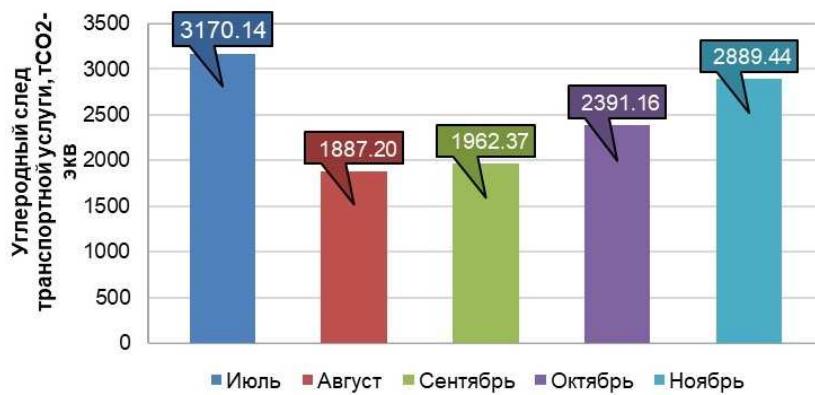


Рис. 2 Углеродный след $CF_{\text{то}}$, оставляемый газовозом LPG-30-Arc5 совершающим грузовые переходы по СМП от Обской губы в восточном направлении в июле, августе, сентябре, октябре и ноябре

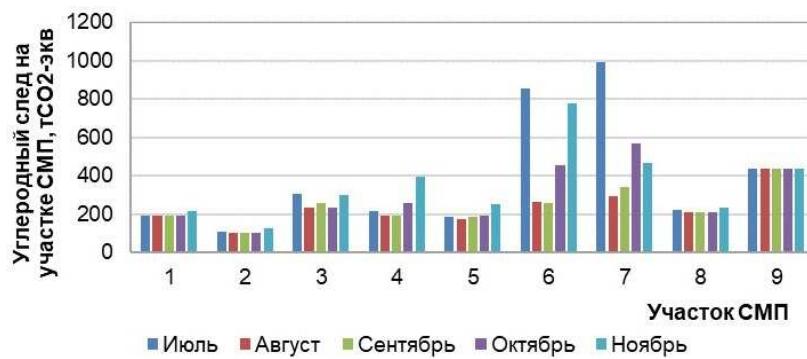


Рис. 3 Углеродный след на участках маршрута CF_i , оставляемый газовозом LPG-30-Arc5 совершающим грузовые переходы по СМП от Обской губы в восточном направлении в июле, августе, сентябре, октябре и ноябре

Оценка результатов расчета показывает, что величина углеродного следа, оставляемого судном судногазовоза LPG-30-A5, совершающего грузовой переход от Обской губы в восточном направлении в летне-осенний период для различных участков СМП значительно колеблется. На участке № 7 «Меридиан устья реки Колыма — 180-й меридиан» зафиксированы наибольшие колебания углеродного следа, наибольшее значение CF_7 составило 895,55 тCO₂-экв в июле, а наименьшее 263,4 тCO₂-экв в августе. Соответственно и углеродный след на маршруте в целом также претерпевал значительные изменения в зависимости от времени года и, соответственно, навигационных условий.

Сравним полученное ранее значение углеродного следа для участка маршрута № 9 «Восточная граница акватории СМП — Кромка льда в Беринговом море», полученное при помощи коэффициента конструктивной энергоэффективности $EEDI_{Attained}$, определенного по методике [7] со значением углеродного следа, полученным в табл. 3. В первом случае CF_9 составило 236,1 тCO₂-экв, а во втором — 392,74 тCO₂-экв, этот факт наглядно демонстрирует разницу в подходах между методиками, описанными в [7] и [3], хотя в основе их лежат одни принципы. Исключение нефизических «редукционных коэффициентов» f_j , f_w и других параметров из формулы $EEDI_{Attained}$, лежащей в основе коэффициента $EKPI$, а также введение в формулу $EKPI$ динамически меняющихся параметров скорости движения на участке маршрута и потребляемой мощности позволяет создавать более реалистичные прогнозы выбросов парниковых газов при выполнении транспортной услуги судами с ледовыми усилениями в условиях СМП.

ВЫВОДЫ

Использование коэффициентов энергоэффективности для определения углеродного следа от выполненной транспортной деятельности является теоретически и практически оправданным, когда речь идет о широком круге задач, в том числе и планировании транспортной компанией бюджета углеродных единиц. Использование судов с ледовым классом мало соответствует сложившейся в настоящий момент международной методологии, что делает имеющиеся международные механизмы определения конструктивного коэффициента энергоэффективности для таких судов неприменимыми в рамках задачи определения углеродного следа. Использование коэффициентов, описывающих влияние проектных характеристик судна — его типа, параметров энергетической установки и влияние на ее состав и мощность агрегатов категории ледовых усилий (f_j), снижения скорости в морских условиях (f_w), использования энергоэффективных технологий (f_{eff}) и некоторых других при определении *EEDI* — в конечном счете приводит к значительному снижению величины *EEDI* для судна с ледовыми усилениями, что не позволяет использовать эту величину при определении углеродного следа транспортной услуги, выполняемой судами с ледовыми усилениями на маршруте со сложными ледовыми условиями.

Этот факт не означает неправильности всей концепции, а лишь требует ее доработки, заключающейся во введении коэффициента *EKPI*, методология определения которого базируется на ранних версиях конструктивного коэффициента энергоэффективности и возпроизводит его физическую суть — отношение количества выброшенных парниковых газов к совершенной судном транспортной работе без учета большого количества «редукционных» коэффициентов в его составе.

Представленные в исследовании расчеты позволяют сделать еще один важный вывод — определение углеродного следа на маршруте при помощи конструктивного коэффициента энергоэффективности *EEDI_{Attained}* возможно только для неледовых судов для относительно легких с точки зрения навигации маршрутов, в то время как для судов с ледовыми усилениями, эксплуатирующихся в ледовых условиях, следует пользоваться величиной *EKPI*, учитывающей среди прочего среднюю скорость движения на маршрутах следования и загрузку энергетической установки.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Г.В., Колесник Д.В. Оценка энергоэффективности грузовых судов смешанного плавания // Автоматизация судовых технических средств: Научно-технический сборник. — Одесса: ОГМА, 2012. — Вып. 18 — с. 27—43.
2. Иванченко А.А., Петров А.П., Живлюк Г.Е., Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, Вып. 2, 2015.
3. Буянов А.С., Реуцкий А.С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна, Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, №№ 70/71, 2023.
4. Приложение VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененная Протоколом 1978 года к ней (MARPOL 73/78). ИМО, актуальная версия.
5. Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI. Resolution MEPC.203(62), Adopted an 15 July 2011, Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships.
6. Resolution MEPC.365(79) 2022 Guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI).
7. Resolution MEPC.364(79) 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships.
8. Resolution MEPC.328(76) 2021 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto.
9. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — 288 с.

REFERENCES

1. Egorov G.B, Kolesnik D.V. *Otsenka energoeffektivnosti gruzovykh sudov smeshannogo plavaniya* [Assessment of energy efficiency of river-sea navigation cargo ships] // Automation of ship technical means. Science and technical bulletin, Odessa, 2012, issue 18, pp. 27— 43.
2. Ivanchenko A.A., Petrov A.P., Zhivlyuk G.E. *Energeticheskaya effektivnost sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovykh gazov* [Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gases emissions]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, issue 2, 2015.
3. Buyanov A.S., Reutskiy A.S. *Formirovaniye metodologicheskogo podkhoda k protsessu opredeleniya uglerodnogo sleda transportnoy uslugi s ispolzovaniem koefitsientov energoeffektivnosti sudna* [Formation of a methodology for determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients] // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, Nos. 70/71, 2023.
4. Annex VI of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78), IMO, up-to-date version.
5. Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI. Resolution MEPC.203(62). Adopted on 15 July 2011, Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships.
6. Resolution MEPC.365(79) 2022 Guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI).
7. Resolution MEPC.364(79) 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships.
8. Resolution MEPC.328(76) 2021 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto.
9. Appolonov E.M. *Ledovaya prochnost sudov, prednaznchennykh dlya kruglogodichnoy arkticheskoy navigatsii* [Ice strength of ships intended for all-year-round Arctic service]. — St. Petersburg, St. Petersburg Marine Technical University, 2016. — 288 p.

УДК 620.98

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В СУДОВЫХ КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

А.А. Михеева, ФАУ «Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org
А.И. Бондаренко, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

В настоящее время уголь по-прежнему играет важную роль в мировой экономике. По оценкам запасов ископаемого угля в мире, его хватит на 200 — 250 лет при сохранении темпов его расхода. Его доля в мировом потреблении топливно-энергетических ресурсов составляет около 30 %, при этом до 40 % мировой электроэнергии производится на угольных электростанциях. Однако существует ряд экологических, экономических и технологических сложностей, связанных с использованием угля в энергетике. Решением проблем является совершенствование технологии добычи и процесса обогащения угля, а также разработка новых экологичных видов топлива на его основе. Одним из таких видов топлив является водоугольное топливо (ВУТ). В статье представлены результаты численного моделирования сжигания ВУТ в судовом водогрейном котле малой мощности. Модель была построена в программном комплексе ANSYS Fluent на базе разработанной математической модели процессов гидродинамики, тепломассообмена и кинетики термохимических преобразований топлива при горении ВУТ. Проанализированы различные варианты работы котла, позволяющие обеспечить режимы как твердого, так и жидкого шлакоудаления для обеспечения низких вредных выбросов в окружающую среду.

Ключевые слова: *водоугольное топливо, математическая модель, двухфазный поток, водогрейный котел, температурный режим, процесс воспламенения и горения водоугольного топлива, угольный кек, шламоудаление*

MATHEMATICAL MODELING OF COMBUSTION PROCESSES OF COAL-WATER FUEL IN LOW-POWER MARINE BOILERS

А.А. Mikheeva, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org
А.И. Bondarenko, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg

At present, coal still has an important role in the global economy. According to the current consumption rate and estimates of coal reserves in the world, its reserves will be used up in 200 — 250 years. Its share in the world consumption of fuel and energy resources is currently about 30 %, and up to 40 % of the world's electricity is produced by coal power plants. However, there is a number of environmental, economic and technological problems associated with the use of coal in the energy sector. Their solution is the improvement of the technology of coal mining and enrichment, as well as the development of new environmentally friendly fuels based on it. One of such fuel type is a coal-water one. The article presents the results of numerical simulation of the combustion of coal-water fuel in a ship's low-capacity hot water boiler. The model has been created in the ANSYS Fluent software package, based on the developed mathematical model of the processes of hydrodynamics, heat and mass transfer, as well as the kinetics of thermochemical fuel transformations during the combustion of coal-water fuel. Various options for the operation of the boiler have been analyzed, which make it possible to provide modes of both solid and liquid ash removal to ensure low harmful emissions into the environment.

Keywords: *water-coal fuel, mathematical model, two-phase flow, water-heating boiler, temperature regime, process of ignition and combustion of water-coal fuel, coal cake, sludge removal*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уголь играет важную роль в мировой экономике. Доля угля в мировом потреблении топливно-энергетических ресурсов составляет около 30 %, около 40 % мировой электроэнергии производится на угольных электростанциях [1]. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в последние годы спрос на уголь в энергетическом секторе падает [2]. Снижение интереса к углю обусловлено высокой экологической опасностью на всех этапах добычи, обогащения, транспортирования, хранения и сжигания. Дальнейшее развитие мировой энергетической экономики и, в первую очередь, энергетически развитых стран может сдерживаться не отсутствием первичных энергетических ресурсов, а негативным воздействием объектов топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

Таким образом, мировая энергетика сталкивается с противоречиями, вызванными экономическими и экологическими проблемами, связанными с использованием угля в энергетике. Наиболее перспективные решения которых, заключаются в совершенствовании технологий добычи, обогащения и потребления угля на основе инновационных ресурсно- и энергосберегающих технологий, в том числе, и технологий транспортирования и сжигания угля в виде водоугольной суспензии, или водоугольного топлива (ВУТ) [2, 3].

КАПЕЛЬНО-ФАКЕЛЬНОЕ СЖИГАНИЕ ВУТ В КОТЛАХ

Технология сжигания ВУТ является одной из наиболее экологически чистых, экономически эффективных и перспективных, благодаря более полному сгоранию углеродного топлива по сравнению с другими технологиями и снижению количества выброса вредных веществ. Такая технология позволяет создавать композиционные водо-торфяно-угольные, водо-мазутно-угольные и другие топливные составы, используя низкосортные и тощие угли, и отходы углеобогащения [2, 3].

Капельно-факельное сжигание в настоящее время является основным способом сжигания ВУТ. На рис. 1 показана принципиальная схема котлоагрегата сжигания ВУТ. Водоугольное топливо доставляется в котельную в готовом виде. ВУТ подается на сжигание насосами из резервуаров-накопителей. Камера печи предварительно нагревается за счет сжигания мазута [4]. При достижении заданной температуры в пневматическую форсунку подается ВУТ. Форсунка сконструирована таким образом, что при распылении получаются мелкие частицы размером 50 — 80 мкм, обеспечивающие быстрое испарение влаги. Температура камеры при сжигании ВУТ достигает 950 — 1450 °С. За счет относительно низкой температуры горения и избытка воздуха в камере снижается образование соединений NO_x .

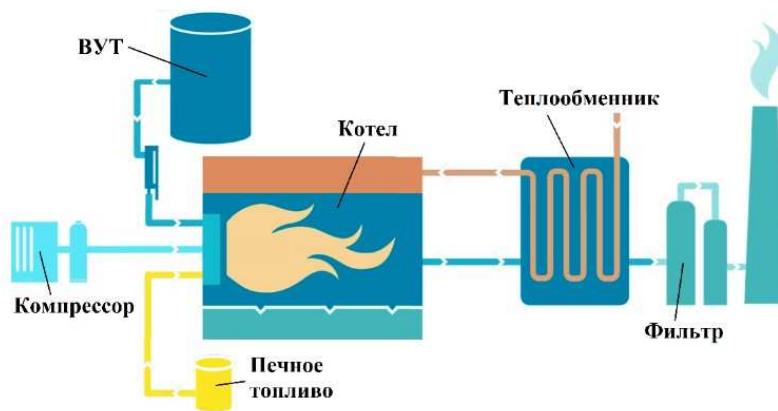


Рис. 1 Типовая схема устройства котельной по сжиганию ВУТ

Горение капель распыленного ВУТ в основном является многоступенчатым и в целом схоже с аналогичными процессами, связанными с обычным жидким топливом, а также пылевидным углем. В период повышенного интереса к водоугольному топливу было проведено большое количество исследований с целью создания экологически чистых технологий для сжигания ВУТ. Также в ходе исследований были выделены основные стадии процессов зажигания и горения ВУТ [5 — 8]: нагрев капли ВУТ, испарение воды,

содержащейся внутри капли, освобождение и горение летучих веществ, содержащихся в угле, и выгорание угля. Подход к моделированию горения капель ВУТ основан на том, что нужно учитывать все стадии сжигания ВУТ.

ВУТ является дискретным набором капель, которые подаются в топочную камеру, где происходит их нагрев. Капли состоят из двух компонентов: угля и воды. На первом этапе происходит испарение внешней влаги, следовательно, происходит изменение массы капли, которая описывается преобразованным уравнением (1) [9]

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p [\rho_C D_0 (T/273)^\alpha (2 + 0,6 Re^{0,5} Sc_m^{0,333}) \cdot \ln(1 + B_M)] \quad (1)$$

где $B_M = \frac{(p_s(T_D)\mu_V)/(p_s(T_D)\mu_V + (p - p_s(T_D))\mu_{dry}) - f_V}{1 - (p_s(T_D)\mu_V)/(p_s(T_D)\mu_V + (p - p_s(T_D))\mu_{dry})}$ — коэффициент Сполдинга для массоотдачи;

f_V — массовая доля пара в среде;

T_D — температура капли;

$p_s(T_D) = p_a \exp((L_V \mu_V)/R(1/T_b - 1/c))$ — давление насыщенного пара;

μ_V — молярная масса вещества;

L_V — теплота парообразования;

T_b — температура кипения жидкостей;

D_0 — коэффициент диффузии реактивного газа при нормальных условиях.

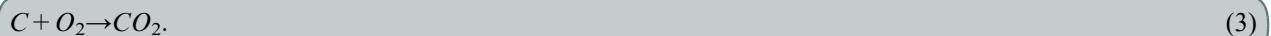
После испарения влаги, происходит выгорание испаряющихся с поверхности углеводородов и горение твердого угля.

При рассмотрении двухстадийного механизма (см. формулу (2)), на основе модели Кобаяси [10], предполагается наличие двух разных по степени связанности с органической массой компонент летучих веществ, характеризующихся разными кинетическими параметрами:

$$\frac{m_p(t)}{(1 - f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2) \exp(-\int_0^t (k_1 + k_2) dt) dt, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты, определяющие долю «низкотемпературных» и «высокотемпературных» летучих веществ.

Горение твердого остатка описывается химической реакцией окисления углерода угля с кислородом с последующим получением диоксида углерода (3)



Скорость горения твердого остатка рассчитывается согласно положениям классической диффузионно-кинетической теории по формуле (4):

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho_p R T_g Y}{M} \cdot \frac{\left(\frac{(D_0 [(T_p - T_g)/22])^{0,75}}{d_p} \right) \cdot (k_{b0} T_e^{(E_b/RT_p)})}{\left(\frac{(D_0 [(T_p - T_g)/22])^{0,75}}{d_p} \right) \cdot (k_{b0} T_e^{(E_b/RT_p)})} \quad (4)$$

где Y — массовая доля окислителя;

M — молярная масса окислителя;

k_{b0} — предэкспоненциальный множитель для реакции выжигания углерода;

E_b — энергия активации реакции выжигания углерода [9].

На основе представления Г.Н. Делягиным Г.Н. [11] теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха и математического описания этапов сжигания ВУТ предлагается вариант численного моделирования сжигания ВУТ в водогрейном котле малой мощности на программном комплексе ANSYS Fluent [12].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ВУТ КОТЛЕ

Условия проведения эксперимента приведены в [13]. Вода подогревается в котле (см. рис. 2) с восходящим каналом конвективной части. Для обеспечения высокой эффективности проектным решением котла предусматривается наличие воздухоподогревателя и системы удаления жидкого шлака. Топливо в топку подается пневматической форсункой [13] (поз. 2 на рис. 2), экономной и надежной в эксплуатации. Котел имеет неэкранированную топку с футеровкой из последовательных слоев огнеупорного материала, теплоизоляции и покрытия. В топке предусмотрено два окна для вдувания тягового воздуха (поз. 3 на рис. 2), что обеспечивает вихревое движение горюче-окислительной смеси и интенсификацию тепломассообменных процессов горения. Форсунка для распыления ВУТ располагается на передней стенке топки и направлена к воздуховодам в задней и правой стенках топки. При работе форсунки воспламеняющиеся частицы водоугольного топлива смешиваются с воздухом, выходящим из воздуховода в правой боковой стенке печи, и двигаются к воздуховоду на задней стенке, где их подхватывает другой поток воздуха. Это приводит к образованию вихревого движения газа с каплями топлива в топке, что позволяет частицам топлива оставаться в зоне активного горения в течение достаточно длительного времени. Отсутствие поверхностей нагрева в топочной части котла способствует адиабатичности процесса горения и достижению температуры топки выше 1300 °С в расчетных режимах работы котла. Газы из циклонной топки удаляются через окно в нижней части боковой стены топки (поз. 4 на рис. 2) и затем отдают свою тепловую энергию теплоносителю в конвективной части котла.

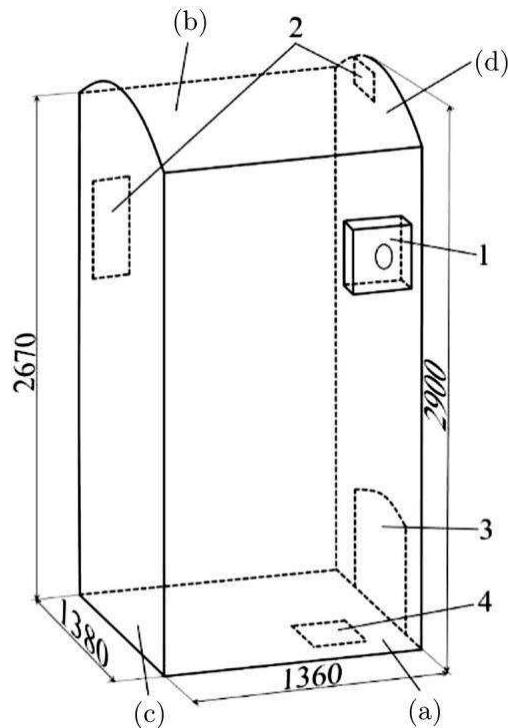


Рис. 2 Схема топки котла (размеры в мм):
 (a) — передняя стенка топки; (b) — задняя стенка топки; (c) и (d) — боковые стенки топки;
 1 — патрубок; 2 — окна для подачи воздуха; 3 — канал для забора воздуха от дутьевого вентилятора;
 4 — канал для выхода дымового газа из топки котла в конвективную часть котла

Для расчета сгорания водоугольного топлива были использованы экспериментальные данные [14]. В качестве топлива использовался угольный кек из Кузбасского угольного бассейна, основные показатели качества которого с содержанием органической части представлены в табл. 1.

Таблица 1
Основные показатели качества кека с содержанием органической части

Основные показатели качества топлива					
Топливо	W^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	Q_{sv}^a , ккал/кг	Q^r , ккал/кг
Кек «К1»	50,86	22,41	28,86	6439	2778
Кек «К2»	50,06	21,50	28,76	6570	2804
Состав органической части					
Топливо	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	
Кек «К1»	83,62	4,397	0,01	0,522	
Кек «К2»	82,80	4,289	0,01	0,493	

Воздух направлялся в печь через два дутьевых окна с одинаковой скоростью потока. Температура тягового воздуха составляла 270 °С. Были исследованы два варианта работы котла: сухое шлакоудаление и жидкое шлакоудаление. Параметры и режимы работы котла приведены в табл. 2 [14].

Таблица 2
Характеристики расхода топлива и окислителя

Технологические параметры процесса	Удаление сухого шлака	Удаление жидкого шлака
Расход топлива, кг/с (кг/ч)	0,097 (349,2)	0,12 (432)
Коэффициент избытка окислителя, α	1,7	1,25
Поток воздуха через сопло, кг/с (н.с.)	0,045	0,045
Общее количество воздуха в потоке, кг/с (н.дс)	0,369	0,345
Состав топлива	Кек «К1»	Кек «К2»

Для определения режима шлакоудаления в котле по результатам химического анализа зольного остатка в [15] был рассчитан коэффициент плавления золы. Угольный кек, применяемый в составе ВУТ имеет коэффициент плавления $K_{pl}=5,9$. В этом случае температура плавления минеральной части ВУТ имеет значения до 1350 °С [16]. Следовательно, режим жидкотяжелого удаления возможен только при температурах выше этих значений.

ВЫВОДЫ

На рис. 3 представлены температурные поля в центральном сечении камеры сгорания в различных режимах работы котла на водоугольном топливе. Видно, что в режиме сухого шлакоудаления температура не превышает 1200 °С практически на всем протяжении горения.

На рис. 4 показан вектор скорости топлива в различных сечениях камеры сгорания для двух вариантов работы котла. Образование вертикального циркуляционного движения горючих газов в верхней части камеры. Благодаря такой структуре потока обеспечивается стабильное воспламенение и горение органической массы ВУТ, увеличивается время пребывания частиц угля в объеме камеры сгорания, что обеспечивает их более полное сгорание. Эта схема соответствует исследуемым режимам горения в водогрейном котле.

При использовании ВУТ в исследуемом котле выбросы оксидов азота в 5 — 6 раз меньше по сравнению с энергетическими котлами, работающими на пылеугольном топливе с жидким шлакоудалением.

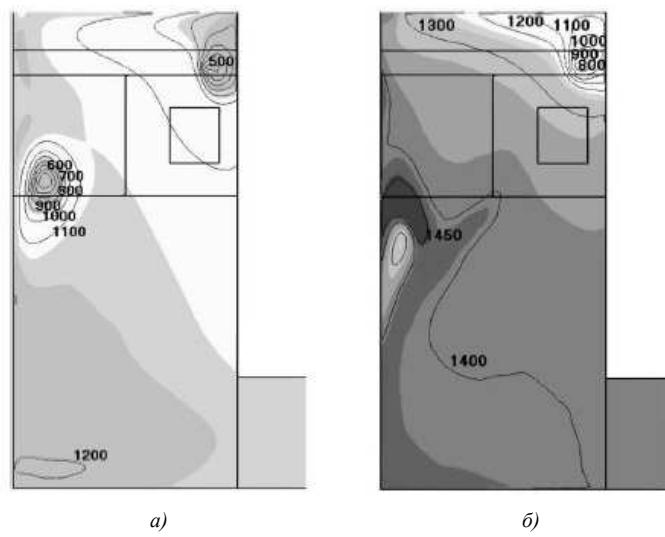


Рис. 3 Поле распределения температуры в центральном сечении камеры сгорания:
 а) — режим сухого шлакоудаления, б) — режим жидкого шлакоудаления

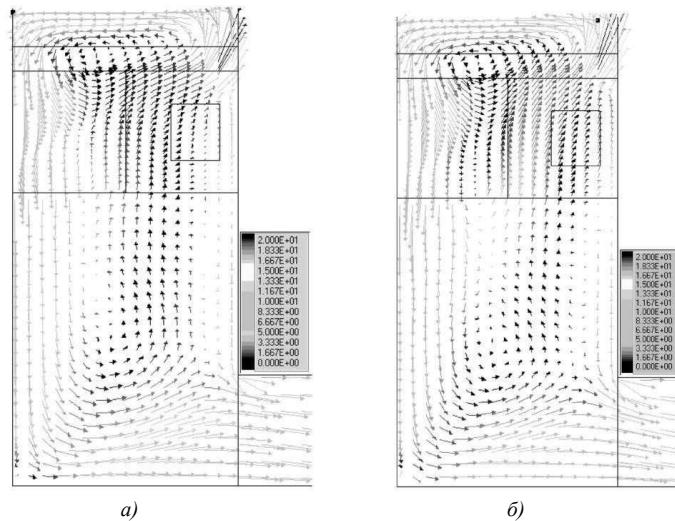


Рис. 4 Вектор скорости потока в центральном сечении камеры сгорания:
 а) — режим сухого шлакоудаления; б) — режим жидкого шлакоудаления

По результатам проведенного исследования выявлено, что сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных из [14] показал, что модель достоверно описывает процесс горения ВУТ в топочной камере. Расчетная модель в ANSYS Fluent позволяет получить корректную и подробную информацию об аэродинамике и теплообмене в топке котла водоугольного топлива. Результаты работы показали, что технология сжигания ВУТ позволяет рационально использовать угольный кек от обогатительного предприятия в качестве топлива, а схема подачи топлива обеспечивает необходимые условия для сжигания топлива с точки зрения надежности, стабильности, экономичности и экологической безопасности.

Полученная модель в дальнейшем будет использована, для расчета эффективности водоугольного топлива с присадкой изопропилового спирта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. 2007, № 1, с. 35 — 45.
2. Тугов А.Н., Майданик М.Н. Угольная электрогенерация в России: Состояние и перспективы // Материалы II Международной научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» Москва ОАО «ВТИ» 26 — 27 октября 2017 г, с. 31 — 41.
3. Нифонтов Ю.А. Механизм структурообразования при брикетировании влажной угольной мелочи с активным связующим // Обогащение руд. № 6, 2020, с. 41 — 46. DOI:10.17580/or.2020.06.07.
4. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. — М.: «Наука» — 1967, — с. 45 — 55.
5. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива // Горение и плазмохимия: — ч. 1, 2007, вып. 3, с. 178 — 188; — ч. II, 2007, вып. 3, с. 187 — 197; — ч. III, 2008, вып. 1, с. 56 — 59; — ч. IV, 2008, вып. 4, с. 178 — 187.
6. Huang Z. et all. Theoretical analysis of CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. — USA, Orlando. Part 1. — 1986, — pp. 343 — 358.
7. Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition of coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. 1986, — pp. 388 — 407.
8. Liu G.E. and Law C.K. Combustion of coal-water slurry droplets, Fuel 65,171 (1986).
9. Brown B.W. Measurement and prediction of entrained-flow gasification processes / Brown B.W., Smoot L.D., Smith P.J., Hedman P.O.// AICHE J — 1988, — pp. 34:435 — 46.
10. Kobayashi H., Howard J.B., Sarofim A.F. Proc. Combust. Inst. 1977, 16, pp. 411 — 425.
11. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. — М.: «Наука». — 1967, — с. 45 — 55.
12. ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory.
13. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы: Учебное пособие. Красноярск: КГТУ, 2005, 292 с.
14. ИТС НДТ КТЭУ, Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии, информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям, Москва, Бюро НДТ, 2016 — 2017.
15. Алексеенко С.В. и др. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. — 2017. — Т. 328. № 12. — с. 16 — 28.
16. Козлов В. А. Влияние химического состава золы углей на технологические свойства кокса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — №. 55, — с. 231 — 237.

REFERENCES

1. Khodakov G.S. *Vodougolnye suspenzii v energetike* [Water-coal suspensions in the energy sector]. Thermal power engineering. 2007, No. 1, pp. 35 — 45
2. Tugov A.N., Maidanik M.N. *Ugolnaya elektrogeneratsiya v Rossii: Sostoyanie i perspektivy* [Coal-fired power generation in Russia: Status and prospects] // Proceedings of the II specialized scientific and technical conference "Prospects for the development of new technologies in the energy sector of Russia" Moscow JSC "VTI" October 26 — 27, 2017, pp. 31 — 41.
3. Nifontov Yu.A. *Mekhanizm strukturoobrazovaniya pri briketirovaniyu vlazhnoy ugolnoy melochi s aktivnym svyazuyushchim* [The structure formation mechanism in wet coal fines briquetting with an active binder] // OBOGASHCHENIE RUD, 2020, No. 6, pp. 41 — 46. DOI:10.17580/or.2020.06.07.
4. Delyagin G.N. *Voprosy teorii goreniya vodougolnoy suspenzii v potoke vozdukha* [Issues of the theory of combustion of a water-coal suspension in an air stream]// Combustion of high-water-cut fuel in the form of water-coal suspensions. — M.: Science, — 1967, — pp. 45 — 55.
5. Salomatov V.V., Kravchenko I.V. *Teoreticheskoe issledovanie goreniya kapli vodougolnogo topliva* [Theoretical study of the combustion of water-coal fuel droplets] // Combustion and Plasma Chemistry: — Part I Ch. 1, 2007, No. 3, p. 178 — 188; Part II, 2007, No. 3, p. 187 — 197; Part III, 2008, No. 1, pp. 56 — 59; Part IV, 2008, No. 4, pp. 178 — 187.
6. Huang Z. et al. Theoretical analysis of the combustion history of UVT droplets. Tr. 8th Intern. Symp. Preparation and use of coal slurry fuels. USA, Orlando. Part 1. — 1986. — pp. 343 — 358.
7. Matthews K.J., Jones A.R. Influence of the composition of coal on the combustion of coal-water sludge and the characteristics of ash deposition. 8th Intern. Symp. Preparation and use of coal slurry fuels. USA, Orlando. Part 1. 1986, — pp. 388 — 407.
8. Liu G.E. and Lo S.K. Combustion of droplets of coal-water slurry, Fuel 65,171 (1986).
9. Brown B.V. Measurement and prediction of entrainment gasification processes / Brown B.V., Smoot L.D., Smith P.J., Hedman P.O. // Ayshe J. — 1988. — pp. 34: 435 — 46.
10. Kobayashi H., Howard J.B., Sarofim A.F. Proc. Burned out. Inst. 1977, 16, pp. 411 — 425.
11. Delyagin G.N. Questions of the theory of combustion of a water-coal suspension in an air stream // Combustion of high-water-cut fuel in the form of water-coal suspensions. — M.: Science — 1967. — pp. 45 — 55.
12. ANSYS CFX-Solver, version 10.0: theory.
13. Boyko E.A. Boiler plants and steam generators: Textbook. Krasnoyarsk: KSTU, 2005. 292 p.
14. ETS BAT KTEU, Combustion of fuel at large installations in applications energy production, information and technical guide to adaptation of medium technologies, Moscow, Bureau of NDT, 2016-2017.
15. Alekseenko S.V. et al. Results of experimental and operational calculation of water-coal fuel in a low-power hot-water boiler. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. — 2017. — V. 328. No. 12. — pp. 16 — 28.
16. Kozlov V.A. Influence of the chemical composition of coal ash on the technological properties of coke / V.A. Kozlov // Mining Information and Analytical Bulletin. — 2012. — No. 55. — pp. 231 — 237.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.12

ПРОЕКТ ЛОКАЛЬНОЙ ВНЕШНЕЙ КОНСТРУКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ДНИЩА СУДНА ОТ ГРУНТА

В.А. Кулеш, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, (ДВФУ), Владивосток, e-mail: vkulesh@mail.ru

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт Петербург, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

О.Э. Суров, канд. тех. наук, профессор, ДВФУ, Владивосток, e-mail: surov.oye@dvgfu.ru

Фам Чунг Хиеп, ДВФУ, Владивосток, e-mail: phiepast07@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы проектирования внешней конструктивной защиты от грунта на примере несамоходной наливной баржи. Показана актуальность конструктивной защиты корпусов в условиях контактов с грунтом. Обобщен опыт и повреждения судов при взаимодействии с грунтом. Разработаны схемы локальной внешней конструктивной защиты. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций методом конечных элементов при двух расчетных сценариях. Реализация предложенной схемы защиты позволяет снизить уровень повреждаемости корпуса и повысить его долговечность в эксплуатации.

Ключевые слова: баржа, посадка на грунт, внешняя конструктивная защита, прочность, надежность

DESIGN OF LOCAL EXTERNAL STRUCTURAL PROTECTION FROM GROUND FOR VESSEL'S BOTTOM

V.A. Kulesh, DSc, professor, Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, e-mail: vkulesh@mail.ru

M.A. Kuteynikov, DSc, Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

O.E. Surov, PhD, professor, FEFU, Vladivostok, e-mail: surov.oye@dvgfu.ru

Pham Trung Hiep, postgraduate student, FEFU, Vladivostok, e-mail: phiepast07@gmail.com

The article discusses the issues of the design of external structural protection (ESP) from the ground on the example of a non-self-propelled tanker barge. The relevance of constructive protection of hulls under conditions of contact with the ground was shown. The experience and damage of ships during interacting with the ground were generalized. Schemes of local ESP have been developed. Study of the stress-strain state of structures by the finite element method for two design scenarios was performed. The implementation of the proposed protection scheme makes it possible to reduce the level of hull damage and to increase its durability in operation.

Keywords: barge, landing on the ground, external structural protection, strength, reliability

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть прибрежных населенных пунктов Дальневосточного и Северного морских бассейнов России не имеет стационарных причальных сооружений или имеют пристани для малых судов [1]. В настоящее время наметился рост тенденции применения в необорудованных причалами портопунктах, где имеют место значительные перепады уровня моря, обусловленные приливами и отливами, так называемой «сухой разгрузки». Суть этого способа проведения грузовых операций состоит в том, что предназначеннное к погрузке или разгрузке судно во время прилива ставится на якорь над ровным участком дна, которое оголяется во время отлива.

Одной из основных технических проблем операции является обеспечение прочности днища судна при посадке на грунт. Морское дно не бывает идеально ровным, а его грунт состоит из фракций разного размера и может включать более или менее крупные камни. Посадка судна с относительно тонкой обшивкой днища и балками набора небольшого сечения приводит к возникновению на выпуклостях дна больших локальных усилий, которые неизбежно ведут к деформациям и даже возможному разрыву обшивки и набора. При последующих циклах систематических посадок на грунт деформации могут появляться в новых местах, повреждения днища накапливаются, прогибы могут прогрессировать и днищевое перекрытие выходит из строя или требует замен. Особую роль в повреждениях днища играют прибрежные волны и качка судов.

Для снижения таких повреждений и их последствий необходимо усиливать наружную обшивку и внутренние конструкции и/или применять конструктивную защиту днища, в том числе размещенную с внешней стороны корпуса [13].

1. ОПЫТ И ПОВРЕЖДЕНИЯ СУДОВ

Российские гражданские суда для снабжения отдаленных населенных пунктов Дальнего Востока и северных прибрежных районов использовались еще в СССР, и многие из них работают по настоящее время [4]. В их числе можно отметить многочисленные серии самоходных барж типа «Север», «Восток» и «Славянка» (проекты ДНИИМФ), самоходные рейдовые плашкоуты проекта 698, суда проекта 16900 типа «Николай Пермитин» (ЦНИИМФ) и другие [2]. Более современными являются суда проекта 271 (ВладСудоПроект) и проектов DCV (Морское инженерное бюро) [3]. Во всех перечисленных проектах внешняя конструктивная защита (ВКЗ) днища отсутствовала.



Рис. 1 Баржа на грунте (а) [9] и повреждения в носовом районе (б)

Несамоходная наливная баржа проекта 1632 имеет водоизмещение 761 т и размеры: длина расчетная — 47,5 м, ширина — 8,7 м, высота борта — 2,8 м, осадка — 2 м. Судно было построено в 1979 году и предназначено для доставки нефтепродуктов на необорудованный берег с возможностью осушения и проведения грузовых операций на заранее подготовленных участках, что оговорено в проектной документации [7]. В процессе эксплуатации судно осушалось в разных положениях к берегу — носом, лагом, под углом и кормой

(см. рис. 1а) и систематически получало повреждения. В результате баллер, перо руля и пятка ахтерштевня были повреждены и демонтированы. По сведениям судовладельца их восстановление не планируется ввиду значительного возраста (более 43 года) баржи и опыта последних лет эксплуатации с буксировками без руля. При дефектации 2023 года были зафиксированы бухтины и вмятины со стрелками прогибов до 35 — 43 мм в районе перехода киля в форштевень (2 — 6 шп., рис. 1б), а также в разных районах скулы по левому и правому бортам. Все эти повреждения были назначены на ремонт.

Другой пример аналогичной работы — лихтер проекта 1635К. Это несамоходное однотрюмное судно водоизмещением 1300 т было предназначено для подъема (спуска) и закрепления на палубах лихтеровоза типа «Юлиус Фучик». Обобщение повреждений и ремонтов корпуса лихтера, который использовался и для грузовых операций на необорудованный берег, показаны на рис. 2а. Здесь видны характерные деформации бортов из-за швартовок на волнении (зеленый цвет), а также последствия многих воздействий грунта на скулы и днище. Видно, что в этих районах есть многочисленные перекрои обшивки (синий цвет) — результаты прошлых ремонтов. Здесь же указаны места новых повреждений и стрелки прогибов [5].

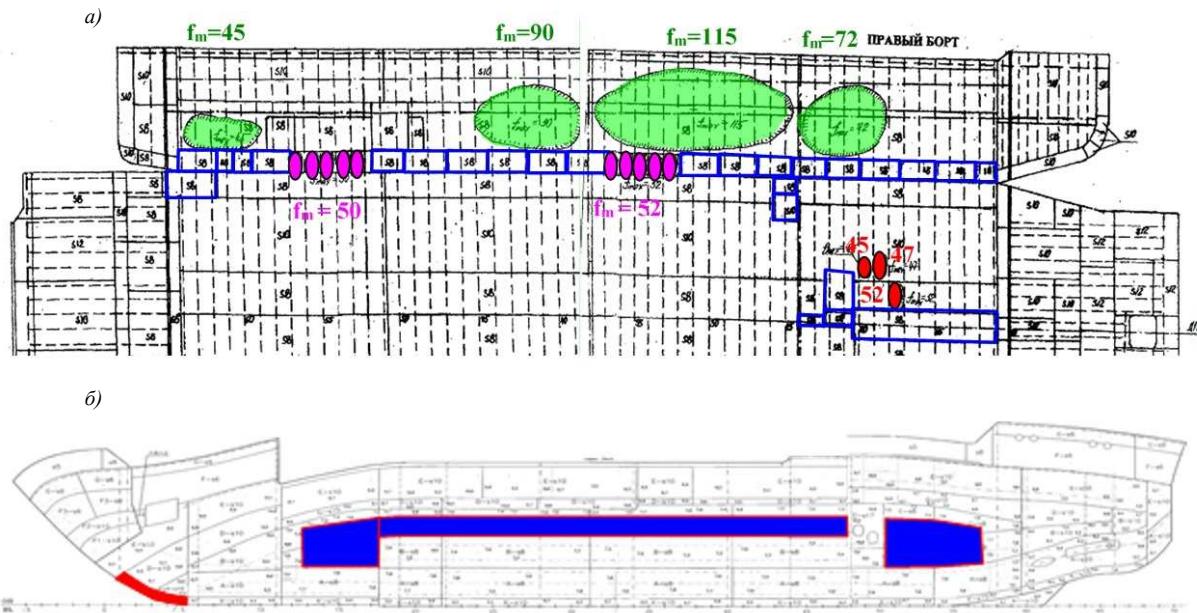


Рис. 2 Растворы судов с выделенными районами повреждений и замен
а) лихтер проекта 1635К; б) т/х «Провидения»

На рис. 2б также представлен другой случай ремонта (замен обшивки) специализированного судна «Провидения», которое имеет водоизмещение 748 т и систематически используется для проведения грузовых операций на необорудованный берег. Здесь видно, что основная доля замен также приходится на скуловые районы. Все эти замены были произведены из-за деформаций, т.к. износы листов обшивки не превышали допусков Регистра [12].

Приведенные примеры с повреждениями от грунта преимущественно скуловых районов судов показывают их повышенную уязвимость. Причиной полагается порывистая бортовая качка в условиях, когда нос судна уже вошел в контакт с грунтом, а процесс осушения продолжается при наличии волн, движущихся не перпендикулярно к берегу или не вдоль диаметральной плоскости (ДП) судна.

2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

Внешняя конструктивная защита днища специализированных судов от грунта важна, но применяется пока крайне редко, а ее проектирование еще не обеспечено методически. Конструктивные решения по внешней защите днища судов от грунта (кроме брусковых киелей на сравнительно малых судах) также немногочисленны.

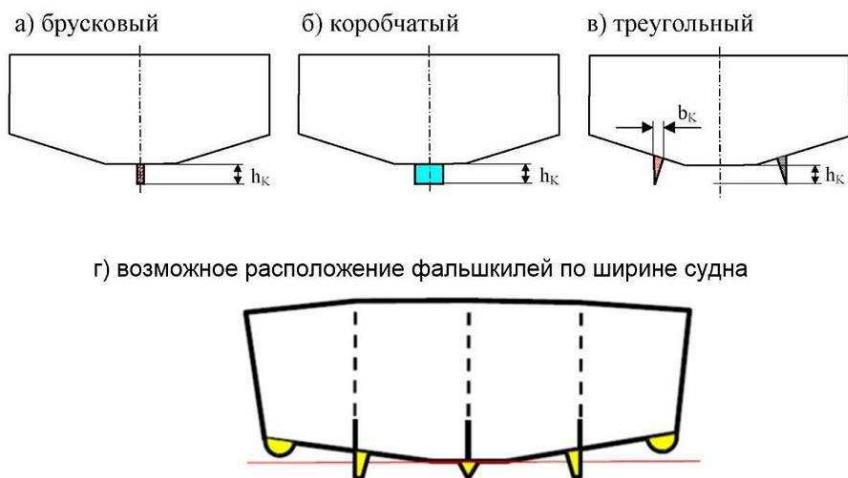


Рис. 3 Рекомендации Правил Регистра по формам и места размещения фальшкileй

Правила Российского морского регистра судоходства (РС) включают разд. 15 части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» «Требования к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт (суда NAABSA)», где регламентируются расчетные нагрузки на элементы днищевых конструкций и их размеры [10]. При этом оговорена возможность применения внешней конструктивной защиты в виде фальшкileй (см. рис. 3). Регламентация формы и размеров фальшкileй в вышеупомянутом разделе Правил РС отсутствует, но даны рекомендации:

- при установке фальшкileй они должны располагаться в плоскости продольных переборок или днищевых стрингеров;
- крепление фальшкileй к наружной обшивке следует осуществлять через промежуточный элемент – накладную полосу, привариваемую по периметру к обшивке сплошным угловым швом;
- соединение фальшкileй с промежуточным элементом должно соответствовать требованиям пункта 2.2.5.3 части II «Корпус» [11];
- фальшкileи должны оканчиваться на подкрепленных участках обшивки при плавном уменьшении их высоты и ширины у концов.

На рис. 4. показан пример конструктивного решения по проекту ВКЗ, разработанному Дальневосточным научно-исследовательским институтом морского флота, для баржи в 1990 году. Проект был принят к сведению Регистром СССР письмом № 170-64-374 от 08.02.1990 со статусом «опытный» [7]. Проект включал 5 коробчатых фальшкileй в районе 7 — 68 шп. Поперечные сечения фальшкileй трапециевидные и в общем случае включают горизонтальную опорную полосу, одну вертикальную и две наклонные полосы. Поперечные бракеты внутри ВКЗ установлены практически на каждом шпангоуте. Данное решение явно не ограничивало бортовую качку судна, его основная идея — сместить контактные усилия с основного корпуса на ВКЗ. Проект увеличивал осадку судна на 0,5 м (на 25 %), а требуемые затраты по весу металла составили более 31 т (13 % от веса порожнем). Данный проект не был реализован.

3. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И ПРОЕКТА

Анализ опыта эксплуатации показал, что повреждения судов при осушениях на грунте с качкой наиболее характерны в скуловых районах. Для уменьшения кинематики и динамики качки ее важно ограничить. В роли ограничителей колебаний судна можно применить локальную ВКЗ.

В работах [8, 13] рассмотрены конструктивные схемы защиты в виде фальшкileй разных форм поперечных сечений. Показано, что трапециевидная форма со свесами у опорной полосы является наиболее эффективной. С учетом этого, для баржи были предложены схемы локальной ВКЗ в носовом скуловом районе на 10 — 16 шп. (см. рис. 5a) и в кормовом скуловом районе на 64 — 68 шп. (см. рис. 5b) симметрично по обоим бортам.

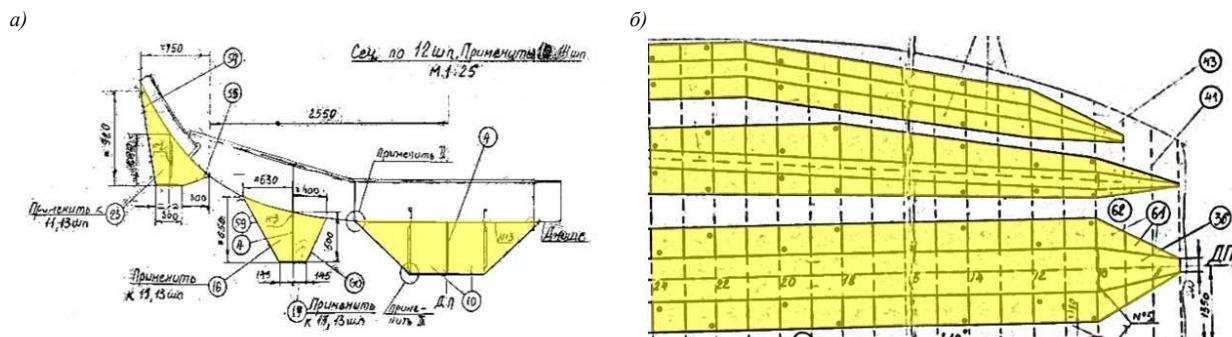
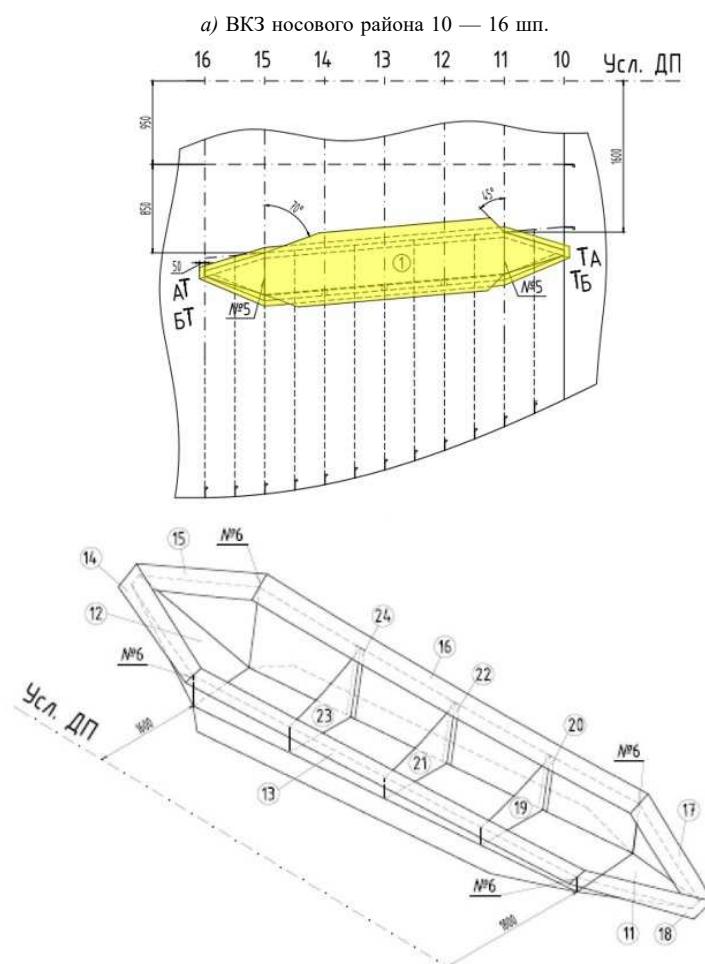


Рис. 4 Фрагменты из проекта ДНИИМФ:
а) — поперечное сечение; б) — вид снизу



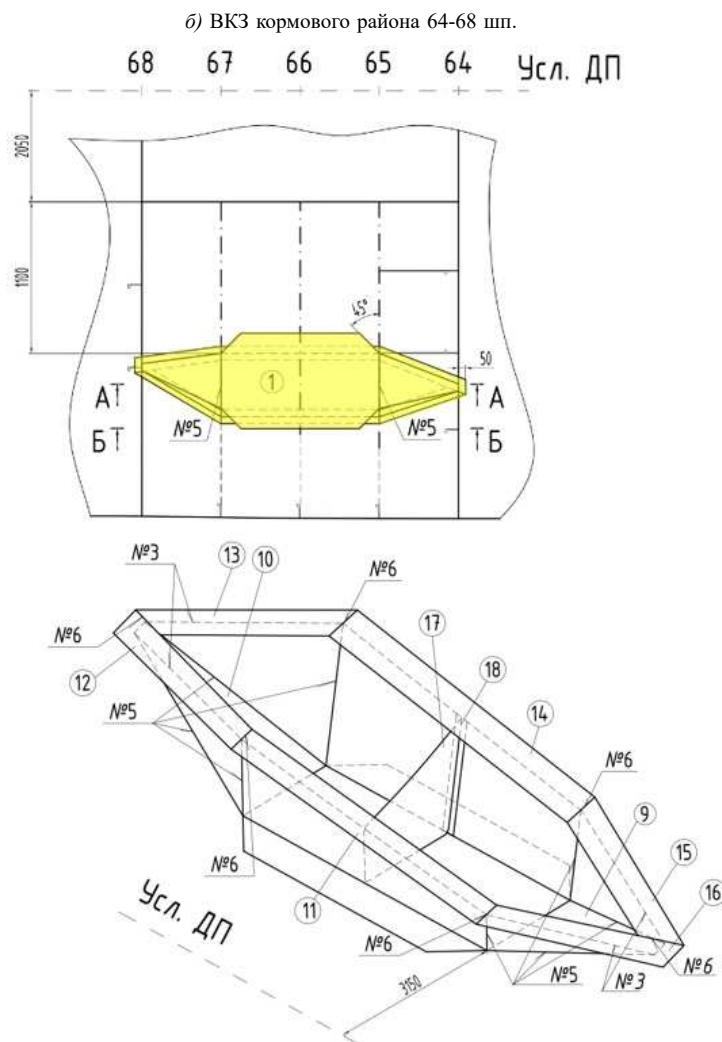


Рис. 5 Локальная ВКЗ носового (а) и кормового (б) районов скул

ВКЗ включает горизонтальную опорную полосу шириной 690 мм, вертикальную и наклонную полосы, соответствующие высотам от основной плоскости до обшивки в местах установки. Поперечные бракеты внутри ВКЗ установлены с интервалами не более двух шпаций. Дополнительные бракеты также были установлены внутри корпуса с целью снижения напряжений от взаимодействия элементов ВКЗ и днищевых связей.

Оба решения (носовой и кормовой ВКЗ) разработаны на единых принципах и включают одинаковые толщины соответствующих элементов и формы поперечных сечений. По оценкам такое решение не увеличивает осадку баржи, а ее вес в 20 раз меньше, чем по проекту ДНИИМФ (см. рис. 4).

4. ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ

С учетом опыта эксплуатации полагалось, что баржа при осушении на грунте может ориентироваться в сторону берега как носом, так и кормой, с возможными отклонениями от перпендикулярного положения. Поэтому нужна ВКЗ не только в носу, но и в корме. При этом учтены два основных сценария:

эксплуатационный, соответствующий условиям знака **NAABSA1** в символе класса, когда осушение и всплытие судна с грузами происходит в условиях отсутствия волнения, то есть практически без качки. Роль ВКЗ здесь невелика, так как эффект достигается за счет дополнительной площади опорной поверхности ВКЗ, составляющей в данном случае лишь 2,4 % от площади горизонтальной поверхности днища. Предвари-

тельная проверка показала, что все связи днища баржи соответствуют дополнительному знаку **NAABSA1** в символе класса;

экстремальный, соответствующий реальным более жестким условиям осушения и всплытия с качкой. Судно находится в состоянии частичной потери водоизмещения, имеет контакт с грунтом в точке первичного касания по ДП и совершает колебания, приводящие к контактам и повреждениям сколов. При этом ВКЗ выполняет функции «амортизаторов», ограничивающих амплитуды и динамику взаимодействия с грунтом, защищая сколовые районы от значительных повреждений.

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов ВКЗ и связей днища были выполнены для фрагмента отсека корпуса в программе SolidWorks. Расчетные нагрузки от грунта определены на основе Правил [10]. Их места приложений показаны на рис. 6. При эксплуатационном сценарии давления грунта (55 кПа) передаются на обшивку днища и частично на опорные полосы ВКЗ. При экстремальном сценарии давления существенно больше (217 кПа) и приложены только к опорной полосе ВКЗ по одному из бортов.

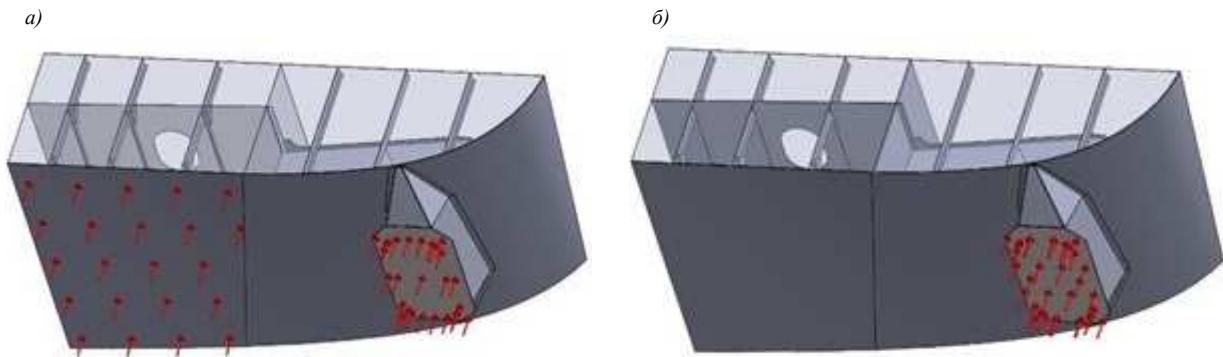


Рис. 6 Распределения давлений грунта при сценариях:
а) — эксплуатационном — 55 кПа; б) — экстремальном — 217 кПа

Результаты расчетов напряжений в конструктивных связях днища и ВКЗ представлены в таблице. Здесь видно, что в обоих сценариях и во всех связях уровень наибольших напряжений удовлетворяет Правилам [10] с существенными запасами. Результаты показывают, что при эксплуатационном сценарии уровень наибольших напряжений 103 МПа относится к продольным днищевым балкам и почти в 5 раз превосходит напряжения в опорной полосе ВКЗ.

Таблица
Наибольшие напряжения в связях днища и ВКЗ (МПа)

№	Конструктивные элементы		Эксплуатационный	Экстремальный
1	Днища	Наружная обшивка	87	38
2		Продольные балки	103	1
3		Флоры (сколовые бракеты)	67	27
4		Стрингер	35	8
5	ВКЗ	Опорный лист	22	89
6		Вертикальный лист	15	57
7		Наклонный лист	15	68
8		Бракеты внутри ВКЗ	10	40
9		Бракеты внутри корпуса	7	13
10		Бракета кормовая	15	77
11		Бракета носовая	19	94

При экстремальном сценарии уровень наибольших напряжений достигается в элементах ВКЗ (89 — 94 МПа) и он существенно выше напряжений в связях днища. Приведенные результаты относятся к локальной ВКЗ в кормовом районе. Выше отмечено, что ВКЗ в носовом районе спроектирована на тех же принципах. При этом дополнительно учтены факторы в безопасную сторону:

- толщина обшивки днища и сколов 10 мм (на 25 % больше, чем в корме);
- носовая ВКЗ расположена в районе, усиленном внутри промежуточными шпангоутами, перекрывающими сколовой район;

- площадь опорной полосы носовой ВКЗ в 2 раза больше, чем в корме;
- центр опорной полосы носовой ВКЗ смешен от ДП до 2,0 м, что существенно меньше, чем в корме — до 3,5 м;
- в условиях качки при экстремальных сценариях воздействия грунта на носовую ВКЗ будут существенно меньше, чем на кормовую ВКЗ.

С учетом этого толщины и размеры в сечениях носовой ВКЗ приняты в безопасную сторону такими же, как и для кормовой ВКЗ.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА

Представленный выше проект локальной ВКЗ днища судна от грунта был реализован весной 2023 года во время ремонта судна в Приморье. По размерам, указанным на разработанных чертежах ВКЗ, и с учетом ее положения по месту были заготовлены детали и узлы [6]. Конструкции ВКЗ изготавливались и формировались на слепе подетально в 4 местах корпуса — с двух бортов в носовой и в кормовой части. На рис. 7 приведены фотографии реализации проекта носовой (см. рис. 7а) и кормовой ВКЗ (см. рис. 7б) корпуса. Предварительно проект был рассмотрен и одобрен Регистром.

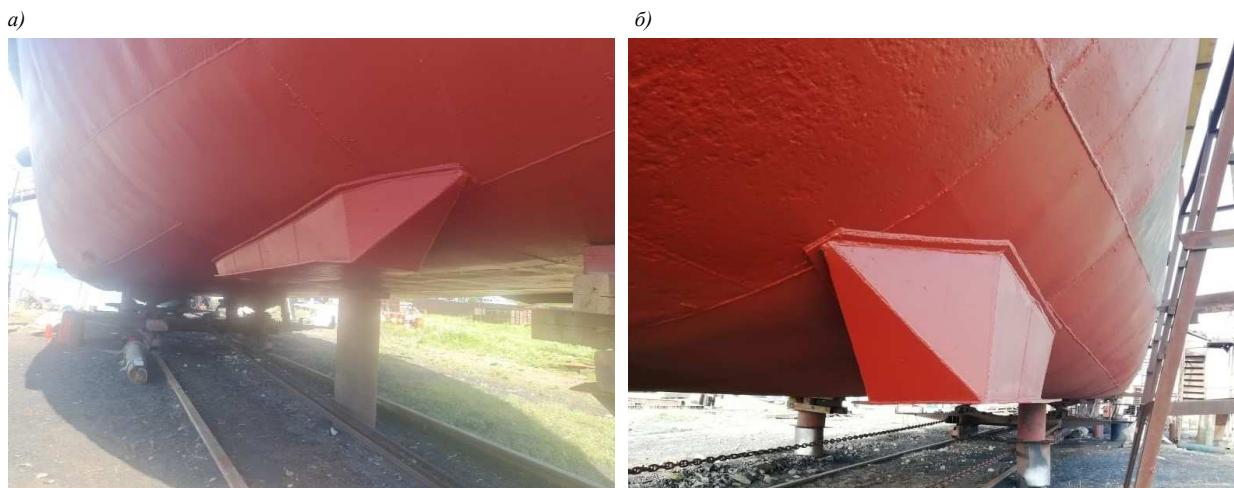


Рис. 7 Локальная ВКЗ 2023 года в носу на 10 — 16 шп. (а) и в корме на 64 — 68 шп. (б)

Данный проект нацелен на ограничение за счет ВКЗ параметров бортовой качки судна в процессе осушения на грунте и всплытия, в результате которого обеспечивается снижение контактных нагрузок на скуловые районы корпуса. Решения проекта практически не требуют увеличения осадки судна, а благодаря локальности ВКЗ обеспечивают небольшие затраты — менее 5 % от первого проекта 1990 года, разработанного для данного судна (см. рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы показана актуальность внешней конструктивной защиты корпусов судов от воздействия грунта при осушениях и всплытиях с качкой. Проведен анализ опыта, повреждений и конструктивных решений по защите судов от грунта. Показано, что в условиях осушений/всплытий с качкой скуловые районы являются наиболее часто повреждаемыми. Поэтому были предложены схемы локальной ВКЗ для повышения надежности в эксплуатации таких судов. Проектные решения были проверены на основе прямых расчетов прочности МКЭ. Результаты показали, что уровень наибольших напряжений в конструктивных связях днища и локальной ВКЗ удовлетворяет требованиям Регистра с запасами. По результатам работы показано, что судну даже без ВКЗ может быть присвоен дополнительный знак **NAABSA1** в символе класса, но при реализации предложенного конструктивного решения с локальной ВКЗ обеспечивается снижение повреждаемости днища и особенно скулов в более сложных условиях работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азовцев А.И. Разработка нормативно-технических требований Правил РС по обеспечению безопасности специализированных судов при погрузке-выгрузке с использованием принципа осушения / А.И. Азовцев, В.А. Кулеш, А.С. Огай, В.А. Петров и др. // Отчет о научно-исследовательской работе. Этап 2. ООО «МОРКОМТЕХ», Владивосток, 2015, 203 с.
2. Вспомогательные суда морского флота России: Каталог // Министерство транспорта РФ. Служба морского флота. ЦНИИМФ. СПб.: 1998.
3. Егоров Г.В. Суда снабжения проекта DCV47 для Камчатки / Г.В. Егоров, И. Ильницкий, М. Дугужев // Судостроение и судоремонт. 2005. № 48/49, с. 24 — 33.
4. Кулеш В.А. Опыт приведения судна к условиям класса NAABSA (посадка на грунт) / В.А. Кулеш, А.И. Азовцев // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал № 1(47) т. 2, НИЦ «МОРИНТЕХ», СПб, 2020, с. 69 — 76.
5. Кулеш В.А. Расчетное обоснование допускаемых остаточных размеров элементов корпуса лихтера "СДП-ДМ-2059" на класс РС/ В.А. Кулеш, М.В. Скотцов, О.Э. Суров и др. // ООО «Научно-техническая экспертиза и консалтинг», №11-05/04н/СДП, 2011. 47 с.
6. Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Ч.Х. Пояснительная записка к чертежам № 783743-23-06ВК3 и № 783743-23-06ВК3, ООО «МТИТ», Владивосток, 2023, 33 с.
7. Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Ч.Х. Проверка соответствия корпуса несамоходной наливной баржи «МНБ-500-002» символу класса Регистра NAABSA1, ООО «МТИТ», Владивосток, 2023, 88 с.
8. Кулеш В.А., Фам Ч.Х. Конструктивная защита судов от грунта // Труды Крыловского государственного научного центра. Спецвыпуск № 1. 2022, с. 113 — 119.
9. МНБ-500-002. URL: <https://fleetphoto.ru/vessel/44105/> (дата обращения: 15.04.2023).
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2020, с. 258 — 269.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. СПб, Российский морской регистр судоходства, 2023.
12. Судно «Провидения». URL: <https://www.korabel.ru/fleet/companies/> 3022.html (дата обращения: 12.07.2021).
13. Фам Чунг Хиеп Проектирование конструктивных усилений судов для посадки на грунт [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 2.5.18; Волжский гос. ун. вод. транс. — Н. Новгород., 2023. 24 с.

REFERENCES

1. Azovtsev A.I., Kulesh V.A., Ogai A.S., Petrov V.A. and other. *Razrabotka normativnogo-tehnicheskikh trebovani Pravil RS po obespecheniiu bezopasnosti spetsializirovannykh sudov pri pogruzke-vygruzke s ispolzovaniem printsipa osusheniia* [Development of regulatory and technical requirements of the RS Rules for ensuring the safety of specialized ships during loading and unloading using the drainage principle]. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote, Stage 2, JSC "MORKOMTEKH", Vladivostok, 2015, 203 p.
2. *Vspomogatelnye suda morskogo flota Rossii: Katalog* [Auxiliary ships of the Russian maritime fleet: a Catalog] Ministerstvo transporta Rossii. Sluzhba morskogo flota. TSNIIMF. St. Petersburg. 1998.
3. Egorov G.V. Il'intsy I., Duguzhev M. *Suda snabzheniya proekta DCV47 dla Kamchatki* [Supply vessels of project DCV47 for Kamchatka]. Shipbuilding and ship repair. 2005. Nos. 48/49, pp. 24 — 33.
4. Kulesh V.A., Azovtsev A.I. *Opyt privedeniya sudna k usloviiam klassa NAABSA posadka na grunt* [Adaptation experience of ship to the class NAABSA (safely aground)]. Morskiye intellektualnyye tekhnologii, No. 1(47), Vol. 2, St. Petersburg, 2020, pp. 69 — 76.
5. Kulesh V.A., Skoptsov M.V., Surov O.E. and other. *Raschetnoe obosnovanie dopuskaemykh ostatochnykh razmerov elementov korpusa likhtera "SDP-DM-2059" na klass RS* [Calculation substantiation of the permissible residual dimensions of the lighter hull elements "SDP-DM-2059" for the RS class]. OOO "Nauchno-tehnicheskaja ekspertiza i konsalting", № 11 05/04n/SDP, 2011, 47 p.
6. Kulesh V.A., Surov O.E., Fam C.H. *Poyasnitel'naya zapiska k chertezham № 783743-23-06 VKZ i № 783743-23-06 VKZ* [Explanatory note to drawings No. 783743-23-06 ESP and No. 783743-23-06 ESP], ООО "МТИТ", Vladivostok, 2023, 33 p.
7. Kulesh V.A., Surov O.E., Fam C.H. *Proverka sootvetstviia korpusa nesamokhodnoi naliivnoi barzhi "MNB-500-002" simvolu klassa Registra NAABSA1* [Checking the compliance of the hull of the non-self-propelled tanker barge "MNB-500-002" with the class symbol of the Register NAABSA1], ООО "МТИТ", Vladivostok, 2023, 88 p.
8. Kulesh V.A., Fam C.H. *Konstruktivnaya zashchita sudov ot grunta* [Structural protection of ships from the ground]. Proceeding of the Krylovsky State Scientific Center, 2022, Special Edition 1, pp. 113 — 119.
9. MNB-500-002. Available at: <https://fleetphoto.ru/vessel/44105/> (accessed on: 15.04.2023). (In Russian).
10. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVII. Distinguishing Marks and Descriptive Notations in the Class Notation Specifying Structural and Operational Particulars of Ships. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023, pp. 258 — 269. (In Russian).
11. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ship. Part II. Hull. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2023. (In Russian)
12. *Sudno "Provideniya"* [The vessel "Provideniya"]. Available at: <https://www.korabel.ru/fleet/companys/3022.html>. (accessed on: 12.07.2021).
13. Fam Chung Hiep. *Proektirovaniye konstruktivnykh usilennii sudov dla posadki na grunt*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Design of structural reinforcements of vessels for landing on the ground]. Nizhny Novgorod, 2023, 24 p.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 620.17: 539.421

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ МАКО И РЕГИСТРА К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПРИ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. ЧАСТЬ 1 — СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАРТУ ТРЕЩИНЫ

В.Ю. Филин, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, e-mail: ctod@rambler.ru

А.В. Ильин, д-р техн. наук, доцент, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург

А.В. Ларинов, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург
Е.Д. Назарова, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

В статье рассмотрена применимость судостроительных сталей по критерию сопротивления старту трещины. Проанализированы возможные корреляции работы удара с параметрами трещиностойкости. Предложено частичное изменение применения положений унифицированного требования (УТ) MAKO S6.

Ключевые слова: минимальная температура применимости стали, сдаточные испытания, механика разрушения, сопротивление старту трещины

SUBSTANTIATION OF IACS AND RS REQUIREMENTS FOR THE SELECTION OF HULL MATERIALS FOR STRUCTURES OPERATED AT LOW CLIMATIC TEMPERATURES. PART 1 — CRACK START RESISTANCE

V.Yu. Filin, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg, e-mail: ctod@rambler.ru

A.V. Ilyin, DSc, associate professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg

A.V. Larionov, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg

E.D. Nazarova, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg

The article considers the applicability of shipbuilding steels regarding crack start resistance. Probable correlations of impact energy vs. fracture toughness parameters have been analyzed. A partial change in the application of the provisions of the IACS unified requirement (UR) S6 has been suggested.

Keywords: the minimum applicability temperature of steel, acceptance tests, fracture mechanics, resistance to a crack start

ВВЕДЕНИЕ

Температурный диапазон применимости углеродистых и низколегированных корпусных сталей с ОЦК решеткой ограничен снизу из-за явления вязко-хрупкого перехода, то есть возможности хрупких разрушений при нагружении конструкций. Трешины зарождаются в зонах высокой объемности напряженного состояния вблизи острых концентраторов напряжений, в том числе дефектов. Жесткость напряженного состояния измеряют отношением $\eta = \sigma_1/\sigma_i$, где σ_1 — первые главные напряжения, σ_i — интенсивность напряжений.

Возможность разрушения по хрупкому механизму лимитирует хладостойкость материала, то есть его способность выдерживать достаточно большие деформации перед разрушением при низких температурах. Основным сдаточным показателем хладостойкости рассматриваемых сталей является работа удара KV при испытаниях образцов Шарпи с острым надрезом тип 11 по ГОСТ 9454-78 [1]. Температура испытания T_I , согласно Правилам классификации и постройки морских судов [2], должна соответствовать температурной категории: +20 °C для А, 0° для В, -20 °C для D, -40 °C для Е и -60 °C для F (здесь и далее температура в градусах Цельсия). Фактически нормируется среднее значение KV [Дж] при T_I , поскольку испытывают три образца, и на одном из них допускают снижение KV на 30% от требуемого значения, для проката в толщинах до 50 мм численно равного $\approx 0,1\sigma_t$, где σ_t — предел текучести стали [МПа].

На номограммах части II «Корпус» Правил Регистра, а также в таблицах УТ MAKO S6 [3] показаны минимальные температуры применимости TD корпусных сталей нормальной и повышенной прочности (с минимальными значениями σ_t от 235 до 390 МПа) толщиной до 50 мм. Сравнение этих требований показано на рис. 1 по группам связей (группа III — наиболее ответственная), закрашены области, где требования Регистра менее строгие, чем у MAKO, без учета требований Регистра к стали D40, которые еще менее строги. Из рисунка следует, что принципиальные подходы Регистра и MAKO к назначению требований в целом близки: по мере увеличения прочности металла (σ_t) и его толщины (S) требования к нижней температурной границе применимости ужесточаются. Тем не менее, в количественном отношении требования не совпадают.

Требования MAKO были предложены в 2002 году. В унифицированном требовании (УТ) UR S6 они представлены в виде таблиц, поэтому на рис. 1 выглядят ступенчатыми. Вторая особенность представления требований в том, что нет разделения по маркам стали повышенной прочности с минимальным пределом текучести от 315 до 390 МПа. Вероятно, учитывался тот факт, что изготовители проката сталей повышенной прочности для получения предела текучести в указанном диапазоне часто используют один химический состав. В целом упорядоченный характер требований MAKO говорит о том, что в их основе лежит некое расчетное обоснование, использующее корреляцию величины работы удара и параметров трещиностойкости, например, критического значения $CTOD$ — раскрытия в вершине трещины.

Расширенные диапазоны применимости по сравнению с остальными марками сталей предусмотрены в УТ MAKO S6 для сталей А и АН. По-видимому, авторы требований MAKO предполагали, что для этих сталей в пределах указанных диапазонов применимости требуемые величины трещиностойкости и работы удара настолько малы, что достигают нижнего шельфа, где понятие температурного запаса теряет смысл.

Анализ исторических версий отечественных нормативных документов показал, что требования Регистра были разработаны ранее 1993 года. Они выглядят менее упорядоченными, что свидетельствует о дополнительных соображениях, принятых в расчет. Например, учитывались требования ГОСТ 5521 [4] и части XIII «Материалы» Правил Регистра к состоянию поставки проката (горячекатаное или с термообработкой), а также к необходимости проведения испытаний на ударный изгиб сталей марок А и В.

Величина KV применительно к корпусным сталям в отечественной практике используется, начиная с введения в действие ГОСТ 5521-76. Требования этого стандарта отличались от современных, например, тем, что сталь марки D испытывалась на ударный изгиб не при -20°, а при -10°; стали категории 40 имели требуемую величину $KV = 36$ Дж, а не 39 Дж. Анализ ГОСТ 5521 показал, что в редакциях 1976 и 1986 годов для сталей марок D40 и E40 был фактически указан химический состав марки D40S, который отличается более низким содержанием марганца, но более высоким содержанием кремния. Сталь D40S легирована хромом, медью и никелем, она поставлялась исключительно в термообработанном состоянии, обычно после закалки и отпуска, реже — после нормализации. Такое легирование в сочетании с термообработкой обеспечивало высокое качество стали и ее квазиоднородность по толщине по сравнению с остальными марками. Это, по-видимому, позволило авторам требований Регистра установить расширенные границы применимости данной стали. Несоответствие в ГОСТ было исключено в редакции 1993 года [5], однако в части II «Корпус» Правил Регистра для сталей D40 и E40 до сих пор указаны более широкие границы применимости по сравнению с другими марками сталей повышенной прочности, см. рис. 1.

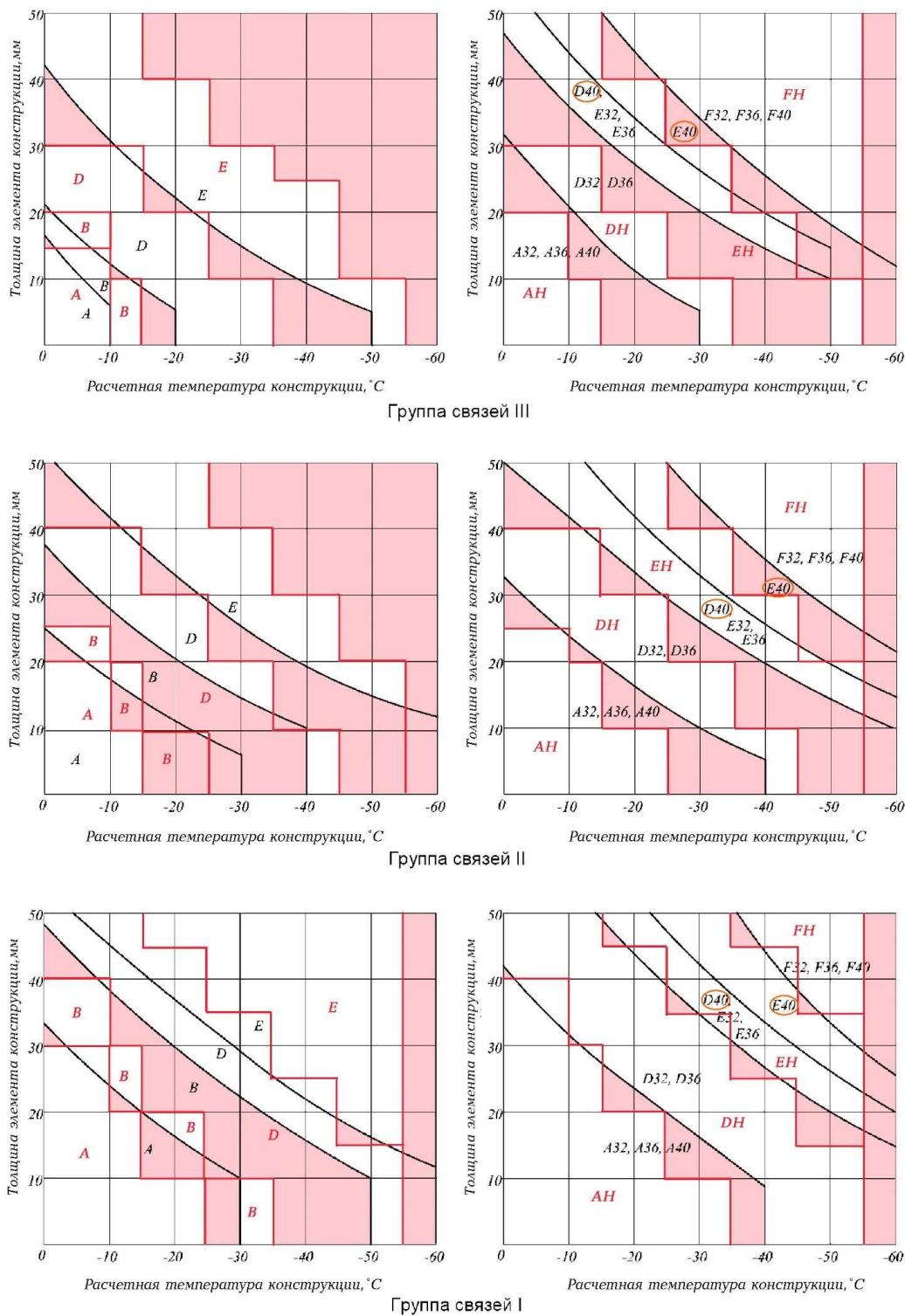


Рис. 1 Сопоставление температурных диапазонов применимости корпусных сталей:
наклонные линии — требования Регистра, ступеньки — требования таблиц УТ MAKO S6.
Закрашены области, где требования Регистра менее строгие, чем в УТ MAKO S6 (кроме марок D40, E40)

1. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ПРИМЕНИМОСТИ КОРПУСНЫХ СТАЛЕЙ

Минимальные температуры T_D применимости сталей нормальной и повышенной прочности в толщинах до 50 мм могут быть рассчитаны с использованием механики разрушения по величине KV , которая является единственной сдаточной характеристикой хладостойкости. Примем следующие положения и допущения:

- жесткость напряженного состояния, достигающая $\eta \approx 2,7$ в образцах Шарпи, является достаточно высокой, чтобы быть не меньше, чем в элементах судостроительных конструкций с острыми дефектами, что позволяет осуществлять переход «от образца к конструкции»:
- условие отсутствия разрушения принимается в терминах механики разрушения,
- отбор проб для испытаний на ударный изгиб позволяет получить данные, представительные для стали в полной толщине, а разброс свойств по толщине проката может не учитываться;
- существует обобщенная температурная зависимость работы удара; возможно установление корреляции величины работы удара с параметрами трещиностойкости материала, не зависящими от толщины (коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I , J -интеграл) хотя бы в диапазоне, включающем требуемые значения KV ; допустимо использование известных аналитических описаний температурных зависимостей трещиностойкости — это позволяет перейти к термину «температурный запас» $\Delta_T = T_D - T_I$;
- существует некоторый расчетный размер дефекта в основном металле элемента конструкции, например, предельная при оценке циклической прочности глубина протяженной краевой трещины, равная $0,25S$, где S — полная (натура) толщина металла.

Процедуры расчетов зависят от принятого в терминах механики разрушения условия старта или торможения трещины, распространяющейся по хрупкому механизму. Перспективным представляется использование двухуровневой системы безопасности [6], которая с 2012 года в неявном виде введена в Правила Регистра при оценке применимости арктических марок стали, 3.5 части XIII «Материалы». Корпусные стали должны обладать достаточным сопротивлением старту трещин по хрупкому механизму, что контролируется испытаниями на статическую трещиностойкость с определением критического значения $CTOD$ или J -интеграла. Вторым уровнем безопасности является обеспечение способности корпусных сталей остановить трещину, распространяющуюся по хрупкому механизму, что проверяется прямыми испытаниями на торможение трещины или косвенно — через определение температур вязко-хрупкого перехода $T_{K\beta}$, NDT, ИПГ и, в некоторой степени, испытаниями на ударный изгиб. В рамках настоящей работы оба упомянутых подхода рассмотрены применительно к основному металлу.

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАРТУ ТРЕЩИНЫ

Рассмотрим возможные корреляции работы удара KV и трещиностойкости K_{Ic} для участка температурной зависимости трещиностойкости в пределах от нижнего шельфа полностью хрупких разрушений примерно до половины значений верхнего шельфа, соответствующего полностью вязким разрушениям (далее для краткости используется упрощенное определение «для вязко-хрупкого перехода»). В обзоре [7] упомянуто, что Маранде и Санз (1977) предсказывали вид температурной зависимости K_{Ic} для сталей повышенной прочности после различной термообработки с помощью многошагового подхода. Ими предложены соотношения

$$TK_{Ic} = 9 + 1,37TK_{28} \text{ [}^{\circ}\text{C}], \quad (1)$$

а также

$$K_{Ic} = 19KV^{0,5}, \quad (2)$$

где K_{Ic} и KV определены при разных температурах, разность которых определяется формулой (1). Здесь TK_{Ic} — температура, при которой определяется K_{Ic} по формуле (2), TK_{28} — температура, при которой $KV=28$ Дж.

Такой подход достаточно сложно использовать при разработке общих требований, поскольку здесь надо располагать температурными зависимостями K_{Ic} и KV для конкретного материала. Проще воспользоваться одной из формул Барсома и Рольфе [8], полученной ими из экспериментальных данных Гринберга, представленных на рис. 2. Здесь K_{Ic} и KV соответствуют одной температуре,

$$K_{Ic}^2/E = 0,000222KV_{cp}^{3/2}, \quad (3)$$

где КИН K_{Ic} измеряется в $\text{МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$, модуль упругости E в МПа, для стали можно принять $E=200000$ МПа, средняя величина работы удара KV_{cp} измеряется в Дж.

Барсом и Рольфе отмечали, что из-за различий в скоростях нагружения и остроте концентратора отсутствует теоретическое обоснование полученной корреляции, и она является эмпирической.

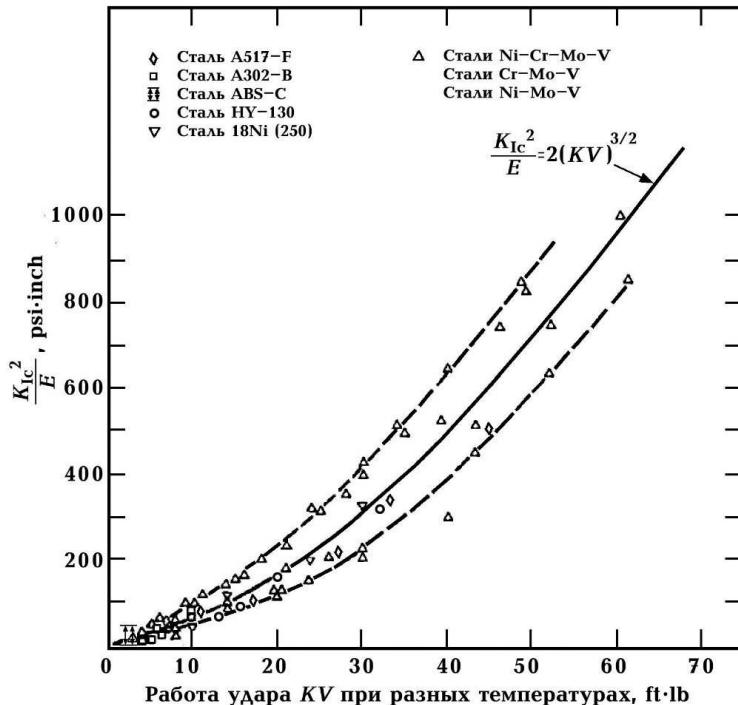


Рис. 2 К выводу формулы Барсома-Рольфе, цитируется по [8].

По оси ординат — величина, пропорциональная J -интегралу.

Формула (3) на рисунке приведена в единицах измерения, принятых в США

Поскольку корпусные стали эксплуатируются при высоких нагрузках и должны обладать высокой статической трещиностойкостью, в дальнейших рассуждениях необходим переход к использованию нелинейной механики разрушения, и, соответственно, к J -интегралу,

$$J_{Ic} = 1000(1 - \nu^2)K_{Ic}^2/E, \quad (4)$$

где J -интеграл измеряется в [Н/мм], ν — коэффициент Пуассона ($\nu \approx 0,3$ для стали). Индекс " Ic " оставлен для общности, формула (4) означает, что при больших пластических деформациях, наоборот, K_{Ic} вычисляется по экспериментально найденным значениям J_{Ic} , так как корректное определение K_{Ic} невозможно. Из (3) и (4) следует

$$KV_{cp}|_{T_D} \approx 2,9J_{Ic}^{2/3}. \quad (5)$$

Варианты аналитической температурной зависимости $K_{Ic}(T^\circ)$ имеют вид

$$K_{Ic}(T) = K_{Ic\min} + A \cdot \exp(B(T - T_0)),$$

где величина $K_{Ic\min}$ и температура T_0 соответствуют нижнему шельфу температурной зависимости. Пренебрегая достаточно малой величиной $K_{Ic\min}$, получим

$$K_{Ic}|_{T_D} = K_{Ic}|_{T_u} \cdot \exp(B(T_D - T_u)), \quad (6)$$

где величину B принимают равной 0,019 согласно стандарту ASTM E1921 [9] и иным зарубежным источникам, например, [8]; 0,036 для нижней огибающей по ASME BPVC Section XI. Division 1 [10]; 0,02 для обобщенной нижней огибающей зависимости трещиностойкости сталей перлитного класса и высокохромистых сталей по нормам атомной энергетики [11]. Для дальнейших рассуждений принято $B=0,02$.

Исходя из (4), $J \sim K^2$, тогда

$$J_{lc}|_{T_D} = J_{lc}|_{T_u} \cdot \exp(0,04(T_D - T_u)). \quad (7)$$

Из (5) и (7) следует достаточно пологая предполагаемая температурная зависимость KV для нижней части вязко-хрупкого перехода

$$KV_{cp}|_{T_D} = KV_{cp}|_{T_u} \cdot \exp(0,02(T_D - T_u)). \quad (8)$$

Приняв, что требуемая величина работы удара при температуре испытания ТИ имеет величину $0,1\sigma_{t_0}$ получаем выражение для температурного запаса $\Delta T = T_d - T_u$.

$$\Delta T = 37 \cdot \ln\left(\frac{2,9J_{lc}^{2/3}}{0,1\sigma_{t_0}}\right). \quad (9)$$

Основной вопрос в определении температурного запаса ΔT по формуле (9) заключается в определении требуемой величины J_{lc} из условия отсутствия разрушения: статическая трещиностойкость материала должна быть не меньше параметра нагруженности конструкционного элемента с трещиной (последняя также определяется в терминах J -интеграла), с некоторым коэффициентом запаса. Процедуры подобных расчетов приводятся, например, в документе SINTAP [12] и в созданном на его основе стандарте BS 7910 [13].

В простейшем виде, для основного металла с краевой трещиной, нагруженного мембранными растягивающими напряжениями $\sigma_t = 0,7\sigma_{t_0}$,

$$J_{lc} \geq n_1 \cdot 1000(1 - v^2)/E(K_I^d)^2 \cdot f(L_r), \quad (10)$$

где $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_{t_0}$ — относительная нагруженность, в которой референсные напряжения σ_{ref} для рассматриваемого случая составляют $\sigma_{ref} \approx 0,933\sigma_{t_0}$ (пункт Р.9 стандарта BS 7910). Тогда $f(L_r) \approx 0,835$ (используется формула (29) стандарта BS 7910 для сталей с физическим пределом текучести), n_1 — коэффициент запаса.

Величину КИН K_I^d [МПа·м^{0,5}] в присутствии только мембранных напряжений определяют по формуле

$$K_I^d = \sigma_t Y_t \sqrt{0,001\pi a}, \quad (11)$$

где для сквозной трещины глубиной $a = S/4$ [мм] значение функции $Y_t = 1,55$. Таким образом,

$$K_I^d = 0,7\sigma_t \cdot 1,55 \cdot \sqrt{0,001\pi S/4} = 0,03\sigma_{t_0}\sqrt{S}. \quad (12)$$

Примем коэффициент запаса в формуле (10) согласно результатам численного эксперимента по выполнению либо невыполнению условия разрушения по хрупкому механизму в виде [14]

$$n_1 = (0,6 + 11V_c^5) \times \exp((9,3 - 0,94 \ln S)V_c) \times (1 - (m - 3)/7 \times \sqrt{V_c}) + 0,3, \quad (13)$$

где V_c — коэффициент вариации экспериментальных значений трещиностойкости;
 m — число испытанных образцов в серии.

Для основного металла, обладающего умеренным разбросом трещиностойкости, $V_c \approx 0,3$. Обычно испытывают три образца: $m = 3$, это приводит к диапазону значений $n_1 = 3,3 \dots 5,7$ для толщин 10 ... 50 мм

$$n_1 = 0,63 \times \exp(2,8 - 0,28 \ln S) + 0,3. \quad (14)$$

Тогда, из (9) и (10),

$$\Delta T = 37 \cdot \ln(0,0066 \sigma_{t_0}^{1/3} \cdot S^{2/3} (0,63 \times \exp(2,8 - 0,28 \ln S) + 0,3)^{2/3}). \quad (15)$$

Рассчитанные значения требуемой статической трещиностойкости J_{lc} , работы удара KV при T_D и температурных запасов ΔT приведены в табл. 1. Они оказываются близки к требованиям УТ MAKO S6, кроме требований к сталим марок А и АН. Требования УТ MAKO S6 в виде ступенек также приведены на рис. 3. Расчеты по представленным формулам можно проводить и для других, менее ответственных групп связей, понижая коэффициент запаса n_1 , который связан с допускаемой вероятностью разрушения. Если уменьшить его в два раза по сравнению с формулой (13), результаты расчета будут близки к требованиям MAKO для группы связей I. Результаты такого расчета также представлены в табл. 1.

Таблица 1

Требуемые значения трещиностойкости J_{Ic} и величины температурного запаса

Предел текучести, МПа	Толщина, мм, не более				
	10	20	30	40	50
Связи категории III					
Требуемое среднее значение J_{Ic} , Н/мм, по формуле (10)					
235	10,8	18,0	24,3	30,1	35,6
390	29,8	49,7	67,1	83,0	97,9
Требуемое среднее значение KV при TD, Дж, по формуле (5)					
235	14	20	24	28	31
390	28	39	48	55	62
Требуемые УТ MAKO S6 температурные запасы ΔT , °C (кроме сталей А, АН)					
235...390	—	-5	+5	+15	+25
Рассчитанные температурные запасы ΔT , °C, по формуле (15)					
235	-19	-6	+1	+7	+11
390	-12	0	+8	+13	+17
Связи категории I, коэффициент n_1 принят в 2 раза меньше по сравнению с (14)					
Требуемое среднее значение J_{Ic} , Н/мм, по формуле (10)					
235	5,4	9,0	12,2	15,1	17,8
390	14,9	24,9	33,6	41,5	50,0
Требуемое среднее значение KV при TD, Дж, по формуле (5)					
235	9	13	15	18	20
390	18	25	30	35	39
Требуемые УТ MAKO S6 температурные запасы ΔT , °C (кроме сталей А, АН)					
235...390	-35	-25	-15	-5	+5
Рассчитанные температурные запасы ΔT , °C, по формуле (15)					
235	-34	-22	-14	-9	-4
390	-28	-15	-8	-2	+2

На рис. 3 рассчитанные по критерию сопротивления старту трещины диапазоны применимости сталей представлены в графическом виде.

3. ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТАЛЛА ПРОКАТА ПО ВЕЛИЧИНЕ $CTOD$

В НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» выполнено около 50 программ испытаний РС для получения свидетельств о признании изготавителя (СПИ) проката судостроительных сталей нормальной и повышенной прочности, изготовленных по ГОСТ 5521-93 [5] и ГОСТ Р 52927-2015 [15]. В том числе определяли параметр статической трещиностойкости $CTOD$ основного металла при нескольких температурах испытания с целью нахождения минимальной температуры $T_{D(CTOD_{bm})}$, при которой выполняются требования табл. 3.5.3.3.2 части XIII «Материалы» Правил Регистра к средней величине критических значений $CTOD$, при этом минимальное экспериментально полученное значение составляет не менее 0,7 от требуемой величины.

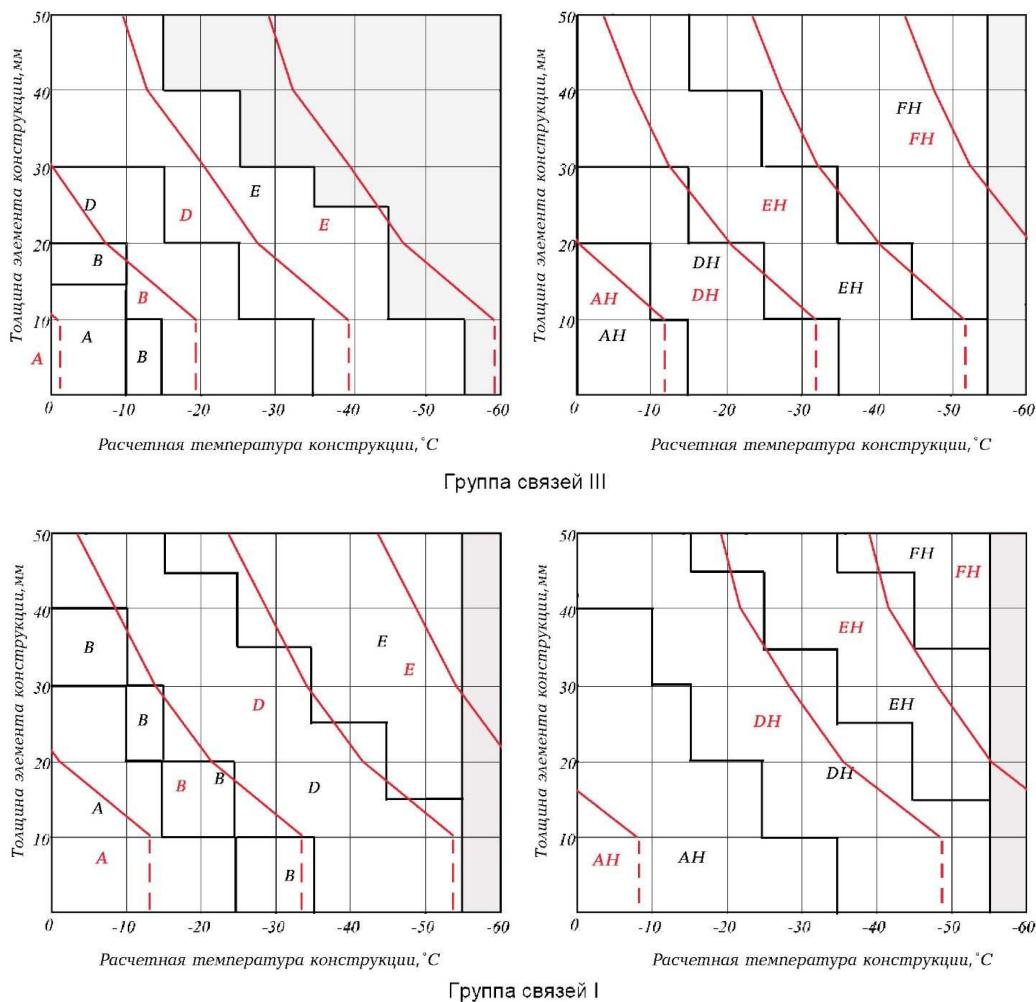


Рис. 3 Требования УТ MAKO S6 («ступеньки») и расчетные значения по табл. 1 (линии).
Затемнены области, где применение «обычных» марок сталей документом MAKO не допускается

Приняв минимальную рабочую температуру материала T_D , до которой данная сталь может быть использована, согласно номограммам части II «Корпус», можно оценить температурный запас сталей $T_D - T_{D(CTODbm)}$ по критерию сопротивления старту трещины для связей наиболее ответственной группы III. В подавляющем большинстве случаев металл испытанного проката показал наличие такого запаса, см. рис. 4. Недостаточный запас по $T_{D(CTODbm)}$ был получен только на нескольких партиях стали F36 — F40 после термомеханической обработки в толщинах 50 — 60 мм.

Таким образом, существующий уровень качества проката судостроительных сталей, поставляемого в соответствии с актуальными редакциями ГОСТ 5521 и ГОСТ Р 52927, а также требований части II «Корпус» Правил Регистра обеспечивают безаварийную эксплуатацию конструкций морской техники. Это подтверждается и крайне редкими случаями хрупкого разрушения. Авторам известен только один случай хрупкого разрушения палубы судна за последние 20 лет, и он связан с нештатным ударным нагружением. При этом лист палубного настила, в котором стартовала трещина по хрупкому механизму, был изготовлен из импортной стали, загрязненной неметаллическими включениями и имевшей низкие значения работы удара, не удовлетворяющие современным требованиям.

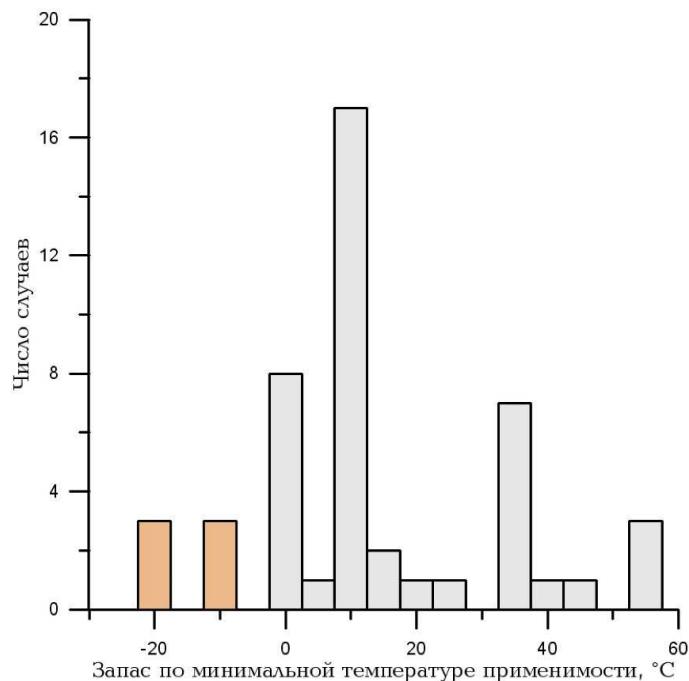


Рис. 4 Обобщенная оценка запаса сопротивления старта трещины $TD - T_{D(CTODbm)}$ по результатам экспериментального определения $CTOD$ основного металла проката из сталей нормальной и повышенной прочности в толщине до 60 мм

4. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УТ МАКО S6

Из вышесказанного следует возможность снижения требований УТ МАКО S6 до уровня требований части II «Корпус» Правил Регистра, при этом исключив из рассмотрения исторические марки стали D40S, E40S. Предлагаемые изменения выделены цветом в табл. 2 и 3.

Предлагаемая редакция таблицы 7 УТ МАКО S6 — Применимость сталей до -10°C .

Таблица 2

Группа связей/Class	I		II		III	
	Толщина, мм	Норм. прочн./MS	Повыш. прочн./HT	Норм. прочн./MS	Повыш. прочн./HT	Норм. прочн./MS
$t \leq 15$	A	AH	A	AH	A	AH
$15 < t \leq 20$	A	AH	A	AH	B	AH
$20 < t \leq 25$	A	AH	B	AH	D	DH
$25 < t \leq 30$	A	AH	D	DH	D	DH
$30 < t \leq 35$	B	AH	D	DH	D	DH
$35 < t \leq 40$	B	AH	D	DH	D	EH
$40 < t \leq 50$	D	DH	E	EH	E	EH

Таблица 3
Предлагаемая редакция таблицы 9 UR S6 — Применимость сталей при низких температурах

Толщина, мм	-11/-15 °C		-16/-25 °C		-26/-35 °C		-36/-45 °C		-46/-55 °C	
	Норм. прочн./MS	Повыш. прочн./HT								
Группа связей/Class I										
$t \leq 10$	A	AH	A	AH	B	AH	B	DH	D	DH
$10 < t \leq 15$	A	AH	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH
$15 < t \leq 20$	A	AH	B	AH	B	DH	D	DH	E	EH
$20 < t \leq 25$	B	AH	B	DH	D	DH	D	DH	E	EH
$25 < t \leq 30$	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
$30 < t \leq 35$	B	DH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
$35 < t \leq 45$	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH	\emptyset	FH
$45 < t \leq 50$	D	DH	E	EH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH
Группа связей/Class II										
$t \leq 10$	A	AH	A	AH	B	DH	D	DH	D	DH
$10 < t \leq 15$	A	AH	B	AH	D	DH	D	DH	D	DH
$15 < t \leq 20$	B	AH	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH
$20 < t \leq 25$	D	DH	D	DH	D	DH	E	EH	\emptyset	FH
$25 < t \leq 30$	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH	\emptyset	FH
$30 < t \leq 40$	D	DH	E	EH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH
$40 < t \leq 45$	E	EH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH	\emptyset	\emptyset
$45 < t \leq 50$	E	EH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH	\emptyset	\emptyset
Группа связей/Class III										
$t \leq 10$	B	AH	D	DH	D	DH	E	DH	E	EH
$10 < t \leq 15$	D	AH	D	DH	E	DH	E	DH	\emptyset	EH
$15 < t \leq 20$	D	DH	D	DH	E	EH	E	EH	\emptyset	FH
$20 < t \leq 25$	D	DH	DH	E	E	EH	E	FH	\emptyset	FH
$25 < t \leq 30$	D	DH	E	EH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH
$30 < t \leq 35$	E	DH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH	\emptyset	\emptyset
$35 < t \leq 40$	E	EH	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH	\emptyset	\emptyset
$40 < t \leq 50$	E	EH	\emptyset	FH	\emptyset	FH	\emptyset	FH	\emptyset	\emptyset
Примечания: \emptyset — Не применяется. Для группы связей II расширено количество диапазонов толщин.										

ВЫВОДЫ

Применение формулы Барсома — Рольфе (3) совместно с оценками условия прочности по отношению к хрупкому разрушению с использованием механики разрушения позволило достаточно точно смоделировать температурные запасы, заложенные в УТ MAKO S6. Можно считать доказанным, что требования MAKO основаны на расчетах сопротивления старту трещины по хрупкому механизму с использованием корреляции статической трещиностойкости с работой удара. При этом в УТ MAKO S6 принятые упрощения, позволяющие установить единые требования для сталей повышенной прочности, а также расширяющие применение марок А, АН. Последний факт можно объяснить существованием некоторого нижнего уровня трещиностойкости и, соответственно, работы удара металла проката (порядка 20 Дж), который оказывается выше расчетных требований, представленных в табл. 1 для этих марок стали.

Фактическое отсутствие разрушений корпусов отечественной морской техники по хрупкому механизму объясняется достаточно высоким по сравнению с требуемым исходя из расчетов прочности по механике разрушения фактическим уровнем трещиностойкости, обеспеченным современными металлургическими производствами. Поэтому требования части II «Корпус» Правил Регистра к применению корпусных сталей являются достаточными. Качество металла проката при этом подтверждается результатами испытаний на статическую трещиностойкость, выполненных для получения свидетельств о признании изготовителей, и статистикой сдаточных механических характеристик, включая значения работы удара. Требования УТ MAKO S6 в большинстве случаев могут быть смягчены до уровня требований Регистра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на удар при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М., Издательство стандартов, 2008. — 10 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. Часть XIII. Материалы. Российский морской регистр судоходства. СПб, 2023.
3. IACS UR S6 Use of Steel Grades for Various Hull Members — Ships of 90 m in Length and Above. Rev.9 Corr.2 Nov 2021 — 10 p.
4. ГОСТ 5521-76 Сталь, свариваемая для судостроения. М., Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. — 20 с.
5. ГОСТ 5521-93 Стальной прокат специального назначения. М., Издательство стандартов, 2003. — 20 с.
6. Filin V.Yu. Quality Control of Steels for Large-Sized Welded Structures of the Arctic Shelf: Application of Russian and Foreign Requirements //Inorganic Materials: Applied Research, 2019, Vol. 10, No. 6, pp. 1492 — 1503.
7. Habashi M., Tvrđić M. Relationships between K_{Ic} and CVN at the lower shelf of the transition curve CVN-T//Journal of Materials Science and Engineering A.5 (5-6) (2015), pp. 209 — 220.
8. Barsom J.M. and Rolfe S.T. Correlations between K_{Ic} and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range/ASTM STP 466, 1969. pp. 281 — 302.
9. ASTM E1921-20 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM International, 2020. — 41 p.
10. ASME BPVC Section XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. Division 1 Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants. ASME, 2021. — 781 p.
11. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
12. Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry (SINTAP). Project No. BE95-1426, Final Procedure, November 1999.
13. BS 7910:2013+A1:2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. — 492 p.
14. Филин В.Ю. Разработка критериев трещиностойкости и хладостойкости материалов сварных конструкций морского шельфа на основе механики разрушения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб, 2019 — 425 с.
15. ГОСТ Р 52927-2105 Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. М., Стандартинформ. 2017. — 64 с.

REFERENCES

1. GOST 9454-7. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2008. — 10p. (In Russian).
2. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. Part XIII Materials. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023. (In Russian)
3. IACS UR S6 Use of Steel Grades for Various Hull Members — Ships of 90 m in Length and Above. Rev.9 Corr.2 Nov 2021 — 10 p.
4. GOST 5521-76 Weldable steel for shipbuilding]. Moscow, USSR State committee of products quality management and standards. 1976. — 20 p. (In Russian)
5. GOST 5521-93 Steel rolled plate of special purpose]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2003. — 20 p.
6. Filin V.Yu. Quality Control of Steels for Large-Sized Welded Structures of the Arctic Shelf: Application of Russian and Foreign Requirements. Inorganic Materials: Applied Research, 2019, Vol. 10, No. 6, pp. 1492 — 1503.
7. Habashi M., Tvrđić M. Relationships between K_{Ic} and CVN at the lower shelf of the transition curve CVN-T//Journal of Materials Science and Engineering A.5 (5-6) (2015), pp. 209 — 220.
8. Barsom J.M. and Rolfe S.T. Correlations between K_{Ic} and Charpy V-notch test results in the transition-temperature range/ASTM STP 466, 1969. pp. 281 — 302.
9. ASTM E1921-20 Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. ASTM International, 2020. — 41 p.
10. ASME BPVC Section XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. Division 1 Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants. ASME, 2021. — 781 p.
11. PNAE G-7-002-86 Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [Norms of strength calculations of the equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. — 525 p.
12. Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry (SINTAP). Project No. BE95-1426, Final Procedure, November 1999.
13. BS 7910:2013+A1:2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI Publ.— 492 p.
14. Filin V.Yu. Razrabotka kriteriev treschinostoinosti i hladostoinosti materialov svarynykh konstrukcij mosrkogo shelfa na osnove mechaniki razrusheniya. Diss. dokt. tech. nauk [Fracture mechanics based development of fracture toughness and cold resistance criteria for the materials of offshore structures. Dr. tech. sci thesis]. St. Petersburg, 2019. — 425 p.
15. ГОСТ Р 52927-2105 Rolled of normal, increased — and high-strength steel for shipbuilding. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. — 64 p.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.12

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦЕНТРОВКИ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА

С.Н. Гирин, канд. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ВГУВТ), Нижний Новгород, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru
Ю.И. Матвеев, д-р техн. наук, профессор, ВГУВТ, Нижний Новгород, e-mail: matveevseu@mail.ru

В статье отмечается, что некачественно выполненная центровка судового валопровода при постройке или ремонте судна часто приводит к его разрушению, которое носит усталостный характер. В некоторых случаях обеспечение соосности всех валов и подшипников также не гарантирует от преждевременного разрушения элементов валопровода. Основным фактором, определяющим долговечность валопровода, является напряженное состояние его материала. Многогранность нагрузок, действующих на валопровод, и сложность их определения не позволяют получить напряженное состояние материала расчетным путем с необходимой точностью. Предлагается использовать возможности современной приборной базы для контроля напряженного состояния валопровода, приводится пример такого использования.

Ключевые слова: судовой валопровод, центровка, напряженное состояние, инструментальный контроль

ASSESSMENT OF SHIP SHAFTING ALIGNMENT QUALITY TAKING INTO ACCOUNT THE STRESS STATE OF THE MATERIAL

S.N. Girin, PHD, professor, Volga State University of Water Transport (VGUWT), Nizhny Novgorod, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru
Yu.I. Matveev, DSc, professor, VGUWT, Nizhny Novgorod, e-mail: matveevseu@mail.ru

The article touches upon the fact that poorly executed alignment of the ship's shafting during the construction or repair of the vessel often leads to its destruction, which is fatigue-like. In some cases, ensuring the alignment of all shafts and bearings also does not guarantee against premature destruction of the elements of the shafting. The main factor determining the durability of the shafting is the stress state of its material. The versatility of the loads acting on the shafting and the complexity of their determination do not allow us to obtain the stress state of the material by calculation with the necessary accuracy. It has been proposed to use the capabilities of a modern instrument base to monitor the stress state of the shafting, an example of such use has been given.

Keywords: ship shafting, alignment, stress state, instrumental control

Технология выполнения центровки судовых валопроводов при постройке и ремонте судов подробно прописана в ОСТ 5.4368-81 [1]. В частности, в соответствии с [1] центровка валопровода должна проводиться на плаву при указанных в [1] состояниях нагрузки судна. К сожалению, это положение иногда игнорируется на судоремонтных предприятиях. Последствия нарушения требования ОСТ могут быть весьма печальными. Показательной в данном случае является поломка валопровода теплохода «ЭЛАНД», произошедшая через короткое время после выполнения очередного ремонта. Достаточно подробно обстоятельства данного происшествия описаны в статье [2].

В монографии В.В. Комарова [3] отмечается, что при центровке валопроводов контроль смещений на соединениях валов, раскрепов на кривошипах коленчатых валов и др. является косвенным показателем качества центровки валопровода. Прямыми параметрами, по мнению автора, являются нагрузки на опорах и изгибающие моменты (нормальные напряжения) в сечениях валов. С этим утверждением мы полностью согласны.

Статистика показывает, что абсолютное большинство разрушений валопроводов связано с нарушением усталостной прочности материала, который испытывает сложное напряженное состояние под действием нормального и касательного напряжений, которые непрерывно изменяются во времени. Изменение нормальных напряжений в точке вызвано изгибом вала под действием квазистатических и динамических нагрузок, при повороте вала на 180° эти напряжения меняют знак. Изменение касательных напряжений происходит в результате крутильных колебаний под действием периодических нагрузок на элементы двигателя внутреннего сгорания.

Под действием переменных напряжений трещина зарождается, как правило, на поверхности вала в районе концентраторов напряжения. Если определяющими в появлении и развитии трещины являются нормальные напряжения, поверхность разрушения близка к плоскости, нормальной оси вала, как это видно на рис. 1. Если трещина возникает и развивается под действием касательных напряжений, поверхность разрушения ориентирована под углом примерно 45° к оси вала (см. рис. 2). Если вклад нормальных и касательных напряжений в развитие трещины примерно одинаков, поверхность разрушения может быть произвольной (см. рис. 3).



Рис. 1 Разрушение гребного вала т/х «ЭЛАНД» под действием нормальных напряжений



Рис. 2 Усталостная трещина, вызванная касательными напряжениями



Рис. 3 Усталостная трещина, вызванная комбинацией нормальных и касательных напряжений

В Правилах Российского морского регистра судоходства [4] и Правилах Российского Речного Регистра [5] (ныне Российское Классификационное Общество) даются общие указания по проектированию валопроводов: определение диаметра и расстояния между опорами. Каких-либо указаний по нормированию внешних нагрузок и определению напряженного состояния материала не приводится. В разделах Правил, относящихся к крутильным колебаниям, даются значения допускаемых касательных напряжений, а допускаемые значения нормальных напряжений не приводятся. Это, на наш взгляд, является недостатком Правил, затрудняющим реализацию высказанного выше В.В. Комаровым утверждения об оценке качества центровки по напряжениям.

Как известно, оценка усталостной прочности при регулярном нагружении материала выполняется на основе комплексного коэффициента запаса [6], [7]

$$n = (n_\sigma n_\tau) / \sqrt{(n_\sigma^2 + n_\tau^2)}, \quad (1)$$

где n_σ — коэффициент запаса усталостной прочности по нормальным напряжениям;
 n_τ — коэффициент запаса усталостной прочности по касательным напряжениям.

Вычисление указанных коэффициентов зависит от характера циклического нагружения материала. Цикл считается знакопеременным при выполнении неравенства $\sigma_a > \sigma_m$ ($\tau_a > \tau_m$). (Здесь и далее индекс a означает амплитуду, а индекс m — среднее значение напряжения в цикле.) В противном случае цикл считается знакопостоянным

Для знакопеременных циклов коэффициенты n_σ и n_τ вычисляются по формулам

$$n_\sigma = \frac{\beta_{\text{кор}} \sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}; \quad (2)$$

$$n_\tau = \frac{\beta_{\text{кор}} \tau_{-1}}{\frac{k_\tau}{\varepsilon_\tau \beta_\tau} \tau_a + \psi_\tau \tau_m}; \quad (3)$$

Для знакопостоянных циклов коэффициенты n_σ и n_τ вычисляются по формулам

$$n_\sigma = \frac{\beta_{\text{кор}} \sigma_\tau}{\frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} \sigma_a + \sigma_m}; \quad (2)$$

$$n_\tau = \frac{\beta_{\text{кор}} \tau_\tau}{\frac{k_\tau}{\varepsilon_\tau \beta_\tau} \tau_a + \tau_m}; \quad (3)$$

Входящие в перечисленные формулы величины σ_{-1} и τ_{-1} представляют собой пределы выносливости материала при симметричных циклах нагружения, σ_τ и τ_τ — пределы текучести. Остальные величины, входящие в формулы, зависят от ряда факторов и могут быть вычислены по рекомендациям, приведенным в [6], [7], [8].

Как было указано выше, нормальные напряжения изменяются по знакопеременному циклу, при этом среднее напряжение является сжимающим, поэтому им можно пренебречь. Таким образом, формула для n_σ приобретает вид

$$n_\sigma = \frac{\beta_{\text{кор}} \sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} \sigma_a}; \quad (6)$$

Касательные напряжения в валах изменяются по знакопостоянному циклу, поэтому для определения n_τ следует пользоваться формулой (5).

Условием выполнения усталостной прочности является удовлетворение неравенству $n \geq [n]$. Допускаемое значение запаса $[n]$ в [6] рекомендуется принимать в диапазоне 1,3 — 1,5, а в [7] — 1,5 — 2,0.

В соответствии с [5] допускаемые касательные напряжения вычисляются по формуле

$$\tau_{\text{доп}} = (45 - 0,4\sqrt{d} - 13n/n_{\text{ном}}). \quad (7)$$

Для диаметра $d = 210$ мм и $n = n_{\text{ном}}$ получим $\tau_{\text{доп}} = 26,2$ МПа.

В Правилах [5] также рекомендуется, чтобы τ_a не превышали 80 % от допускаемого среднего. Отсюда получаем $[\tau_m] = \tau_{\text{доп}} / 1,8 = 26,2 / 1,8 = 14,5$ МПа; $[\tau_a] = 11,7$ МПа.

Принимая для изготовления вала сталь с временным сопротивлением 600 МПа, и подставляя в формулу (5) полученные значения напряжений, а также коэффициенты, вычисленные по рекомендациям [8], получим значение коэффициента запаса $n_\tau = 1,76$.

Подставляя в формулу (1) найденное значение n_τ и принимая $n = [n] = 1,5$, получим $n_\sigma = 2,86$.

Из формулы (6) для выбранного диаметра и стали можно получить допускаемое значение амплитуды нормального напряжения $[\sigma_a] = 8,3$ МПа.

Вычисленные значения носят оценочный характер, поскольку получены для некоторого условного вала, тем не менее, они показывают, что допускаемые величины амплитуд нормальных и касательных напряжений весьма малы, и для их контроля необходима чувствительная аппаратура.

Как известно, наиболее точные значения напряжений на поверхности материала дает метод тензометрии [9], [10]. Выполнение тензометрирования затрудняется тем, что измерения необходимо выполнять на вращающихся валах. В настоящее время появилась компактная аппаратура, позволяющая выполнять такие измерения. В качестве примера можно привести результаты измерений, выполненных авторами на толкаче ОТ-2429 в ноябре — декабре 2022 года в затоне АО «Борремфлот» с использованием аппаратуры фирмы ZETLAB.

На рис. 4 показана установка тензодатчиков для измерения нормальных и касательных напряжений (крутящих моментов) и аппаратуры, а на рис. 5 показано закрепление аппаратуры от смещения при вращении вала.

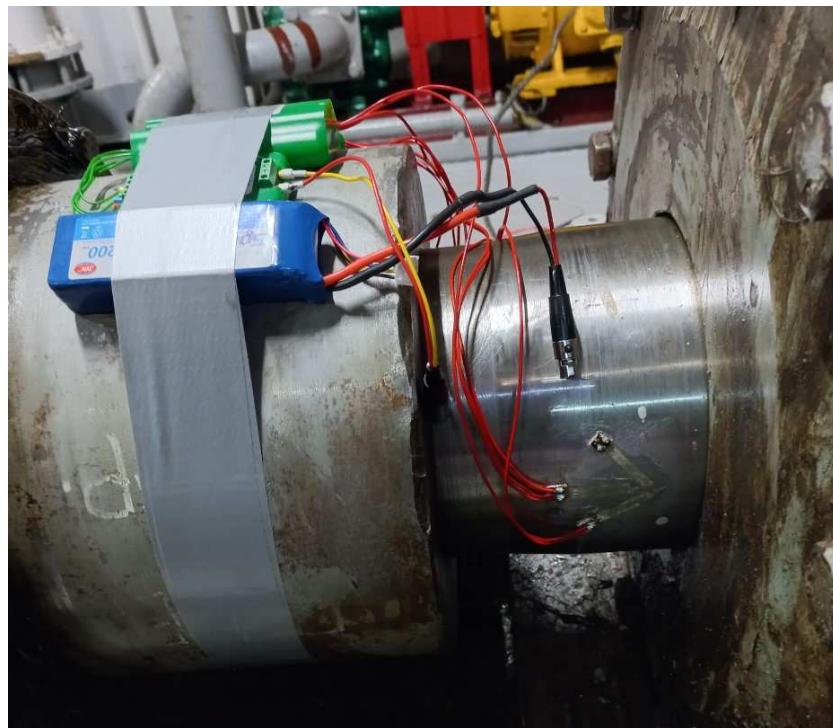


Рис. 4 Наклейка тензодатчиков и установка аппаратуры

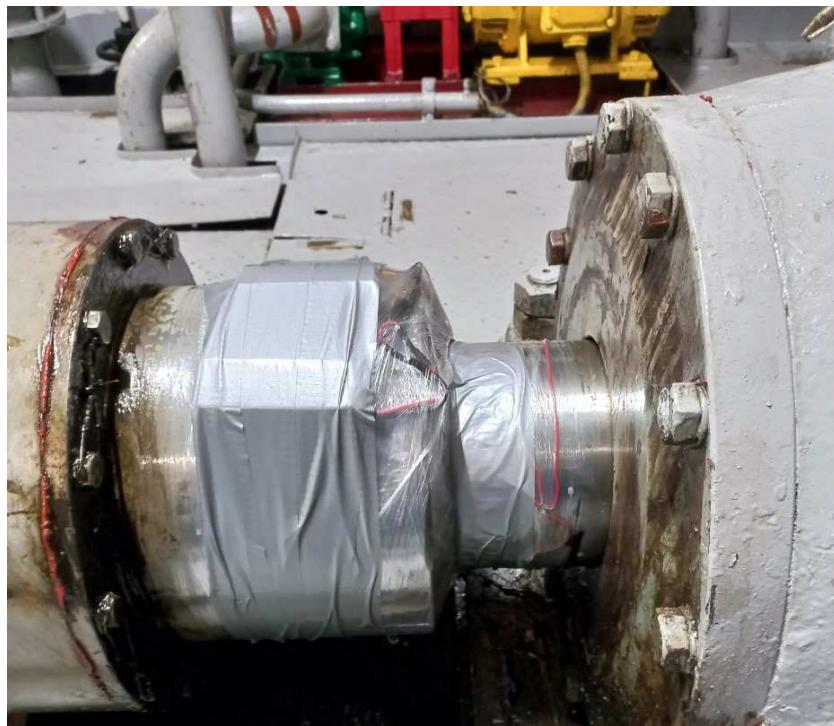


Рис. 5 Закрепление датчиков и аппаратуры для измерений

Аппаратура передает по радиоканалу результаты измерений на компьютер в реальном масштабе времени и позволяет одновременно записывать процесс изменения нормальных напряжений и крутящих моментов. На рис. 6 показана запись процесса изменения крутящих моментов, а на рис. 7 — нормальных напряжений. Как видно из этих рисунков, в диапазоне оборотов 150 — 200 об/мин имеется ярко выраженная зона резонансных колебаний.

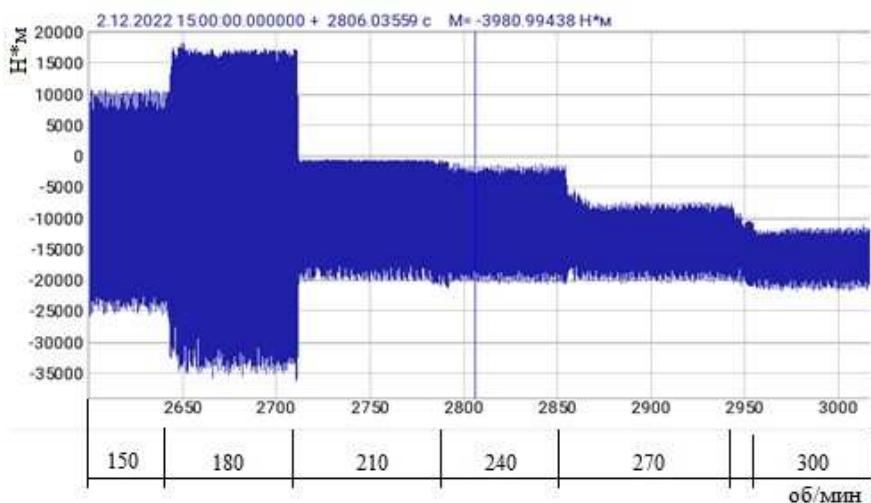
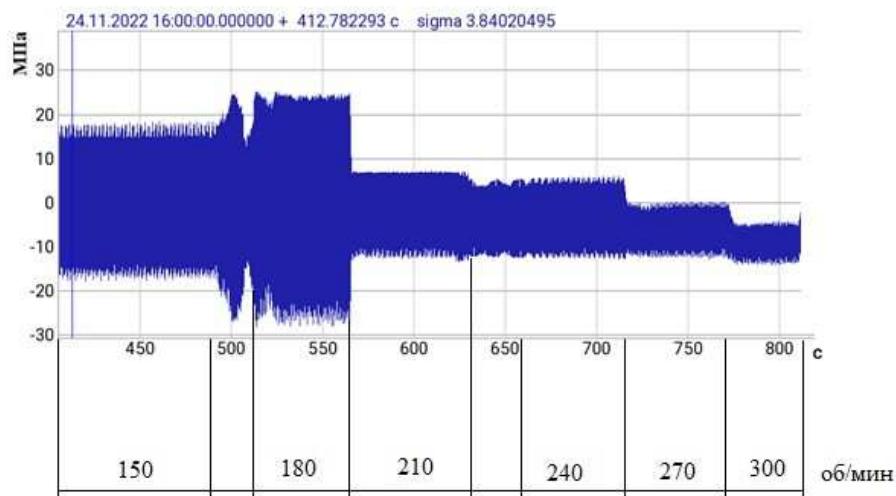
Рис. 6 Запись значений крутящих моментов, $\text{H}^*\text{м}$ 

Рис. 7 Запись процесса изгибных напряжений

На рис. 8 показана «растянутая» по времени запись нормальных напряжений при оборотах двигателя 180 об/мин, а на рис. 9 — спектр этой записи. Как видно из этих рисунков, доминирующей является частота 9,0 Гц, что соответствует уточненной частоте вращения вала. Следовательно, возмущающее усилие создается четырехтактным шести цилиндровым двигателем, установленным на данном судне.

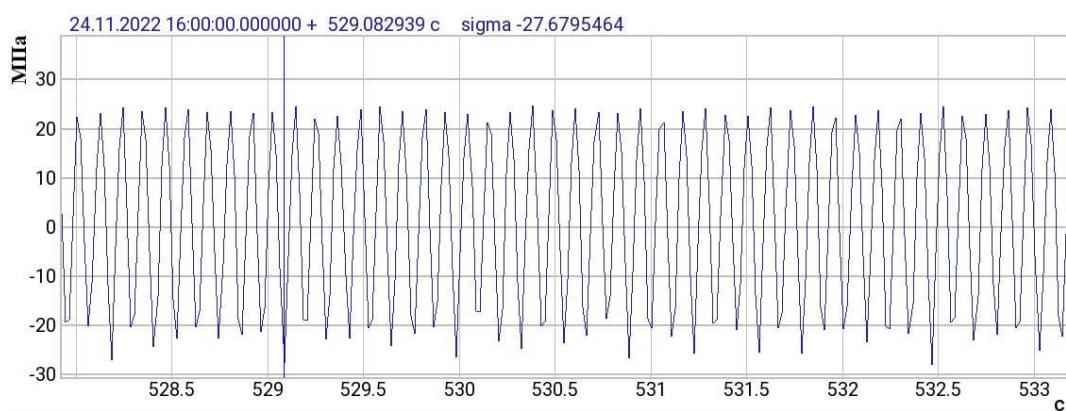


Рис. 8 «Растянутая» запись процесса нормальных напряжений при 180 об/мин

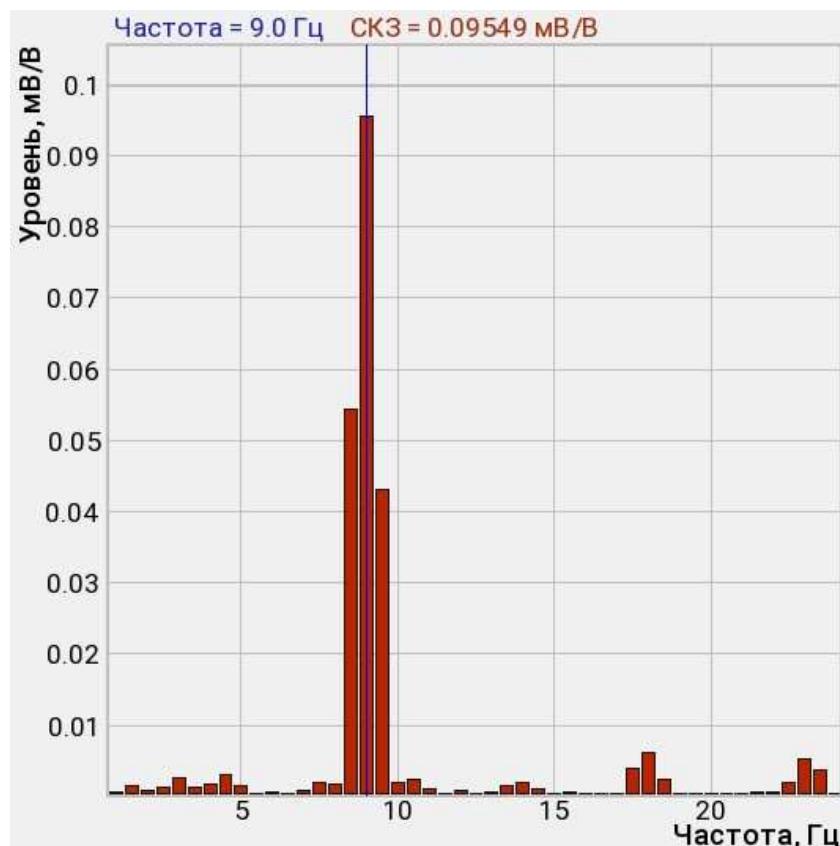


Рис. 9 Спектр записи рис. 8

В табл. 1 приведены средние значения и максимальные амплитуды нормальных напряжений на валу при разных оборотах вращения вала. В табл. 2 приведены аналогичные значения крутящих моментов и соответствующих им касательных напряжений.

Т а б л и ц а 1
Значения нормальных напряжений в валах

Число оборотов двигателя	Промежуточный вал	
	σ_{cp} , МПа	$(\sigma_a)_{max}$, МПа
150	0,0	16,5
180	-1,5	27,0
210	-2,5	9,5
240	-2,5	9,0
270	-6,0	6,0
300	-9,5	5,0

Т а б л и ц а 2
Значения крутящих моментов и касательных напряжений

Число оборотов двигателя	Промежуточный вал			
	M_{cp} , кН·м	M_a , кН·м	τ_{cp} , МПа	τ_a , МПа
150	5,0	16,2	3,6	11,8
180	7,5	22,5	5,5	16,4
210	10,5	9,5	7,7	6,9
240	10,5	9,5	7,7	6,9
270	14,0	6,0	10,2	4,4
300	16,5	5,0	12,0	3,6

Из рис. 6 и 7, а также табл. 1 и 2 следует, что с ростом оборотов двигателя возрастают средние значения нормального напряжения и крутящего момента, что естественно, поскольку судно находилось на швартовах. Как уже указывалось выше, на оборотах равных 180 об/мин наблюдается резкий рост амплитудных значений нормальных и касательных напряжений, т.е. имеет место резонанс крутильных и изгибных колебаний вала. При этом значения амплитуд нормальных и касательных напряжений превышают расчетные значения, приведенные выше. Следовательно, длительная эксплуатация судна при оборотах двигателя 150 — 200 об/мин не рекомендуется. При оборотах 270 — 300 об/мин, близких к номинальным, напряженное состояние вала находится в допускаемых пределах, поэтому можно считать, что усталостная прочность судового валопровода данного теплохода удовлетворительна.

ВЫВОДЫ

Статистика повреждений судовых валопроводов показывает, что основным видом повреждений является появление усталостных трещин. Как известно, анализ технического состояния валопровода, включая ультразвуковые и прочие исследования на наличие трещин, выполняются в процессе очередного освидетельствования судна, т.е. один раз в пять лет. За это время материал валопровода испытывает порядка 107 циклов переменных нагрузений. Если напряженное состояние материала таково, что комплексный коэффициент запаса прочности (1) будет меньше определенной величины (обычно принимают $[n] \geq 1,5$), то за это время трещина может появиться и достигнуть критической величины, после чего происходит разрушение вала.

Процесс центровки валопровода после его технического освидетельствования и ремонта является чрезвычайно важным с точки зрения его дальнейшей эксплуатации. При некачественно выполненной центровке в материале валопровода возникают дополнительные нормальные напряжения, которые могут вызвать нарушение усталостной прочности. В качестве примера в статье приводится факт разрушения гребного вала т/х «ЭЛАНД».

По мнению авторов, в настоящее время имеется возможность осуществлять надежный контроль напряженного состояния валопровода с использованием тензометрии и приборов, позволяющих это выполнять на вращающемся валу. Приводится пример использования аппарата фирмы ZETLAB. С помощью этой аппаратуры можно осуществлять достаточно длительную запись процессов нормальных и касательных напряжений при изменении числа оборотов двигателя и, тем самым, выявлять резонансные зоны изгибных и крутильных колебаний. Использование подобного рода аппаратуры в практике экспертов РС и РКО позволит повысить надежность контроля качества центровки валопроводов, однако при этом в Правилах должны быть указаны допускаемые значения нормальных и касательных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ5Р.4368-2013. Валопроводы судовых движительных установок. монтаж. Технические требования, правила приемки и методы контроля.
2. Гирин С.Н. Анализ поломки гребного вала теплохода «ЭЛАНД» / С.Н. Гирин, Ю.И. Матвеев // Научные проблемы водного транспорта. 2022, № 71. с. 15 — 28.
3. Комаров В.В. Центровка судовых валопроводов и главных двигателей. / В.В. Комаров — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2010.— 431 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург.
5. Российский Речной Регистр. Правила (в 5 томах). Том 3, 424 с.
6. Кузьмин А.В. Расчеты прочности деталей машин: справ. пособие. / А.В. Кузьмин, И.М. Чернин, Б.С. Козинцов — Мн.: Выш. шк., 1986.— 400 с.
7. Когаев В.П. Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
8. Румб В.К. Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов: учебник / В.К. Румб — СПб, 2008. — 298 с.
9. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ./Под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — 616 с.
10. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 2. Пер. с англ./Под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — 552 с.

REFERENCES

1. OST5R.4368-2013. *Valoprovody sudovykh dvizhitelnykh ustyanovok. Montazh* [Shafting of ship propulsion units. Assembly. Technical regulations, acceptance requirements and control methods].
2. Girin S.N. *Analiz polomki grebnogo vala teplokhoda "ELAND"* [Analysis of propeller shaft "ELAND" motor vessel]/ S.N. Girin, Yu.I. Matveev//Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2022. No. 71, pp. 15 — 28.
3. Komarov V.V. *Centrovka sudovykh valoprovodov i glavnykh dvigateley* [Alignment of ship shaftings and main propulsion units]// V.V. Komarov — Astrahan: Izd-vo AGTU, 2010. — 431 p.
4. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg. (In Russian)
5. Rules of Russian River Register (in 5 Vols.), vol. 3, Russian River Register, 424 p.
6. Kuzmin A.V. *Raschety prochnosti detaley mashin: Sprav. Posobie.* [Strength calculation for machinery parts. A reference book]/ A.V. Kuzmin, I.M. Chernin, B.S. Kozintsov — Mn.: Vysh. shk., 1986. — 400 p.
7. Kogaev V.P. *Raschet detaley mashin i konstruktsiy na prochnost i dolgovechnost: Spravochnik* [Strength and durability calculations for machinery and structures parts. A reference guide]/ V.P. Kogaev, N.A. Mahutov, A.P. Gusenkov — M.: Mashinostroenie, 1985. — 224 p.
8. Rumb V.K. *Prochnost sudovogo oborudovaniya. Konstruirovaniye i raschety prochnosti sudovyh valoprovodov: uchebnik* [Strength of ship equipment. Design and calculations of ship shafting. A textbook]/ V.K. Rumb — SPB, 2008. — 298 p.
9. *Eksperimentalnaya mekhanika:* V 2-kh knigakh: Kniga 1. [Handbook on experimental mechanics In 2 vols. Vol. 1] Per. s angl./ed. A. Kobayashi.— M.: Mir, 1990. — 616 p.
10. *Eksperimentalnaya mekhanika:* V 2-kh knigakh: Kniga 2. [Handbook on experimental mechanics In 2 vols. Vol. 2] Per. s angl./ed. A. Kobayashi. — M.: Mir, 1990. — 552 p.

УДК 621.438

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОГО АГРЕГАТА

М.Н. Буров, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», ПАО «ОДК «Сатурн»», Рыбинск, e-mail: maxim.burov@uec-saturn.ru
В.А. Пономарев, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», ПАО «ОДК – Сатурн», Рыбинск, e-mail: prep56@mail.ru
М.Ю. Владимиров, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», Рыбинск, e-mail: vladimirov.mikhail82@gmail.com

В статье рассмотрен метод определения затрат на эквивалентно-циклические испытания, которые подтверждают требуемую наработку на отказ корабельного ГТД, устранимый в эксплуатации, обеспечивающий заданную вероятность безотказной работы газогазотурбинного агрегата. Выполнено сравнение затрат для различных вариантов ГТД и вариантов энергоустановки на их основе. Методика расчета безотказности комбинированной или всережимной газотурбинной установки реализована с помощью модели надежности на основе непрерывной однородной марковской цепи, для которой решалась система дифференциальных уравнений надежности ГТА — система уравнений Колмогорова. Даны рекомендации по определению количества газо-часов, которые должны отработать ГТД в процессе предварительных испытаний и (или) опытной эксплуатации, чтобы с заданной доверительной вероятностью обеспечить требуемые наработки на отказ. Приведен пример расчета вероятности безотказной работы ГТА.

Ключевые слова: вероятность безотказной работы, марковская граф-модель надежности, дифференциальные уравнения Колмогорова, наработка на отказ, доверительная вероятность

METHOD FOR DETERMINING THE COSTS TO ENSURE A GIVEN PROBABILITY OF FAILURE-FREE OPERATION OF A GAS TURBINE UNIT

М.Н. Буров, PhD, Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, PJSC UEC-Saturn, Rybinsk, e-mail: maxim.burov@uec-saturn.ru

В.А. Пономарев, PhD, associate professor, Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, PJSC UEC-Saturn, Rybinsk, e-mail: prep56@mail.ru

М.Ю. Владимиров, Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, e-mail: vladimirov.mikhail82@gmail.com

The article considers the method of determining the cost of equivalent-cyclic tests that confirm the required mean time between failures (MTBF) of a ship's gas turbine engine (GTE); with failure eliminated in operation and providing a given probability of failure-free operation of the gas-gas turbine unit. Comparison of costs for different variants of GTE and variants of the power plant based thereon have been carried out. The methodology for calculating the failure-free operation of a combined or all-mode gas turbine unit has been developed using a reliability model based on a continuous homogeneous Markov chain, for which the system of differential equations of GTU reliability — the system of Kolmogorov equations — has been solved. Recommendations have also been given for determining the number of gas-hours to be worked by the GTE during preliminary tests and (or) pilot operation to ensure the required MTBF with a given confidence probability. An example of probability calculation for failure-free operation of GTU has been given.

Keywords: fail-safe performance probability, Markov's reliability graph model, Kolmogorov's differential equations, mean time between failures (MTBF), confidence probability

В настоящей статье описан один из возможных расчетных методов оценки затрат, обеспечивающих заданную вероятность безотказной работы газотурбинного агрегата (ГТА), который позволяет учесть эти затраты в расчете критерия эффективности морских ГТД в составе энергетической установки при выборе их облика, метод расчета которого приведен в [1, 2]. В них за критерий выбора типа ГЭУ принята общая стоимость жизненного цикла (СЖЦ) заданного количества кораблей нескольких классов с фиксированным значением их целевой эффективности. Были рассмотрены шесть вариантов (от А до Ж), в каждом из которых по три версии главной энергетической установки (ГЭУ), сочетающих в себе различные типы ГТД, каждая из которых обеспечивала заданной или избыточной мощностью корабли трех классов: фрегатов, эскадренных миноносцев, ракетных крейсеров. Требование учета влияния схемной надежности корабельной ГЭУ на принятый критерий выбора в этих работах только декларировалось. Предлагалось показатели надежности ГЭУ использовать в качестве дисциплинирующих условий (ограничений). И обеспечивать их для различных вариантов ГЭУ за счет отличающихся затрат к моменту начала серийного производства. Для реализации этого предложения и был разработан описанный ниже метод.

Принимается, что вероятность безотказной работы для всех сравниваемых вариантов ГЭУ, приведенных в [1], должна быть обеспечена на требуемом уровне. Расчет безотказности выполняется в предположении, что ГЭУ работает в режиме обеспечения полного хода корабля, и резервных мощностей нет. Для этого используется методика оценки безотказности корабельной газотурбинной энергетической установки, которая подробно изложена в работе [3]. Принимаем в качестве норматива вероятность безотказной работы ГЭУ $P_{ГЭУ}=0,96$ как в [3]. Так как некоторые из рассмотренных вариантов ГЭУ имеют в своем составе два ГТА, каждый из которых работает на свой вал, то в этом случае вероятность безотказной работы ГТА должна быть равна $P_{арп}=0,98$. Тогда структурная схема для расчета безотказности ГЭУ предполагает последовательное соединение ГТА. И, следовательно, $P_{ГЭУ}=P_{арп}^2=0,96$. Принципиальные схемы ГЭУ и входящих в их состав ГТА для каждого из шести вариантов, которые были упомянуты выше, приведены на рис. 1 и 2, как и в статье [1].

Методика расчета безотказности комбинированной или всережимной газотурбинной установки реализуется на основе непрерывной однородной марковской цепи, размеченный граф (граф-модель) состояний которой показан на рис. 3, в соответствии с [3]. Для нее можно записать систему дифференциальных уравнений надежности ГТА – систему уравнений Колмогорова. В качестве примера приведен расчет вероятности безотказной работы ГТА Аг1ГЭУ варианта А (см. рис. 1). Приняты следующие обозначения состояния ГТА, применяемого на режиме полного хода: S_0 — исправное функционирование всего ГТА; S_1 — отказ одного маршевого ГТД; S_2 — отказ второго маршевого ГТД; S_3 — отказ одного форсажного ГТД; S_4 — отказ второго форсажного ГТД; S_5 — отказ одного маршевого редуктора; S_6 — отказ второго маршевого редуктора; S_7 — отказ одного форсажного редуктора; S_8 — отказ второго форсажного редуктора.

Интенсивность переходов элементов ГТА из работоспособного состояния до состояния отказа рассчитывается по формуле

$$\lambda_{0i} = 1/T_{0i}, \quad (1)$$

где T_{0i} — наработка на отказ элемента ГТА.

Интенсивность переходов элементов ГТА из отказа до работоспособного состояния рассчитывается по формуле

$$\mu_{i0} = 1/T_{0в}, \quad (2)$$

где $T_{0в}$ — время восстановления элемента ГТА.

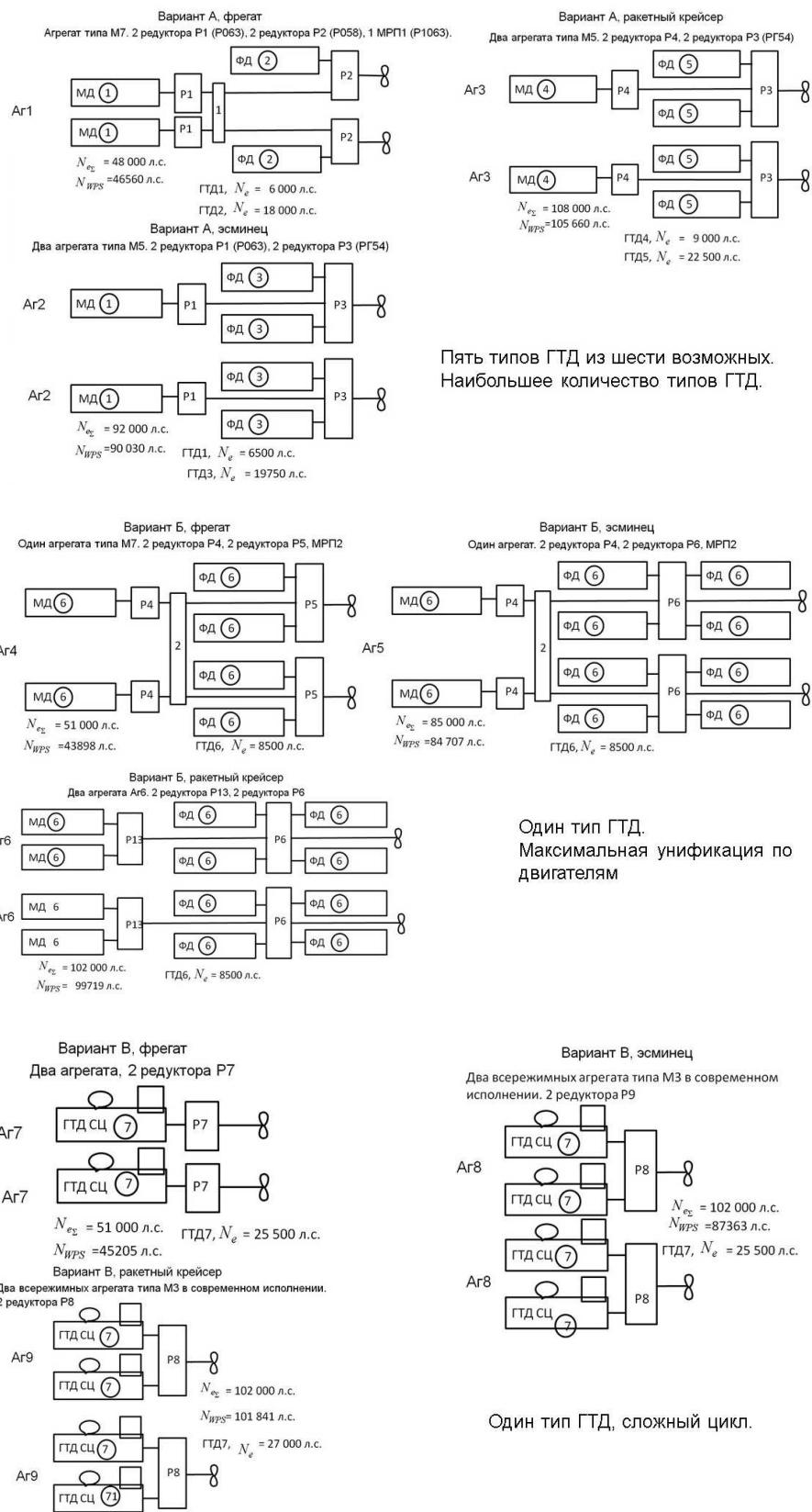


Рис. 1 Схематические изображения агрегатов для вариантов *A*, *B*, *B*'

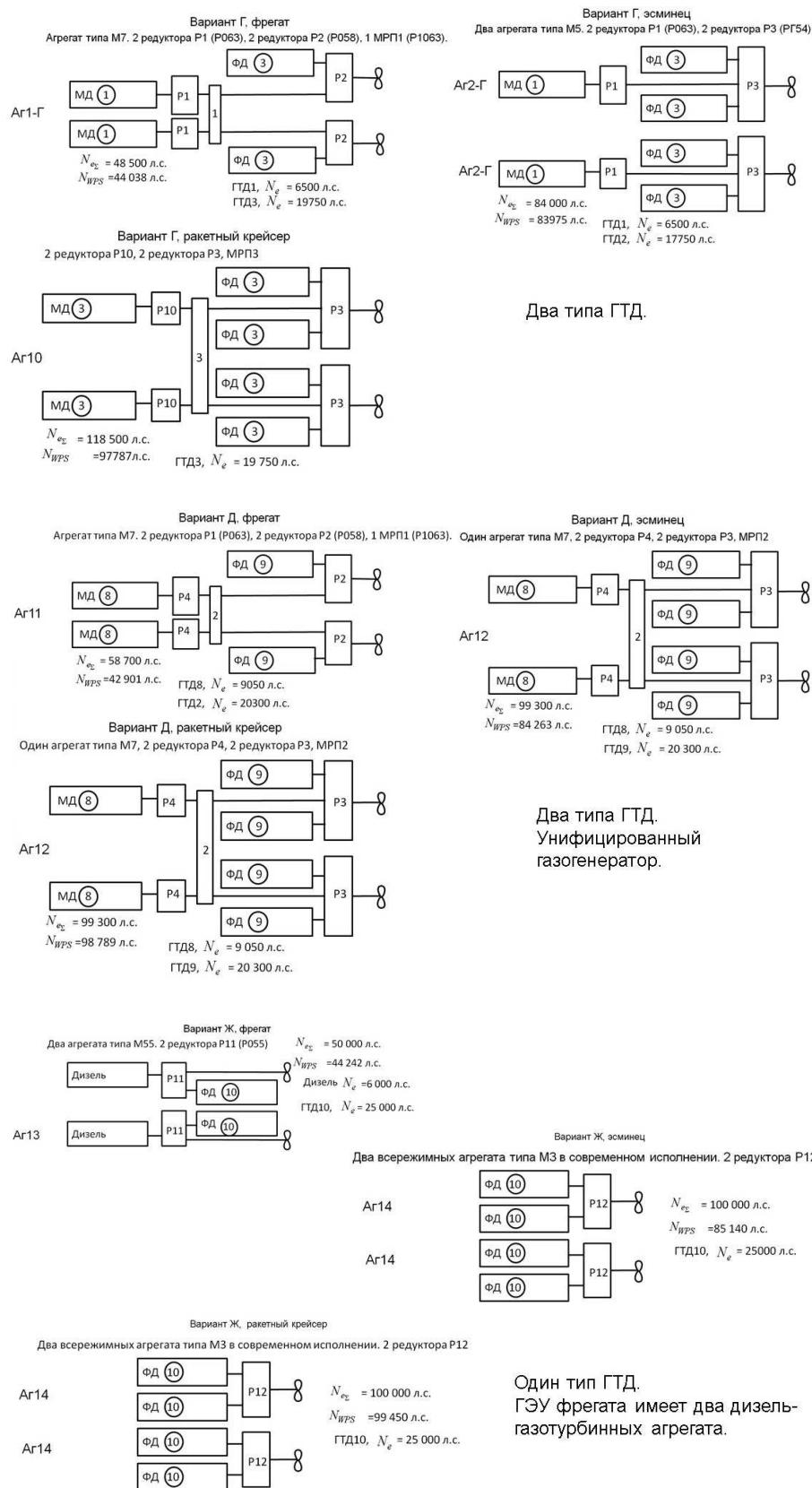


Рис. 2 Схематические изображения агрегатов для вариантов Г, Д, Ж

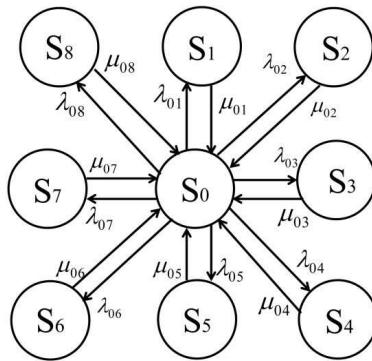


Рис. 3 Граф-состояний для расчета надежности корабельной ГЭУ (вариант A, ГТА Аг1, см. рис. 1) на режиме обеспечения полного хода (номинальный режим работы ГТД)

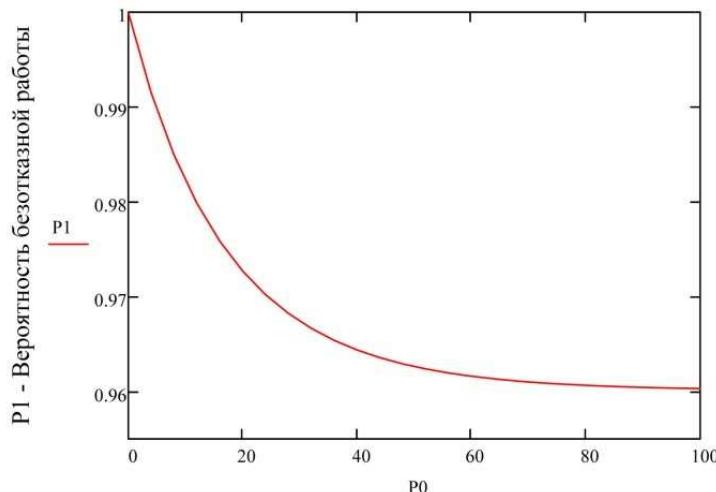
Общее число уравнений равно числу состояний на графе. Система дифференциальных уравнений Колмогорова для расчета $P_{\text{арп}}$ (см. рис. 3) имеет вид

$$\begin{aligned}
 (dp_1)/dt &= (-\lambda_{01} - \lambda_{02} - \dots - \lambda_{07} - \lambda_{08})p_1 + p_2\mu_{10} + p_3\mu_{20} + \dots + p_8\mu_{70} + p_9\mu_{80}; \\
 (dp_2)/dt &= -p_2\mu_{10} + p_1\lambda_{01}; \\
 (dp_3)/dt &= -p_3\mu_{20} + p_1\lambda_{02}; \\
 (dp_4)/dt &= -p_4\mu_{30} + p_1\lambda_{03}; \\
 (dp_5)/dt &= -p_5\mu_{40} + p_1\lambda_{04}; \\
 (dp_6)/dt &= -p_6\mu_{50} + p_1\lambda_{05}; \\
 (dp_7)/dt &= -p_7\mu_{60} + p_1\lambda_{06}; \\
 (dp_8)/dt &= -p_8\mu_{70} + p_1\lambda_{07}; \\
 (dp_9)/dt &= -p_9\mu_{80} + p_1\lambda_{08},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $(dp_i(t))/dt$ — производная вероятности нахождения ГТА в каждом из состояний;
 $p_i(t)$ — вероятности нахождения ГТА в каждом из состояний.

В правые части уравнений системы (3) входят суммы произведений вероятностей состояний на интенсивности переходов. Способ решения системы (3) заимствован из [3]. Результат решения показан на рис. 4. Из него видно, что вероятность безотказной работы стабилизировалась при значении 0,96.

Для обеспечения требуемой вероятности безотказной работы ГЭУ элементы матрицы интенсивности переходов подбираются путем задания наработок на отказ ГТД. Наработки на отказ редукторов приняты одинаковыми и равными 4000 ч для всех вариантов ГЭУ, так как оценивается влияние надежности ГТД на затраты, которые требуются для подтверждения наработки на отказ. Принято по аналогии с [3], что наработка на отказ маршевого ГТД в 1,75 раза больше, чем таковая у форсажного ГТД.



Р0 - Интервал интегрирования системы уравнений.

Рис. 4 Вероятность безотказной работы ГЭУ (вариант A, ГТААг1, рис. 1) на режиме обеспечения полного хода

Для ГТА Аг1ГЭУ варианта A были заданы и подобраны исходные данные, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные для ГТА Аг1 ГЭУ варианта А

Средние (подобранные) наработки до отказа элементов ГТА				
Основные элементы ГТЭУ	Маршевый ГТД	Форсажный ГТД	Маршевый редуктор	Форсажный редуктор
T_{cp} , ч	3675*	2100*	4000	4000
Средняя продолжительность восстановления элементов ГТА				
Время восстановления, ч	10	20	10	20

* — значения подбирались для обеспечения заданного значения вероятности безотказной работы ГЭУ $P_{ГЭУ}=0,96$.

Для всех остальных семи вариантов схем ГЭУ, рассмотренных в [1] и приведенных на рис. 1 и 2, были выполнены аналогичные построения граф-моделей, сформированы системы дифференциальных уравнений Колмогорова.

Результаты подбора наработок на отказ ГТД, которые обеспечивают требуемое значение вероятности безотказной работы ГЭУ на режиме обеспечения полного хода, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения наработок на отказ ГТД, которые входят в состав ГЭУ [1] и обеспечивают требуемую вероятность безотказной работы ГЭУ на режиме обеспечения полного хода

Основные элементы ГТЭУ		Маршевый ГТД	Форсажный ГТД
№ п/п	Схемы ГЭУ (см. рис. 1)	Средние (подобранные) наработки до отказа, ч/отк.	
1	Аг1 варианта A	3675	2100
2	Аг2 варианта A	6125	3500
3	Аг4 варианта B	5950	3400
4	Аг5 варианта B	11200	6400
5	Аг6 варианта B	12600	7200
6	Аг7 варианта B	1300	—
7	Аг8 варианта B	2600	—
Средняя продолжительность восстановления элементов ГТА			
Время восстановления, ч		10	20

Примечание. Далее по тексту схемы ГЭУ будут нумероваться от 1 до 8 согласно табл. 2, так как в вариантах от A до Ж их структуры повторяются, а ГТА отличаются мощностью ГТД.

Далее определим количество газо-часов, которые должны отработать ГТД, чтобы с заданной односторонней доверительной вероятностью γ_1 по методу из [4] обеспечить подобранные наработки на отказ.

По методу расчета, который основан на учете фиксированной суммарной наработки t_{Σ} за определенный календарный период эксплуатации двигателей, случайной величиной является число неисправностей (отказов). В этом случае оно распределяется по закону Пуассона (а наработка до отказа подчиняется, следовательно, экспоненциальному распределению) [4].

Предполагаем, что в процессе предварительных испытаний (ПИ) все разработанные и внедренные мероприятия по устранению выявленных отказов были настолько успешны, что отказов по конструктивно-производственным причинам в процессе межведомственных испытаний (МВИ) не было. И что дополнительные эквивалентно-циклические испытания (ЭЦИ), которые следует провести для обеспечения подобранных наработок на отказ, не будут сопровождаться отказами. Тогда нижняя и верхняя доверительные границы значений показателей T^* , ω^* (или λ^*), P^* вычисляются при $n=0$ (количество отказов) по следующим формулам

$$T_{\text{н}} = t_{\Sigma}/r_0, \quad T_{\text{в}} = \infty; \quad (5)$$

$$\omega_{\text{н}} = 0, \quad \omega_{\text{в}} = r_0/t_{\Sigma}; \quad (6)$$

$$P_{\text{н}} = \exp(-\omega_{\text{в}} t) = \exp\left(-\frac{r_0}{t_{\Sigma}} t\right); \quad (7)$$

$$P_{\text{в}} = \exp(-\omega_{\text{н}} t) = 1.$$

Коэффициент r_0 вычисляется по формуле

$$r_0 = \frac{1}{2} x_{\gamma_1}. \quad (8)$$

Удобно использовать значения, указанные в табл. 3 для определения коэффициента r_0 .

Таблица 3

Значения коэффициента r_0 в зависимости от γ_1 [4]

n	Односторонняя доверительная вероятность γ_1					
	0,999	0,990	0,975	0,95	0,900	0,800
Значения коэффициента r_0						
0	6,91	4,60	3,69	3,00	2,30	1,61

Задавшись значением γ_1 , выбираем из таблицы соответствующее значение r_0 . Далее получаем требуемое количество газо-часов наработки ГТД по выражению

$$t_{\Sigma} = r_0 T_{\text{н}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{н}}$ — нижняя доверительная граница наработки на отказ.

Принимаем, что средние (подобранные) наработки до отказа из табл. 2 соответствуют нижним доверительным границам наработки на отказ для каждой из схем ГЭУ. Занесем в табл. 4 требуемые наработки ГТД, определяемые по формуле (9).

Таблица 4

Результаты определения требуемых наработок без отказа ГТД на эксплуатационных режимах, которые входят в состав ГЭУ, и обеспечивают требуемую вероятность безотказной работы ГЭУ на режиме обеспечения полного хода

Основные элементы ГТЭУ	Маршевый ГТД		Форсажный ГТД	
	Наработки без отказа ГТД на эксплуатационных режимах, ч/отк.			
	$\gamma_1 = 0,8, r_0 = 1,6$	$\gamma_1 = 0,95, r_0 = 3,0$	$\gamma_1 = 0,8, r_0 = 1,6$	$\gamma_1 = 0,95, r_0 = 3,0$
1	5917	11025	3381	6300
2	9861	18375	5635	10500
3	9580	17850	5474	10200
4	18032	33600	10304	19200
5	20286	37800	11592	21600
6	2093	3900	—	—
7	4186	7800	—	—

Определим необходимое количество ЭЦИ. Можем считать известной общую наработку ГТД в процессе ПИ и МВИ — $t_{\text{исп}}$. Наработка на режимах выше $0,8Ne_{t_{\text{н.р}}}$ тоже известна.

Доля повышенных режимов выше $0,8Ne$ составляет: $r_{\text{исп}} = t_{\text{н.р}}/t_{\text{исп}}$, а по техническим условиям в эксплуатации на корабле эта доля равна $r_{\text{т.у}}$. Расчет приведенной эквивалентной наработки при испытаниях ГТД на условиях нормальной эксплуатации производится по формуле

$$t_{\text{ГТД}_{\text{прив}}} = t_{\text{исп}}(r_{\text{т.у}}/r_{\text{исп}})^{-\varphi}, \quad (10)$$

где φ — статистический коэффициент, равный 0,5.

В подтверждение требуемой для обеспечения заданной вероятности безотказной работы главной энергетической установки наработка на устранимый в эксплуатации отказ $T_{\text{ОУЭ}_{\text{ГТД}}}$ ЭЦИ производятся в объеме $T_{\text{ЭЦИ}}$ часов. Наработка на номинальном режиме за время проведения ЭЦИ составляет $T_{\text{ЭЦИ}_{\text{н.р}}}$ часов. Расчет приведенной эквивалентной наработки при ЭЦИ ГТД на условиях нормальной эксплуатации производится по аналогичной формуле

$$t_{\text{ЭЦИ}_{\text{прив}}} = T_{\text{ЭЦИ}}(r_{\text{т.у}}/r_{\text{ЭЦИ}})^{-\varphi}, \quad (11)$$

где $r_{\text{ЭЦИ}} = T_{\text{ЭЦИ}_{\text{н.р}}}/T_{\text{ЭЦИ}}$.

Количество требуемых ЭЦИ может быть больше одного и равно k . Искомое значение наработки для подтверждения найденного значения $T_{\text{ОУЭ}_{\text{ГТД}}}$ определим по выражению

$$t_{\Sigma} = t_{\text{ГТД}_{\text{прив}}} + kt_{\text{ЭЦИ}_{\text{прив}}}. \quad (12)$$

Значение k подбирается так, чтобы обеспечить требующуюся величину t_{Σ} . Пример определения потребного количества ЭЦИ для ГТА Аг1 варианта *Ac* принятыми значениями $t_{\text{исп}}$, $r_{\text{исп}}$, $r_{\text{т.у}}$, $r_{\text{ЭЦИ}}$, $T_{\text{ЭЦИ}}$ (значения носят сугубо модельный характер) приведен в табл. 5.

Таблица 5
Расчет требуемого количества ЭЦИ (k) для обеспечения требуемой величины t_{Σ} для ГТА Аг2 варианта *A*

	Маршевый ГТД		Форсажный ГТД	
Доверительные вероятности и коэффициенты r_0	$\gamma_1=0,8, r_0=1,6$	$\gamma_1=0,95, r_0=3,0$	$\gamma_1=0,8, r_0=1,6$	$\gamma_1=0,95, r_0=3,0$
Требуемое значение t_{Σ} из таблицы 4, ч	9861	18375	5635	10500
$t_{\text{исп}} = 1700$ часов, $r_{\text{исп}} = 0,25$, $r_{\text{ЭЦИ}} = 0,32$, $T_{\text{ЭЦИ}} = 340$ часов				
$r_{\text{т.у.}}$	0,0185	0,0185	0,035	0,035
$t_{\text{ГТД}_{\text{прив}}}$, ч	6249	6249	4543	4543
$t_{\text{ЭЦИ}_{\text{прив}}}$, ч	1414	1414	1028	1028
k	2,554	8,575	1,062	5,794
$t_{\Sigma\text{расчитаное}}$, ч	9861	18375	5635	10500

Положительное значение требуемых ЭЦИ (k) получается при условии $t_{\text{ГТД}_{\text{прив}}} < t_{\Sigma}$. Если $t_{\text{ГТД}_{\text{прив}}} > t_{\Sigma}$ значение k при расчете получается отрицательным. Это значит, что для обеспечения требуемой наработки на отказ проведение ЭЦИ не требуется.

Результаты расчета количества ЭЦИ для остальных схем ГЭУ помещены в табл. 6. Отрицательные значения k заменены нулями.

Таблица 6

Результаты определения потребного количества ЭЦИ (к) для обеспечения требуемых наработок на отказ ГТД, которые входят в состав ГЭУ, и обеспечивают требуемую вероятность безотказной работы ГЭУ на режиме обеспечения полного хода

Основные элементы ГТЭУ	Маршевый ГТД		Форсажный ГТД	
	$\gamma_1 = 0,8, r_0 = 1,6$	$\gamma_1 = 0,95, r_0 = 3,0$	$\gamma_1 = 0,8, r_0 = 1,6$	$\gamma_1 = 0,95, r_0 = 3,0$
1	0	3,377	0	1,709
2	2,554	8,575	1,062	5,794
3	2,355	8,204	0,905	5,502
4	8,333	19,342	5,603	14,256
5	9,927	22,312	6,856	16,591
6	0	0	0,000	0,000
7	0	1,097	0,000	1,478

Затраты на ПИ и МВИ учитываются в затратах на ОКР. Дополнительными, которые ищутся с помощью предлагаемого метода, являются затраты на те ЭЦИ, которые не входят в МВИ. Определим эти затраты, которые требуются для обеспечения заданной наработки на отказ ГТД в составе ГТА, по формуле

$$C_{H_{GTD}} = k \cdot \Pi_{GTD} / 2 + k \cdot (T_{ЭЦИ} \cdot G_{ГЧ} + G_{T_{ЭЦИ}} + \Pi_T), \quad (13)$$

где Π_{GTD} — цена ГТД;

$G_{ГЧ}$ — себестоимость газо-часа ЭЦИ;

$G_{T_{ЭЦИ}}$ — затраты топлива на проведение ЭЦИ, т;

Π_T — цена тонны топлива.

Учитывается половина цены ГТД, так как ЭЦИ соответствуют межремонтному ресурсу ГТД, который равен половине назначенного ресурса. В дальнейших расчетах принята за единицу цена ГТД № 1, наименьшая из всех, перечисленных в [1]. Стоимость газо-часа ЭЦИ в этом случае составила 0,00083 стоимости эталонного ГТД.

В рассмотренных ГТА, схемы которых показаны на рис. 1 и 2, используется двенадцать маршевых и форсажных ГТД. Результаты расчета затрат по формуле (13) приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчета затрат, обеспечивающих заданную вероятность безотказной работы ГГТА
в условных ценах (цена ГТД № 1 из [1])

№ ГТД	Цена ГТД	$C_{H_{GTD}}$ при $\gamma_1 = 0,8$	$C_{H_{GTD}}$ при $\gamma_1 = 0,95$	Варианты	$C_{H_{GTD}}$ для вариантов	
					$\gamma_1 = 0,8$	$\gamma_1 = 0,95$
1	1,00	2,264	7,600			
2	1,82	0,000	2,557			
3	1,86	1,651	9,012	A	8,28	37,29
4	1,29	2,715	9,115			
5	1,94	1,650	9,002			
6	1,25	10,081	22,659	Б	10,08	22,66
7	1,85	0,000	1,616	В	0,00	1,62
8	1,67	2,350	7,891	Г	5,45	18,67
9	1,67	3,095	10,780			
10	1,27	2,431	8,468	Д	3,68	16,04
11	1,71	1,246	7,573			
12	1,84	0,000	1,636	Ж	0,00	1,64

Оценка целесообразности дальнейшей разработки одного из вариантов по результатам затрат, которые обеспечивают заданную вероятность безотказной работы ГГТА, может быть выполнена путем сравнения этих затрат с ценой ГТД № 1 (см. табл. 7 и рис. 5).

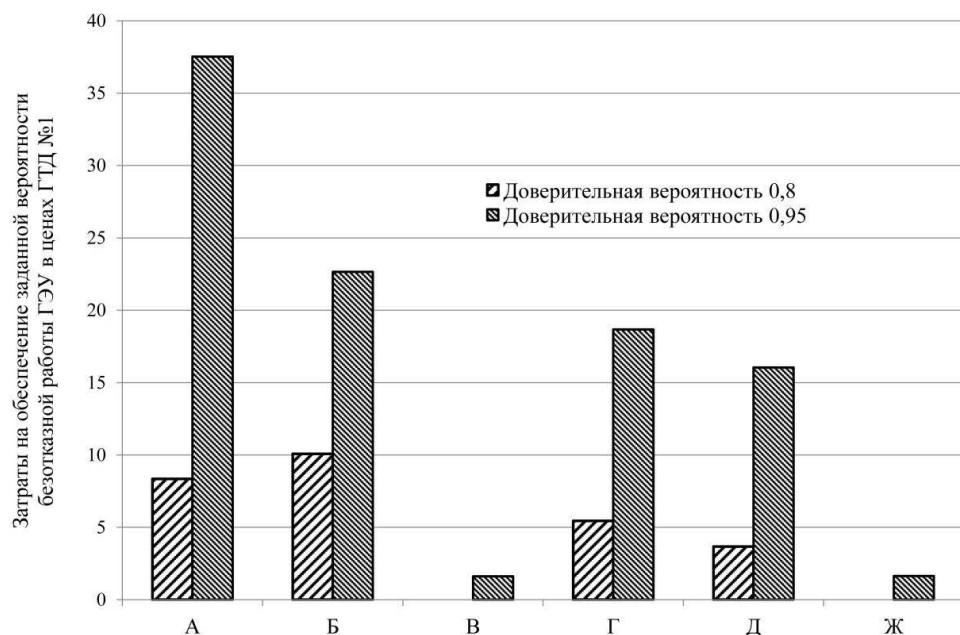


Рис. 5 Сравнение вариантов по затратам в ценах ГТД № 1

Можно сделать два вывода. Во-первых, добиваться вероятности безотказной работы ГТА $P=0,96$ с доверительной вероятностью 0,95 не целесообразно. Затраты для вариантов *А*, *Б*, *Г* и *Д* получаются в разы больше, чем в случае с доверительной вероятностью 0,8. Во-вторых, из вариантов с ГТД V поколения, вариант *Б* [1] во всех случаях самый затратный со значениями 10 и 22,66 для доверительных вероятностей 0,8 и 0,95. Представляется, что этого достаточно для исключения его из дальнейшего рассмотрения. Для окончательного выбора варианта следует принимать во внимание СЖЦ только вариантов *В*, *Г*, *Д* и *Ж*, приведенные в [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буров М.Н., Пономарев В.А. Использование однокритериальной оценки эффективности морских ГТД в составе энергетической установки для выбора их облика. — Вестник РГАТУ, Рыбинск, РГАТУ, 2020. — № 3(54) — с. 27 — 38.
2. Буров М.Н., Пономарев В.А. Метод расчета критерия эффективности морских ГТД в составе энергетической установки при выборе их облика. — Вестник РГАТУ, Рыбинск, РГАТУ, 2020. — № 4(55) — с. 3 — 12.
3. Рыбалько В.В. Оценка безотказности корабельной газотурбинной энергетической установки. — Газотурбинные технологии. Декабрь 2016, с. 44 — 46
4. Руководство по определению надежности изделий авиационной техники при их разработке, испытаниях и эксплуатации. Часть IV, выпуск 41000. — М.: МАП, МГА, ЦИАМ, 1972, 107 с.

REFERENCES

1. Burov M.N., Ponomarev V.A. *Ispolzovanie odnokriterialnoy otsenki effektivnosti morskikh GTD v sostave energeticheskoy ustanovki dlya vybora ikh oblika* [Application of single-criteria evaluation of marine GTEs efficiency as part of the powerplant to choose their configuration]. — RGATU Bulletin, Rybinsk, RGATU — 2020. — No. 3(54), pp. 27 — 38.
2. Burov M.N., Ponomarev V.A. *Metod rascheta kriteriya effektivnosti morskikh GTD v sostave energeticheskoy ustanovki pri vybore ikh oblika* [Method of calculating the efficiency criterion of marine gas turbine engines as part of a power plant when choosing their appearance]. — Bulletin of RGATU, Rybinsk, RGATU — 2020. — No. 4(55) — pp. 3 — 12.
3. Rybalko V.V. *Otsenka bezotkaznosti korabel'noy gazoturbinnoy energeticheskoy ustanovki* [Reliability assessment of the marine gas-turbine powerplant]. — Gas turbine engineering. December 2016, pp. 44 — 46.
4. *Rukovodstvo po opredeleniyu nadezhnosti izdeliy aviationskoy tekhniki pri ikh razrabotke, ispytaniyakh i ekspluatatsii* [Guide for determining the reliability of aeronautical engineering products in their development, testing and operation]. Part IV, issue 41000. — M.: MAP, MGA, CIAM, 1972, 107 p.

УДК: 629.12

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

М.Н. Покусаев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, e-mail: evt@astu.org

Т.В. Хоменко, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, e-mail: asoiu@astu.org

М.М. Горбачев, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, e-mail: max9999_9@mail.ru

Крутильные колебания, несмотря на все применяемые проектные и технические решения, остаются одной из причин опасных аварий судовых машинно-движительных комплексов. Применение демпферов позволяет снизить риск развития крутильных колебаний, но сами демпферы должны периодически подвергаться процедуре оценки технического состояния для проверки эффективности их работы и отсутствия повреждений. Подобные процедуры проводятся через каждые 10000 — 15000 ч и в межинспекционный период остается опасность возникновения аварии в случае отказа демпфера. В исследовании предлагается производить постоянный (или с короткими перерывами) мониторинг крутильных колебаний и перейти к оценке технического состояния демпферов по факту, а не по регламенту. Цель исследования состоит в повышении безопасности мореплавания и снижении рисков возникновения усталостных разрушений элементов МДК из-за развития опасных крутильных колебаний путем внедрения систем мониторинга. Исследование имеет практическое приложение и направлено (в конечном итоге) на сравнительный анализ данных, полученных путем кратковременных измерений крутильных колебаний при помощи традиционных систем и длительных измерений при помощи разработанного авторами экспериментального образца системы мониторинга крутильных колебаний. В качестве объектов для исследований были выбраны: лабораторный стенд испытательного центра "MTS" ФГБОУ ВО «АГТУ», морской бункеровщик проекта "Turcas" и морской буксир проекта "Damen ASD Tug 3110". Результаты исследования показали, что мониторинг крутильных колебаний позволяет говорить о получении более полной информации по развитию крутильных колебаний на нерезонансных частотах, на переходных режимах пуска и остановки ГД, по сравнению с информацией, полученной при традиционной процедуре торсиографирования. Внедрение систем мониторинга крутильных колебаний, следовательно, позволит повысить безопасность мореплавания и снизить риски возникновения аварий с машинно-движительными комплексами.

Ключевые слова: безопасность мореплавания, мониторинг крутильных колебаний, система мониторинга, надежность судового валопровода, тензометрирование, резонанс опасных колебаний, судовой машинно-движительный комплекс, отказ валопровода

USE OF TORSIONAL VIBRATION MONITORING SYSTEMS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF MARINE PROPULSION SYSTEMS

М.Н. Pokysaev, DSc, professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, e-mail: evt@astu.org

Т.В. Khomenko, DSc, professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, e-mail: asoiu@astu.org

М.М. Gorbachev, PhD, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, e-mail: max9999_9@mail.ru

Torsional vibrations, despite all the design and technical solutions used, remain the cause of dangerous accidents of ship engine-propulsion systems (EPS). The use of dampers reduces the risk of torsional vibrations, but the dampers themselves must be periodically subjected to a technical condition assessment procedure to check the effectiveness of their work and the absence of structural damage. Such procedures are carried out every 10000 — 15000 h and during the inter-inspection period there is a risk of an accident in the event of a damper failure. The study proposes to carry out continuous (or with short breaks) monitoring of torsional vibrations and move on to assessing the actual technical condition of dampers instead of that according to regulations. The purpose of the study is to increase the safety of navigation and reduce the risks of fatigue failures of the elements of the EPS due to the development of dangerous torsional vibrations by implementing systems for monitoring them. The study has a practical application and is ultimately aimed at a comparative analysis of data obtained by short-term measurements of torsional vibrations using traditional systems and long-term measurements using the experimental model of the torsional vibration monitoring system developed by the authors. As objects for research, the laboratory stand of the MTS testing center of the Federal State Budgetary Educational Institution "ASTU", the marine bunkering ship of the "Turcas" project and the sea tug of the Damen ASD Tug 3110 project have been used. The results of the study show that the monitoring of torsional vibrations allows us to obtain more complete information on the development of torsional vibrations at non-resonant frequencies, at transient modes of starting and stopping the ME, compared with the information obtained with the traditional torsiography procedure. The introduction of torsional vibration monitoring systems, therefore, will improve the safety of navigation of ships and reduce the risks of accidents with EPS.

Keywords: safety of navigation, monitoring of torsional vibrations, monitoring system, reliability of the ship's shaft line, strain measurement, resonance of dangerous vibrations, ship engine and propulsion system, prevention of destruction of the shafting

ВВЕДЕНИЕ

Снижение величины крутильных колебаний, возникающих в судовых установках, остается задачей, актуальность которой подтверждается как наличием требований в правилах классификационных обществ, так и случаями аварийных усталостных разрушений коленчатых валов дизелей, гребных, промежуточных валов, упругих муфт, редукторов и других элементов машинно-двигательных комплексов (далее — МДК). Использование силиконовых и пружинных демпферов позволяет снизить риски возникновения аварий из-за крутильных колебаний, но не исключают их полностью. Торсиографирование (или тензометрирование), которое производится для оценки опасности развития крутильных колебаний в судовых МДК и диагностики технического состояния силиконовых демпферов имеет периодический характер, с достаточно продолжительным межиспекционным временным промежутком (до 15000 ч), что не дает гарантии возникновения аварийных отказов судового МДК в данный период. Проведенные с 2001 года испытательным центром "MTS" ФГБОУ ВО «АГТУ» (далее ИЦ "MTS", имеющий свидетельства об аккредитации РС № 1970329.141 от 11.10.2019 года и РКО № 10723 от 25.11.2022 года) исследования дают основание говорить, что кратковременное торсиографирование (или тензометрирование) не учитывает опасность развития суммарных амплитуд крутильных колебаний на нерезонансных частотах, на динамических переходных процессах пуска и остановки ГД, на отдельных режимах работы МДК с гребными винтами регулируемого шага и т.д. Многие специалисты отмечают наличие неучтенных факторов при измерениях крутильных колебаний, что дает дисперсию результатов в одной и той же судовой установке в пределах до 15 % при одних и тех же режимах работы [1, 2, 3, 4, 5]. В тоже время, применение длительных измерений крутильных колебаний существующими аппаратными программными комплексами может быть затруднительно по следующим причинам: системы, изготовленные около 20 лет назад, часто не имеют таких функций, как запись на цифровые носители и передача данных по сети Интернет. Некоторые измерительные системы имеют ограничение по объему регистрируемых данных, что не позволяет анализировать результаты длительных измерений из-за отказа программного обеспечения при обработке файлов с объемом более 10 Мб (этот факт можно получить при работе с тензометрическим комплексом "Astech Electronics" (Великобритания) [6] с ограничением объема данных до 1 млн шт. измерительных точек). Решением указанной проблемы является применение постоянного мониторинга крутильных колебаний при помощи систем, разработанных на базе более современных электронных компонентов.

Цель настоящего исследования состоит в повышении безопасности мореплавания и снижения рисков возникновения усталостных разрушений элементов МДК из-за развития опасных крутильных колебаний путем внедрения систем мониторинга.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Мониторинг крутильных колебаний можно сравнить с длительным наблюдением за параметрами сердца человека при помощи прибора Холтера. Полученные результаты длительного мониторинга позволяют охватить все возможные режимы работы судового МДК, включая переходные, получить большое количество данных для статистической обработки с более высокой точностью, чем при кратковременных измерениях и фактически разработать «цифровой двойник» процесса развития крутильных колебаний в валопроводе конкретного судна. Основная задача исследования состояла в практическом использовании длительного мониторинга крутильных колебаний в судовых и лабораторных условиях и анализе полученных результатов.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Функциональная схема системы мониторинга крутильных колебаний была разработана авторами при реализации гранта по программе «СТАРТ-1» предоставленного ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» на тему: «Разработка прототипа системы мониторинга крутильных колебаний главных энергетических установок судов», договор № 3896ГС1/63243 от 24.12.2021 года.

Функциональная схема представлена на рис. 1 [7] и разделена на две области — мониторинг крутильных колебаний и мониторинг технического состояния таких элементов МДК, как: силиконовый или пружинный демпфер, упругая муфта, которые оказывают непосредственное влияние на развитие опасных крутильных колебаний.

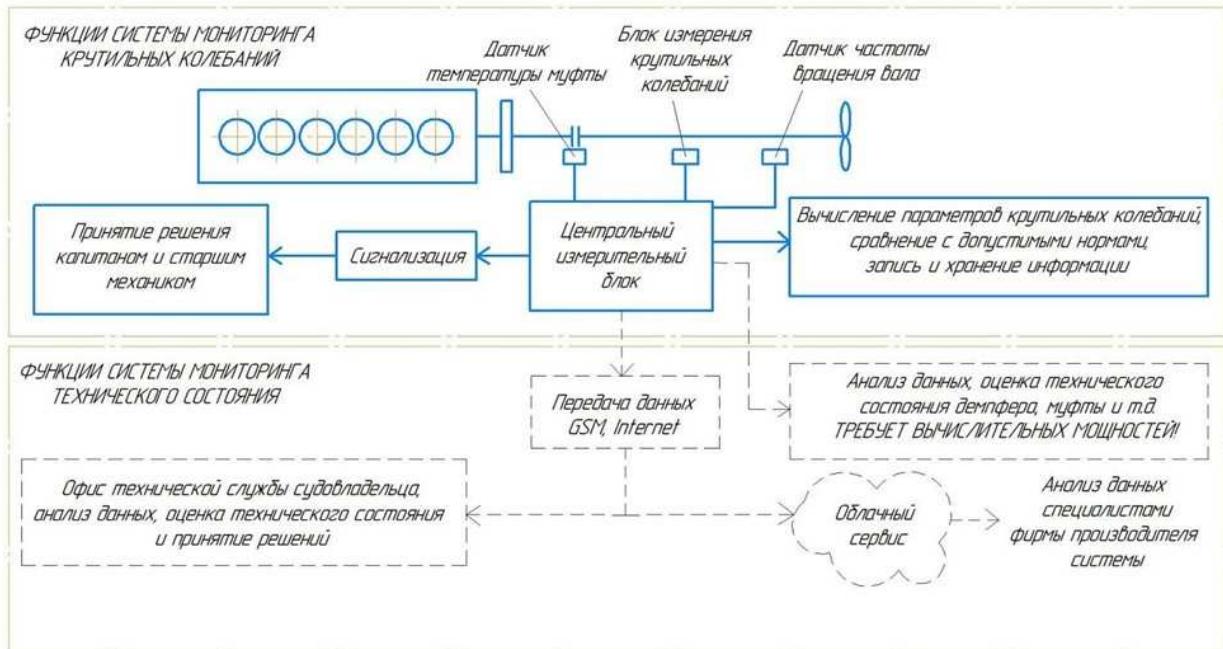


Рис. 1 Функциональная схема системы мониторинга крутильных колебаний и технического состояния элементов судового МДК

Практическая реализация предлагаемой системы мониторинга крутильных колебаний в виде экспериментального образца была осуществлена авторами по следующей схеме.

1. Определение технической и экономической целесообразности установки системы мониторинга для конкретных судов при помощи разработанной методики оценки рисков на базе рекомендуемой Международной морской организацией процедуры Формализованной оценки безопасности (ФОБ) [8].

2. Анализ существующих методов измерения крутильных колебаний в МДК и выбор из них наиболее применимых на судах.

3. Проектирование и изготовление нескольких экспериментальных образцов (моделей) системы мониторинга для отработки всех функциональных возможностей и проверки выбранных методов измерения крутильных колебаний на практике.

4. Лабораторные и натурные испытания экспериментальных образцов системы мониторинга.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате были проведены лабораторные и пробные натурные испытания с экспериментальным образцом системы мониторинга крутильных колебаний, позволяющим производить измерения следующих параметров: напряжение в валу (при помощи тензорезисторов); температура поверхности упругой муфты (пиromетрическим датчиком); частота вращения валопровода (индуктивным датчиком) и возможность расчета на основе измеренных параметров таких показателей как: крутящий момент и мощность установки. В функциональные возможности экспериментального образца системы мониторинга входили: измерение параметров; выдача данных на дисплей оператора; сравнение измеренных значений напряжений с допускаемыми по требованиям правил РС; хранение информации на карте памяти.

Достоверность результатов измерений была подтверждена при помощи сравнительных испытаний разработанного авторами экспериментального образца системы мониторинга и поверенного тензометрического комплекса «Астеч Электроникс» на лабораторном стенде ИЦ "MTS" (см. рис. 2), результаты приведены в табл. 1.

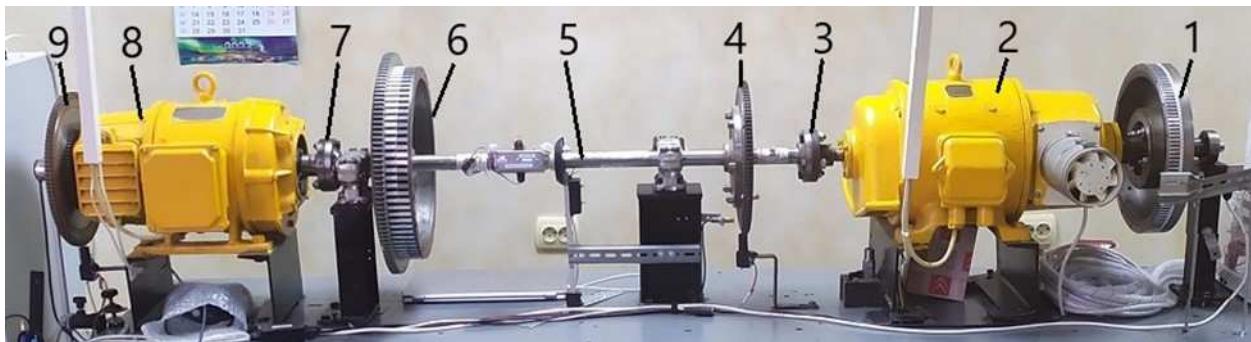


Рис. 2 Общий вид лабораторного стенда ИЦ "MTS"

В состав лабораторного стенда согласно рис. 2 входят (нумерация элементов стенда начинается с демпфера для соответствия крутильной схеме): 1 — демпфер КК (на фото представлен корпус); 2 — электродвигатель постоянного тока; 3 — муфта № 1; 4 — малый маховик № 1; 5 — вал; 6 — большой маховик; 7 — муфта № 2; 8 — генератор постоянного тока; 9 — малый маховик № 2.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний экспериментального образца системы мониторинга и поверенного тензометрического комплекса «Астеч Электроникс» на лабораторном стенде ИЦ "MTS"

Частота, Гц	Напряжения по измерениям «Astech Electronics», МПа	Напряжения по измерениям системы мониторинга, МПа	Отличие результатов, %
27,78	1,33	1,39	3,68
27,03	2,52	2,63	4,82
26,32	3,20	3,15	0,41
25,64	2,48	2,60	2,84
25	2,07	2,17	1,69

После проведения лабораторных исследований и тарировки, экспериментальный образец системы мониторинга был испытан на морском бункеровщике проекта "Turcas".

Согласно приведенной на рис. 3 принципиальной схеме в состав судового МДК бункеровщика входят: 1 — пружинный демпфер; 2 — главный двигатель (далее — ГД) MAN B&W 8L27/38 (с номинальной мощностью 2720 кВт и номинальной частотой вращения 800 мин⁻¹); 3 — маховик; 4 — муфта Vulkan Vulastik-L-3010; 5 — редуктор 48VO22 с передаточным отношением 4,82 на валовую линию гребного винта (на передний ход); 6 — вал проставной; 7 — муфта; 8 — гребной вал (место установки тензометрических датчиков); 9 — опорный подшипник; 10 — дейдвудный подшипник; 11 — гребной винт регулируемого шага; 12 — вал привода валогенератора; 13 — муфта отбора мощности на валогенератор; 14 — валогенератор.

Примеры полученных результатов длительного мониторинга крутильных колебаний (тензограммы) представлены на рис. 4 — 7 на разных режимах работы судового МДК.

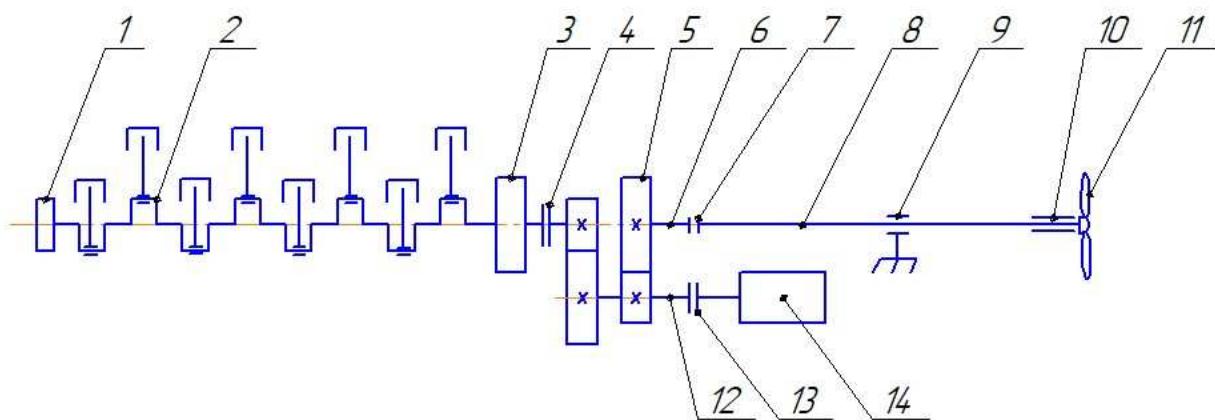


Рис. 3 Принципиальная схема МДК судна типа «бункеровщик» проекта "Turcas" (разработано авторами)



Рис. 4 Тензограмма при пуске ГД (разработано авторами)

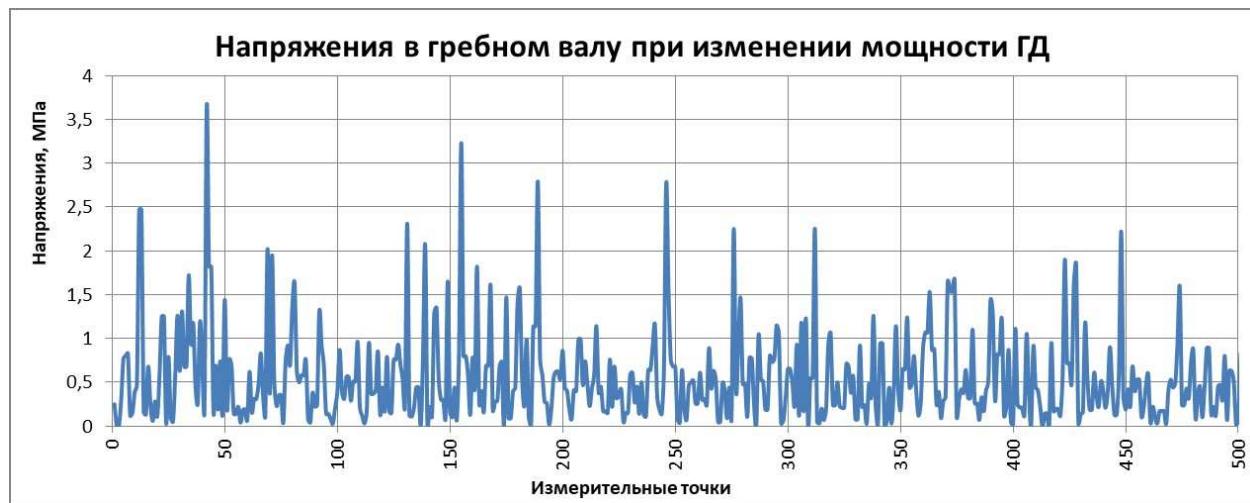


Рис. 5 Тензограмма при изменении мощности ГД (разработано авторами)

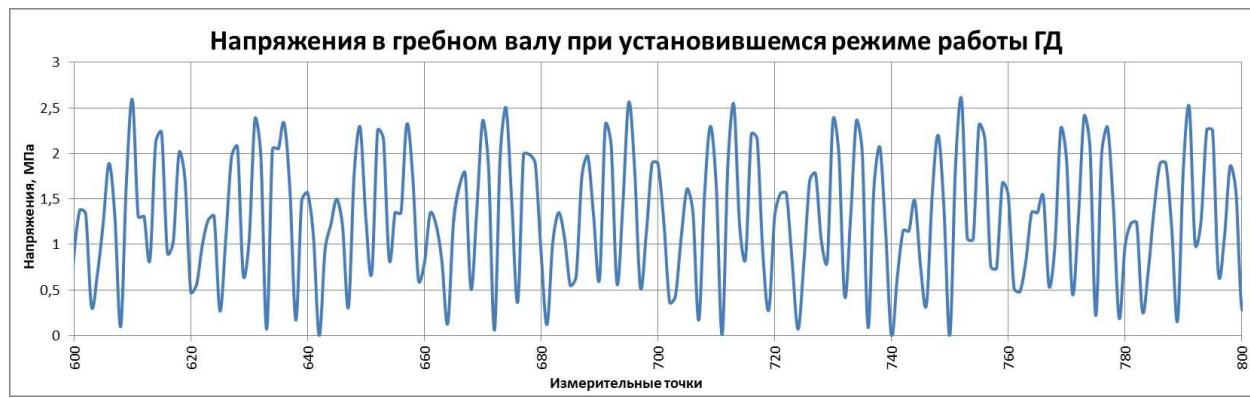


Рис. 6 Тензограмма на установившемся режиме работы ГД (разработано авторами)



Рис. 7 Тензограмма при остановке ГД (разработано авторами)

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Длительный мониторинг крутильных колебаний в течение месяца позволил (с возможностью между рейсами судна обеспечения подзарядки аккумуляторов измерительных блоков экспериментального образца системы мониторинга) получить 11 тензограмм с работой МДК на разных режимах и в разных условиях эксплуатации судна. Как видно из рис. 8 максимальные напряжения наблюдаются при пуске и остановке ГД. Однако, из рис. 8 видно, что при работе МДК на номинальной частоте вращения есть периоды с повышенными напряжениями, так как в данное время кратковременно был изменен шаг гребного винта без изменения частоты вращения ГД. Такие режимы при контрольном торсографировании (тензометрировании) могут быть пропущены при анализе специалистами испытательных лабораторий, так как подобное сочетание шага гребного винта, частоты вращения и мощности ГД носит вероятностный характер.



Рис. 8 Полная тензограмма (при измерении в течение 52 мин) (разработано авторами)

По результатам зафиксированных максимальных напряжений (в рейсах с близкими режимами работы МДК и мощностью ГД) была построена столбчатая диаграмма, представленная на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что максимальные напряжения в гребном валу в среднем составляют от 8 до 9 МПа, что не превышает допустимые значения, согласно расчету крутильных колебаний по правилам РС [9]. Полученные результаты (см. рис. 9) позволяют оценить дисперсию величины напряжений, которые наблюдаются в гребном валу на уровне 11 %, что подтверждает данные по разнице результатов измерений крутильных колебаний на одной и той же установке при одних и тех же режимах работы, приведенные в исследованиях [1, 2].

Далее были проанализированы тензограммы при пуске и остановке МДК. Как видно из рис. 4 и 7 наибольшие напряжения в гребном валу возникают именно на режимах пуска и остановки, что вероятно

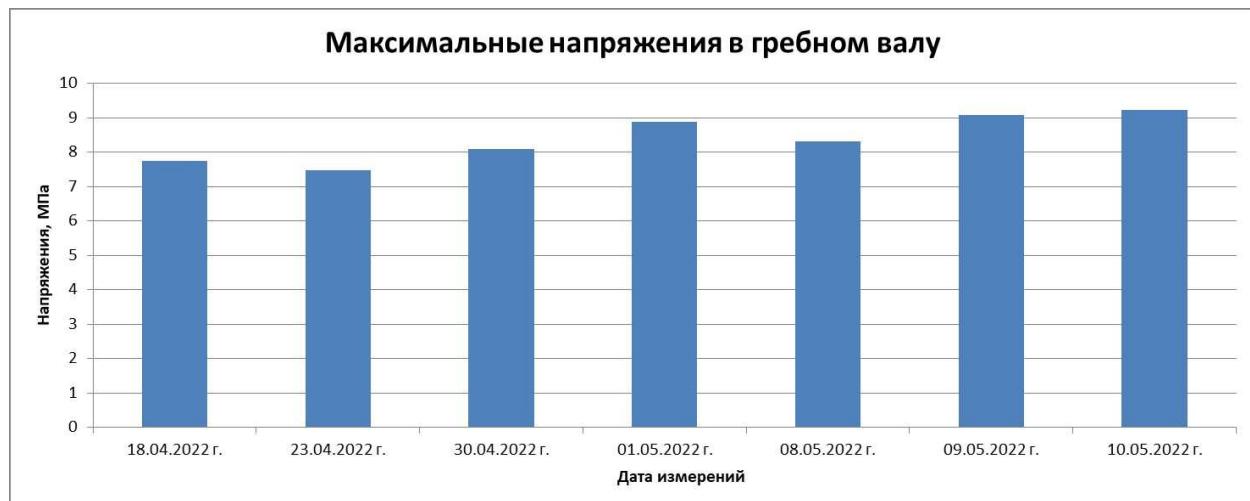


Рис. 9 Максимальные напряжения в гребном валу, зафиксированные экспериментальным образцом системы мониторинга крутильных колебаний (разработано авторами)

связано с большим моментом инерции гребного винта (его диаметр составляет 3,6 м) и наличием редукторной передачи.

Отметим, что подобные тензограммы, полученные уже при помощи комплекса «Астеч Электроникс» (Великобритания) на МДК буксира проекта "Damen ASD Tug 3110" с (см. рис. 10) показывают также рост амплитуд крутильных колебаний на стадиях пуска и остановки ГД более чем в 5 раз, чем при номинальном режиме. В состав МДК правого и левого борта буксира проекта "Damen ASD Tug 3110" входят: ГД марки CAT3516B, промежуточный вал, винторулевая колонка Aquamaster US 2001.

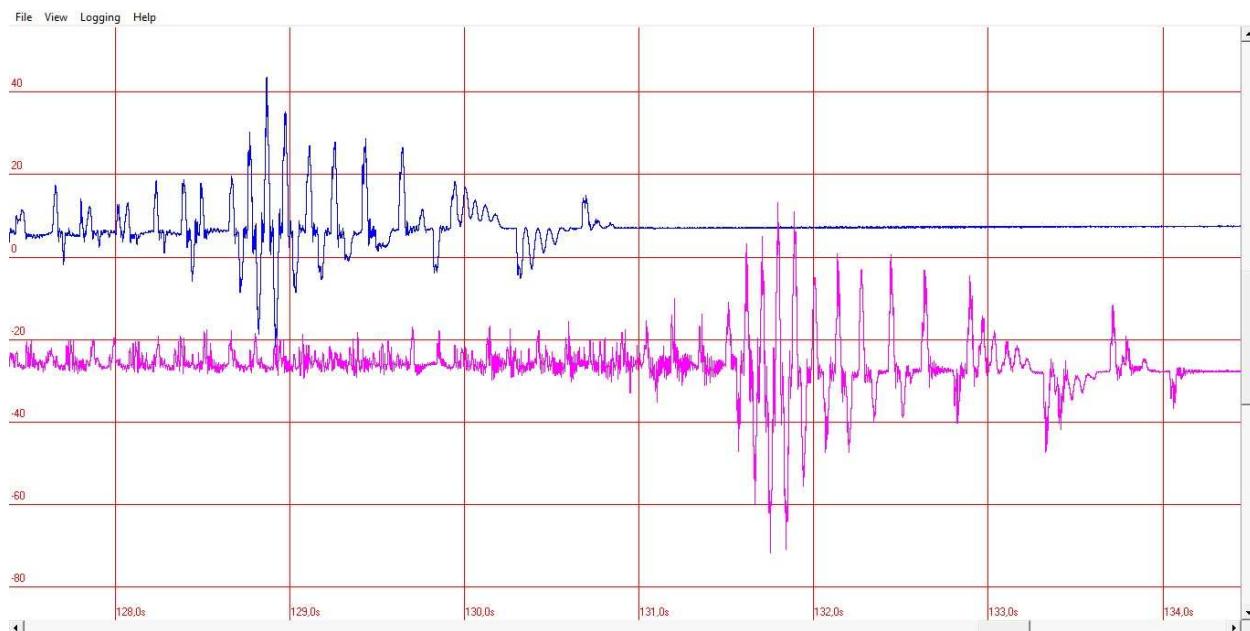


Рис. 10 Тензограмма МДК буксировщика проекта "Damen ASD Tug 3110" при остановке ГД (верхний график — для МДК правого борта, нижний — для МДК левого борта) (получено авторами)

Для обоих рассматриваемых судов характерны достаточно высокие значения моментов инерции гребных винтов (по сравнению с моментом инерции одной секции (колена) коленчатого вала). Величина момента инерции гребного винта у бункеровщика составляет $5360 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, что (после редуцирования схемы) в 6,08 раз больше момента инерции одного колена коленчатого вала дизеля MAN B&W 8L27/38. Момент инерции гребного винта у буксира составляет $594 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, что (после редуцирования) в 9,79 раз больше, чем момент инерции одного колена коленчатого вала дизеля CAT3516B. Это обстоятельство, а также наличие редукторов

позволяет предположить их влияние на возникновение больших по величине скручивающих переменных тормозящих моментов при пуске и остановке ГД.

Полученные напряжения не превышают допустимые для элементов МДК обоих судов, однако, их величина позволяет говорить о достаточно высоких значениях при данных режимах. При наличии небольших усталостных трещин такие динамические нагрузки могут привести к разрушениям элементов судовых МДК, что в принципе подтверждается рядом зафиксированных случаев разрушения гребных валов и потери винтов при реверсе или пуске ГД.

ВЫВОДЫ

1. Результаты мониторинга крутильных колебаний в судовом МДК позволяют говорить о получении более полной информации по развитию крутильных колебаний на нерезонансных частотах, при переходных режимах пуска и остановки ГД, чем при традиционной процедуре торсиографирования.

2. Режимы пуска и остановки судовых МДК с большими моментами инерции гребных винтов и с редукторными передачами приводят к повышению напряжений в 3 — 5 раз по сравнению с напряжениями при установленных режимах работы МДК. При наличии усталостных трещин в элементах МДК резкий рост напряжений при пуске и остановке может привести к «надрыву» валов и их скручиванию с разрушением валовой линии.

3. Экспериментально подтверждена дисперсия в размере 11 % от средней величины результатов измерений напряжений на одном и том же судне при близких условиях эксплуатации, что должно учитываться при тензометрировании.

4. Наличие опасных нерезонансных режимов подразумевает тщательное соблюдение процедуры измерения крутильных колебаний в соответствии с требованиями РС [9, 10] с постепенным набором частоты вращения от минимально устойчивой до максимальной и обратно, без резких переходов.

5. При проведении процедуры торсиографирования (тензометрирования) необходимо производить запись процессов пуска и остановки МДК для анализа вероятности развития опасных крутильных колебаний на данных режимах работы.

6. Необходимо внедрение методики обработки торсиограмм (тензограмм) на динамических режимах работы МДК, так как традиционный гармонический анализ Фурье не позволяет получить достоверные результаты при резком изменении частоты вращения. Рекомендации в этой части обосновываются не только нашими исследованиями, но и источниками [11, 12, 13, 14]. В этом случае возможно использование вейвлет анализа, например, при помощи вейвлет-функции Морле (Морлата), что требует проведения дополнительных теоретических и практических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с.
2. Викулов С.В. Диагностика коленчатого вала судового дизеля по параметрам крутильных колебаний // Ползуновский вестник №№ 4/3, 2013, с. 146 — 150.
3. Нгуен Динь Тыонг. Учет случайных факторов при расчете крутильных колебаний валопроводов судовых дизельных установок методом главных координат. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — СПб, 2004. — 24 с.
4. Feese T, Hill C. Guidelines for Preventing Torsional Vibration Problems in Reciprocating Machinery. Engineering Dynamics Incorporated, 2002. — 48 p.
5. Dereszewski M. Test stand for monitoring of torsional vibration of engine's crankshaft by instantaneous angular speed measurement // Zeszyty naukowe akademii morskiej w gdyni, nr. 96, grudzień 2016, pp. 15 — 23.
6. Astech Electronics Limited. Operating instructions, 2001. — 20 p.
7. Покусаев М.Н., Сибяев К.О., Горбачев М.М. Результаты разработки и испытания прототипа системы мониторинга крутильных колебаний судовых валопроводов в рамках реализации научного гранта «СТАРТ-1» // В сборнике: 66-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета. Материалы конференции. Астрахань, 2022, с. 466 — 468.
8. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. MSC MEPC.2/Circ.12/Rev.2. IMO, 2018. — 71 p.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. Российский морской регистр судоходства. СПб, 2023. — 115 с. (электронное издание).
10. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. Российский морской регистр судоходства. СПб, 2020. — 409 с. (электронное издание).

11. Лебедев О.Б. Динамика вибрационных взаимодействий элементов эксплуатируемой судовой энергетической установки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 2022. — 185 с.
12. Глушков С.П., Глушков С.С., Кочергин В.И., Лебедев Б.О. Анализ динамических характеристик крутильно-колебательных систем судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии, 2 (40) т. 2, 2018, — с. 59 — 66.
13. Глушков С.П., Жидких В.О. Выбор Вейвлет-образующей функции для анализа динамических характеристик сигнала двигателя внутреннего сгорания // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 1 (40), с. 51 — 56.
14. Викулов С.В. Методы построения алгоритмов диагностирования элементов судовых дизелей на основе системного подхода. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Новосибирск. 2013. — 312 с.

REFERENCE

1. Efremov L.V. *Teoriya i praktika issledovaniy krutilnykh kolebaniy silovykh ustavok s primenением kompyuternykh tekhnologii* [Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technology] — St. Petersburg, Nauka Publ, 2007, 276 p.
2. Vikulov S.V. *Diagnostika kolenchatogo vala sudovogo dizelya po parametram krutilnykh kolebaniy* [Diagnostics of the crankshaft of a marine diesel engine according to the parameters of torsional vibrations] // Polzunovskiy vestnik № 4/3, 2013, pp. 146 — 150.
3. Nguen Din Tyong. *Uchet sluchaynykh faktorov pri raschete krutilnykh kolebaniy valoprovodov sudovykh dizelynykh ustavok metodom glavnykh koordinat* [Taking into account random factors in the calculation of torsional vibrations of the shaftlines of marine diesel installations by the method of main coordinates. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. St. Petersburg, 2004. 24 p.
4. Feese T, Hill C. Guidelines for preventing torsional vibration problems in reciprocating machinery. Engineering Dynamics Incorporated, 2002. 48 p.
5. Dereszewski M. Test stand for monitoring of torsional vibration of engine's crankshaft by instantaneous angular speed measurement // Zeszyty naukowe akademii morskiej w gdyni, nr 96, grudzień 2016, pp. 15 — 23.
6. Astech Electronics Limited. Operating instructions, 2001, 20 p.
7. Pokusaev M.N., Sibryaev K.O., Gorbachev M.M. *Rezul'taty razrabotki i ispytaniya prototipa sistemy monitoringa krutilnykh kolebaniy sudovykh valoprovodov v ramkakh realizatsii nauchnogo granta "START-1"* [Results of development and testing of a prototype system for monitoring torsional vibrations of ship shaft pipelines within the framework of the scientific grant "START-1"] // In the collection: 66th International Scientific Conference of Astrakhan State Technical University. Conference materials]. Astrakhan, 2022. pp. 466 — 468.
8. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making Process. MSC MEPC.2/Circ.12/Rev.2. IMO, 2018, 71 p.
9. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2023, 100 p. (In Russian)
10. Annexes to the Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023, 362 p. (In Russian)
11. Lebedev O.B. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeystviy elementov ekspluatuemoy sudovoy energeticheskoy ustavki* [Dynamics of vibration interactions of elements of the operated ship power plant. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Novosibirsk, 2022. 185 p.
12. Glushkov S.P., Glushkov S.S., Kochergin V.I., Lebedev B.O. *Analiz dinamicheskikh kharakteristik krutilno-kolebatelnykh sistem sudovykh energeticheskikh ustavok* [Analysis of dynamic characteristics of torsion-oscillatory systems of marine power plants] // Morskie intellektualnye tekhnologii [Marine intelligent technologies], 2 (40) vol. 2, 2018, pp. 59 — 66.
13. Glushkov S.P., Zhidkikh V.O. *Vybor Veyvlet-obrazuyushchey funktsii dlya analiza dinamicheskikh kharakteristik signalov dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [The choice of a wavelet-generating function for analyzing the dynamic characteristics of an internal combustion engine signal] // Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport, 2017. № 1 (40), pp. 51 — 56.
14. Vikulov S.V. *Metody postroeniya algoritmov diagnostirovaniya elementov sudovykh dizeley na osnove sistemnogo podkhoda* [Methods of constructing algorithms for diagnosing elements of marine diesel engines based on a systematic approach]. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Novosibirsk. 2013, 312 p.

УДК 621.646.248

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ СУДОВЫХ ОБРАТНЫХ КЛАПАНОВ

Ю.В. Ким, АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» («ЦТСС»), Санкт-Петербург,
e-mail: armas@sstc.spb.ru

А.Ю. Пономарева, АО «ЦТСС», Санкт-Петербург, e-mail: armas@sstc.spb.ru

А.В. Шайтанов, АО «ЦТСС», Санкт-Петербург, e-mail: armas@sstc.spb.ru

Статья представляет результаты работы подразделения акционерного общества «Центр технологии судостроения и судоремонта» конструкторского бюро «Армас» по разработке линейки малогабаритных судовых обратных клапанов. Для ознакомления с объектом исследования авторы приводят общий вид классической конструкции обратного клапана с обозначением позиций и малогабаритной конструкции, предлагаемой в качестве альтернативы. Проведенное исследование характеристик гидравлического сопротивления проточной части малогабаритного изделия показывает состоятельность конструкции при эксплуатации на рабочей среде «вода» при нормальных климатических условиях и рабочих средах гидравлических приводов при отрицательных температурах. Далее предлагается рассмотреть результаты апробации опытного образца. Сравнение графика гидравлических потерь на малогабаритном судовом обратном клапане при отрицательной температуре рабочей среды, полученного численным методом, и результатов эксперимента показали правомерность проведенных расчетов. Готовые изделия прохода DN 10 были поставлены на АО «ПО «Севмаш» для обитаемого подводного аппарата проекта 03660 «Ясон», разработанного АО «СПМБМ «Малахит».

Ключевые слова: судовые обратные клапаны, малый габарит, гидравлическое сопротивление

RESEARCH OF HYDRAULIC RESISTANCE OF SMALL-SIZE SHIP NON-RETURN VALVES

Yu.V. Kim, JSC "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center" ("SSTC"), St. Petersburg, e-mail: armas@sstc.spb.ru

A.Yu. Ponomareva, JSC "SSTC", St. Petersburg, e-mail: armas@sstc.spb.ru

A.V. Shaitanov, JSC "SSTC", St. Petersburg, e-mail: armas@sstc.spb.ru

The article presents the accomplishments of the work of JSC "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center" Design Bureau "Armas" employees, who have developed a product line of small-size ship non-return valves. For the purpose of presenting the object of study, the authors give a general view of the classical design and the alternative design of a general view of small-size ship non-return valves. The simulation of fluid dynamics, which is a power fluid "water" in normal climate conditions and a power fluid hydraulic drive in negative temperatures, in a flow channel of small-size product verifies ability of mechanical design to proper function. The authors present the results of prototype testing. The comparison of a graph of hydraulic resistance in power fluid hydraulic drive in minus temperatures estimated by a numerical method and the result of the verification test in site proves the validity of the use of the numerical method. End products DN 10 have been delivered to JSC "PO "Sevmash"" for project 03660 "Yason" underwater vehicle developed by the Malachite Design Bureau.

Keywords: ship nonreturn valves, small-size, hydraulic resistance

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире присутствует тенденция к непрекращающемуся развитию по всем областям науки и техники. Прогресс в области судостроения заставляет ведущие организации отрасли проводить научные исследования и изыскания по каждой из составляющих. Происходит модернизация как уже имеющегося оборудования, так и создание принципиально новых образцов техники.

Акционерное общество «Центр технологии судостроения и судоремонта», как ведущий технологический центр судостроения России, одна из крупнейших научных организаций, имеющих статус государственного научного центра РФ [1], держит руку на пульсе отрасли. Предлагаем рассмотреть один из аспектов развития, относящийся к области судовой трубопроводной арматуры. Исследования выполнялись структурным подразделением АО «ЦТСС» — конструкторским бюро «Армас».

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

АО «ЦТСС» КБ «Армас» разработало типоряд малогабаритных судовых обратных клапанов, предлагаемых в качестве альтернативы изделий классической конструкции [2], приведенной на рис. 1.

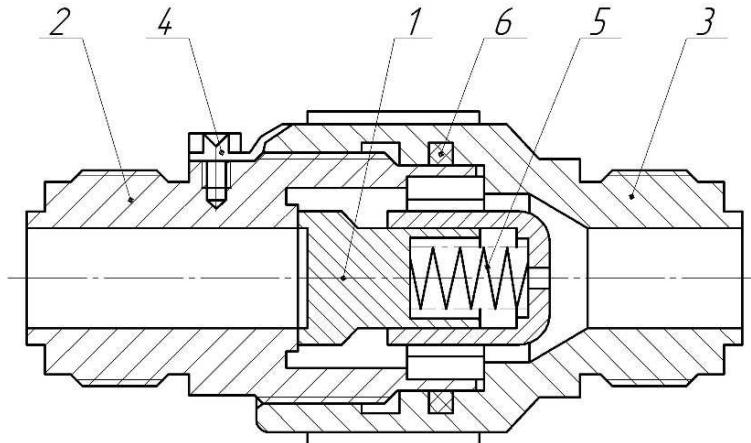


Рис. 1 Классическая конструкция судового обратного клапана:
1 — тарелка; 2, 3 — полукорпус; 4 — стопор; 5 — пружина; 6 — уплотнительное кольцо

Разработанная линейка малогабаритных судовых обратных клапанов имеет номинальные диаметры от DN 10 до DN 32, номинальное давление PN 16 МПа, общий вид представлен на рис. 2.

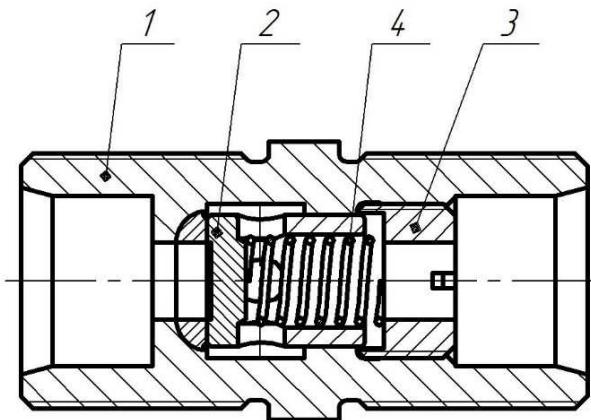


Рис. 2 Общий вид малогабаритных судовых обратных клапанов:
1 — корпус с твердосплавной наплавкой; 2 — тарелка с твердосплавной наплавкой; 3 — втулка; 4 — пружина

При разработке малогабаритных судовых обратных клапанов приоритет отдавался именно массогабаритным размерам, в следствии чего уменьшилась область применения представленной трубопроводной арматуры (нахождение пружины в движущемся потоке среды, разворот потока при обтекании тарелки диктует требования к чистоте рабочей жидкости и гуманые требования к гидравлическому сопротивлению изделия).

Основной областью применения малогабаритных судовых обратных клапанов является их установка в систему гидравлики с рабочей жидкостью в виде масел АМГ-10, МГЕ-10А, АУП или жидкости ПГВ с рекомендуемым классом чистоты не хуже 9 по [3].

2. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК

Сравнительная оценка гидравлических характеристик классической конструкции судового обратного клапана и малогабаритного судового обратного клапана проводилась по коэффициенту гидравлического сопротивления для изделий с номинальным диаметром DN 20. Данный проход выбран в соответствии с допущением о распространении результатов испытаний конкретной арматуры на группу однотипной (конструктивно подобной) арматуры в соответствии с [4], группа распространения выбиралась по аналогии с [5] по формуле (1)

$$DN/2 \leq n \leq 2DN, \quad (1)$$

где n — номинальный проход опытного образца.

В соответствии с протоколами испытаний судового обратного клапана классической конструкции DN 20 PN 16 МПа, на рабочей среде вода коэффициент гидравлического сопротивления ζ равен 4,7. Оценка коэффициента гидравлического сопротивления для малогабаритного судового обратного клапана производилась по методике [6] реализованной в виде конечно-элементного моделирования в среде Ansys Fluent. Расчетная схема проточной части малогабаритного судового обратного клапана представлена на рис. 3.

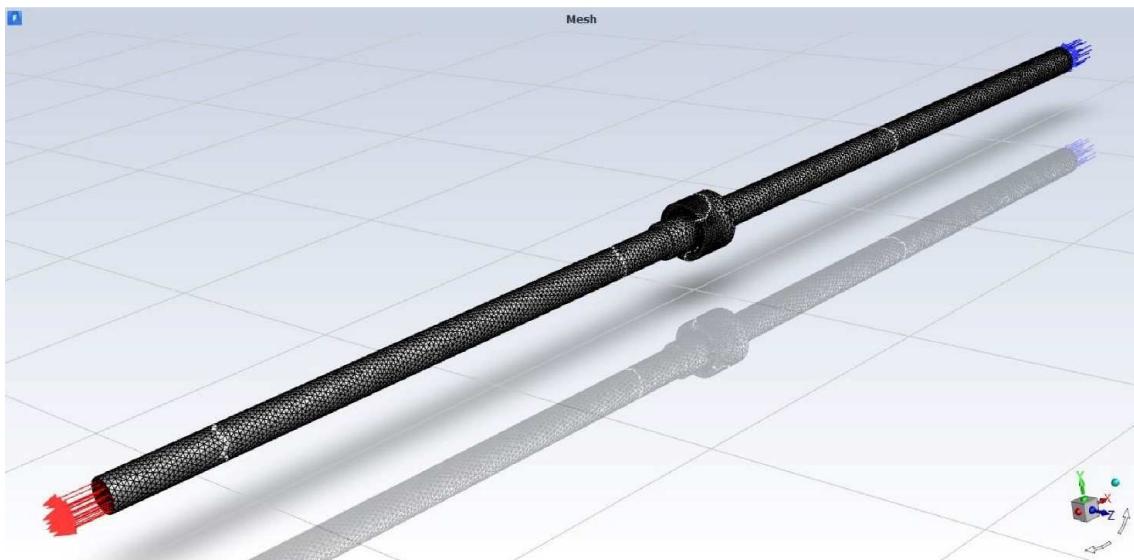


Рис. 3 Расчетная схема проточной части малогабаритного судового обратного клапана

Эпюра распределения давлений при скорости потока 3,4 м/с приведена на рис. 4.

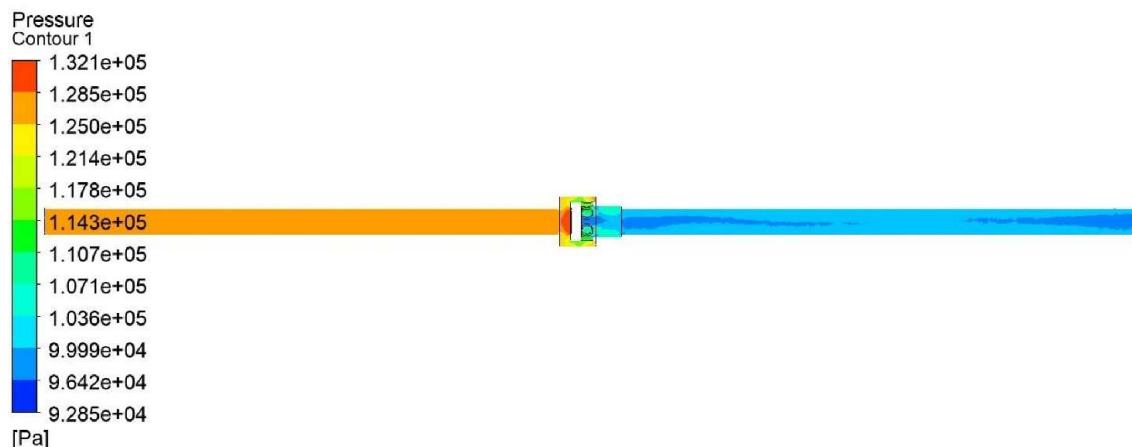


Рис. 4 Эпюра распределения давлений по проточной части малогабаритного судового обратного клапана

Для подтверждения правомерности использования методики [6] было определено число Рейнольдса по формуле (2)

$$Re = \frac{w \cdot DN \cdot 10^{-3}}{\nu} = 67594, \quad (2)$$

где $w = 3,4 \text{ м/с}$ — средняя скорость;
 $DN = 20 \text{ мм}$ — номинальный проход малогабаритного судового обратного клапана;
 $\nu = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — кинематическая вязкость воды при 20°C .

Определенное число Рейнольдса подтверждает нахождение испытываемого изделия в области квадратичного сопротивления ($Re_{\text{кв}} \geq 2 \cdot 10^4$). Коэффициент гидравлического сопротивления для малогабаритного судового клапана определялся по формуле (3)

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot FN^2 \cdot B^2}{Q^2 \cdot \rho} = 5,19, \quad (3)$$

где $\Delta P = 0,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ — потери давления на малогабаритном судовом обратном клапане в соответствии с рис. 4;
 $FN = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площадь проходного сечения;
 $B = 1$ — коэффициент при испытании на проводимой среде «вода»;
 $Q = w \cdot FN = 1,068 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ — объемный расход;
 $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ — принятая расчетная плотность воды.

Таким образом увеличение гидравлического сопротивления проточной части линейки малогабаритных судовых обратных клапанов по сравнению с клапанами классической конструкции составляет около 10 %, при уменьшении массы изделия в 3 раза.

3. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результатом проведенной работы стало заключение договора с АО «ПО «Севмаш» на поставку малогабаритных судовых обратных клапанов номинальным диаметром DN 10 для системы гидравлики обитаемого подводного аппарата проекта 03660 «Ясон» (проектант АО «СПМБМ «Малахит») [7], макет представлен на рис. 5.



Рис. 5 Макет обитаемого подводного аппарата проекта 03660 «Ясон»
(фото: М. Воркункова, И. Огородниковой, пресс служба АО «ПО «Севмаш»)

Продукция была отгружена на АО «ПО «Севмаш» в июле 2023 года, образец малогабаритного судового обратного клапана DN 10 PN 16 МПа представлен на рис. 6.



Рис. 6 Образец малогабаритного судового обратного клапана DN 10 PN 16 МПа

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

По техническому заданию АО «СПМБМ «Малахит» проводилось исследование гидравлического сопротивления малогабаритного судового обратного клапана DN 10 PN 16 МПа на рабочей среде масло МГЕ-10А температурой минус 2 °С. Кинематическая вязкость рабочей среды определялась по формуле Вальтера (4)

$$v = 10^{10^{a + b \lg(T)} - c}, \quad (4)$$

где $a = 7,01$ — эмпирический коэффициент, характеризующий исследуемую жидкость (находится по трем известным значениям температуры и кинематической вязкости для масла МГЕ-10А);
 $b = -2,77$ — эмпирический коэффициент, характеризующий исследуемую жидкость (находится по трем известным значениям температуры и кинематической вязкости для масла МГЕ-10А);
 $c = 3,77$ — эмпирический коэффициент, характеризующий исследуемую жидкость (находится по трем известным значениям температуры и кинематической вязкости для масла МГЕ-10А);
 $T = 271$ К — температура.

В конечно-элементной среде Ansys Fluent для рабочей среды масло МГЕ 10А с кинематической вязкостью $67 \cdot 10^{-6}$ м²/с, определенной по формуле (4) были получены значения потерь давления на клапане обратном для расхода рабочей среды от 0 до 16 л/мин. Расчетные значения были подтверждены натурным экспериментом на расходном климатическом стенде АО «ЦТСС» КБ «Армас». Сравнение полученных результатов приведено на рис. 7.



Рис. 7 Сравнение результатов расчета и испытаний

Для минимальной расчетной температуры -20 °С рабочей среды расходом 16 л/мин экспериментально были определены потери давления на клапане обратном, они составили $0,9$ кгс/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают состоятельность малогабаритных судовых обратных клапанов в части гидравлических характеристик. Ниппельное присоединение взамен стандартного штуцерно-торцевого позволяет использовать малогабаритные судовые обратные клапаны как погружное оборудование, номинальное давление рабочей среды PN можно рассматривать как избыточное давление по отношению к давлению окружающей среды [8]. Отсутствие уплотняемого корпусного разъема и уменьшенное количество деталей позволяет увеличить показатели надежности изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О нас. Электронный ресурс. URL: <http://www.sstc.spb.ru/about/> (дата обращения: 25.09.2023).
2. Каталог-справочник «Судовая трубопроводная арматура широкого применения». Издание третье. / Под ред. И.Н. Никифоров. СПб АО «ЦТСС», 2019. 468 с.
3. ГОСТ 17216-2001 Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. — Введен 2003-01-01 — Минск. ИПК.: Издательство стандартов, 2002. 8 с.
4. ГОСТ 34904-2022. Арматура трубопроводная судовая. Общие технические условия. — Введен 2023-07-01 — М.: Российский институт стандартизации. 2022. 20 с.
5. ГОСТ 50.04.08-2019. Оценка соответствия в форме испытаний. Порядок проведения. — Введен 2019-04-09 — М.: Стандартинформ. 2019. 23 с.
6. ГОСТ 34437-2018. Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик. — Введен 2019-07-01 — М.: Стандартинформ. 2018. 34 с.
7. На Севмаше состоялась закладка обитаемого подводного аппарата. Электронный ресурс. URL: <http://sevmash.ru/rus/news/3246-2022-06-26-12-52-48.html> (дата обращения: 25.09.2023).
8. Пономарева А.Ю., Шайтанов А.В. Трубопроводная арматура для обитаемых подводных аппаратов // Сборник трудов первой отраслевой научно-технической конференции. «Новые технологии в судостроении (HTC-2022)», СПб АО «ЦТСС», с. 162 — 169.

REFERENCES

1. About JSC "SSTC" Available at: <http://www.sstc.spb.ru/about/> (accessed on: 25/09/2023)
2. *Katalog spravochnik "Sudovaya truboprovodnaya armature shirokogo primenения"* [Ship valves for extended use. Handbook] 3 edition /ed. I.N. Nikiforov. St. Petersburg. JSC "SSTC", 2019. 468 p.
3. GOST 17216-2001. Industrial cleanliness. Grades of liquids purity. Minsk. IPK.: Standard publishing company, 2002. 8 p. (In Russian)
4. GOST 34904-2022. Pipeline valves of ship systems. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2022. 20 p.
5. GOST 50.04.08-2019. Conformity assessment in the form of tests. The procedure]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 23 p.
6. GOST 34437-2018 Pipeline valves. Technique of the experimental determination of hydraulic and cavitation characteristics. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 34 p.
7. *Na Sevmashе sostoyalas zakladka obitaemogo podvodnogo appara*ta [JSC "PO "Sevmash"" officiate keel-laying ceremony for underwater vehicle] Available at: <http://sevmash.ru/rus/news/3246-2022-06-26-12-52-48.html> (accessed on: 25/09/2023).
8. Ponomareva A.Yu. Shaitanov A.V. *Truboprovodnaya armatura dlya obitaemykh podvodnykh apparatov* [Pipeline fittings for manned submersibles]. Proc. 1st scientific-technical conference "New technologies in shipbuilding industry". St. Petersburg. JSC "SSTC", 2022, pp. 162 — 169.

УДК 629.5.06

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ПО КОНТРОЛЮ ВИБРАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ

В.К. Шурпяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

Е.С. Голуб, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: golub@cniimf.ru

В статье анализируются различные нормативные документы (стандарты ISO и ГОСТ Р, отраслевые стандарты нефтегазовой промышленности и судостроения, Правила классификационных обществ) с точки зрения требований к контролю вибрации трубопроводов. Разработаны и сформированы требования к контролю вибрации судовых трубопроводов. Предложены нормы допустимой вибрации судовых трубопроводов на основе расчета напряжений, возникающих в трубе при ее колебаниях. "Методические рекомендации по мониторингу вибрации судовых трубопроводов" разработаны для включения в разд. 8 "Системы и трубопроводы" Руководства по техническому наблюдению за постройкой судов в виде приложения. Установлены методы контроля и критерии оценки вибрации судовых трубопроводов при приемке и эксплуатации судна. Проведена оценка величины переменных механических напряжений, возникающих в трубопроводах при достижении пороговых значений допустимых норм вибрации, предложенных в разработанных методических рекомендациях.

Ключевые слова: судовой трубопровод, собственная частота колебаний, резонансные колебания, вибрационное состояние, нормирование, контроль, оценка

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR VIBRATION CONTROL OF SHIP SYSTEMS PIPELINES

V.K. Shurpyak, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org
E.S. Golub, JSC "TSNIIMF", St. Petersburg, e-mail: golub@cniimf.ru

The article presents an analysis of various regulatory documents (ISO and GOST R standards, industry standards of the oil and gas industry and shipbuilding, Rules of classification societies) in terms of requirements for pipeline vibration control. Requirements for vibration control of ship pipelines have been developed and formed. The norms of permissible vibration of ship pipelines are proposed based on the calculation of stresses arising in the pipe during its oscillations. "Methodological recommendations for monitoring the vibration of ship pipelines" have been developed for inclusion in Section 8 "Systems and Pipelines" of the Guidelines for Technical Supervision of the Construction of Ships in the form of an Appendix. Methods of control and criteria for assessing the vibration of ship pipelines during acceptance and operation of the vessel have been established. The estimation of the magnitude of variable mechanical stresses occurring in pipelines when the threshold values of permissible vibration norms proposed in the developed methodological recommendations are reached.

Keywords: ship pipeline, natural oscillation frequency, resonant oscillations, vibration state, rationing, control, evaluation

ВВЕДЕНИЕ

Контроль вибрации судовых трубопроводов является важной практической задачей, от решения которой во многом зависит надежность работы СЭУ и судна в целом. Это обусловило актуальность разработки требований Регистра по контролю вибрации трубопроводов судовых систем. Первым шагом в этой работе стала разработка требований по предотвращению возникновения резонанса, наиболее опасного явления, которое может возникнуть при эксплуатации трубопроводных систем. В работе [1] на основе анализа нормативных документов изложены предложения по мерам, необходимым для исключения резонанса в судовых трубопроводах. В статье [1], опубликованной в предыдущем номере, представлен разработанный подход к определению собственных частот и форм колебаний судовых трубопроводов, который в настоящее время реализован в виде нормативного предложения к части VIII «Системы и трубопроводы» Правил Регистра в виде нового пункта для принятия мер по отстройке колебаний от резонансных частот.

Для обеспечения длительной работоспособности судовых систем и безопасной эксплуатации судна необходим нормативный документ, рекомендующий допустимые нормы вибрации, устанавливающий методы контроля и критерии оценки вибрационного состояния судовых трубопроводов при приемке судна и при эксплуатации. Целью такого контроля является оценка вибрационного состояния судовых трубопроводов, выявление причин повышенной вибрации и выполнение технических мероприятий по их устранению.

1. АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ВИБРАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Для разработки и обоснования норм вибрации судовых трубопроводов проведен анализ стандартов ИСО и ГОСТ Р [2 — 9] по контролю, оценке и нормированию параметров вибрации различных видов механизмов, оборудования и трубопроводов промышленного назначения, рассмотрены отраслевые нормативные документы нефтегазовой промышленности [10, 11] и судостроительной отрасли [12 — 14].

Стандарты ИСО и РФ по контролю и оценке вибрации различных механизмов, а также рассмотренные нормативные документы нефтегазовой промышленности содержат требования и рекомендации по расчету собственных частот колебаний трубопроводов, проведению работ по контролю уровня вибрации и установления допустимых норм вибрации магистральных и технологических трубопроводов.

Стандарты судостроительной отрасли устанавливают типовые технологические процессы на изготовление и монтаж судовых трубопроводов различного назначения и типов. Даются рекомендации по расстоянию между подвесками трубопроводов в зависимости от диаметров труб. В стандартах приводятся требования к испытанию трубопроводов в период швартовных и ходовых испытаний судов.

Анализ разделов по судовым системам и трубопроводам Правил Российского морского регистра судоходства, и Правил классификационных обществ (ABS, LR, CCS, DNV, BV) позывает, что изложенные в них требования к материалам, конструктивным формам, выполнению гидравлических и прочностных расчетов, технологий изготовления и монтажа, проведению испытаний во время швартовных и ходовых испытаний трубопроводов различных судовых систем во многом одинаковы и не содержат каких-либо специальных требований к контролю вибрации судовых трубопроводов как на стадии проектирования и сдачи судов, так и во время их эксплуатации.

В нормативном документе DNV-RP-D101 2017. Structural analysis of piping systems [15], содержатся рекомендации для структурного анализа технологических трубопроводных систем нефтегазовых платформ, буровых установок и подводных установок (манифольды, стояки и подводные разделительные и насосные модули).

В Приложении А [15] приведена рекомендуемая процедура простой проверки конструкции трубопроводов, которые могут быть подвержены воздействию вихревых колебаний от ветра (для открытых трубопроводов) или от морских течений (для подводных трубопроводов).

Процедура проверки для прямых труб без висячих клапанов и т.п. рекомендует выполнение расчета собственных колебаний частот трубопроводов.

Рекомендации DNV для технологических трубопроводов, указанных видов оборудования [15] аналогичны с методами расчета собственных частот технологических трубопроводов и мероприятиями по снижению их вибрации, приводимых в отечественных стандартах нефтегазовой промышленности [8 — 11].

Анализ рассмотренных материалов свидетельствует, что требования по нормированию и контролю вибрации при проектировании, монтаже и испытаниях судовых трубопроводов, а тем более по оценке их вибrosостояния во время эксплуатации судна практически отсутствуют.

Однако в практике эксплуатации морских судов нередко происходят повреждения и разрушения судовых трубопроводов из-за воздействия вибрации с реально опасными последствиями.

В публикации Российского морского регистра судоходства [16] указано, что вибрационные нагрузки приводят к возникновению переменных во времени напряжений и появлению усталостных и коррозионно-усталостных трещин в местах сварных соединений или концентраторов напряжений. С целью предотвращения резонанса в работе [16] на основе сравнения и анализа требований отечественного [14] и зарубежного стандартов к расстоянию между подвесками и опорами выполнены расчеты собственных колебаний труб для различных рабочих сред, разработана методология и даны рекомендации по изменению собственной частоты колебаний трубопроводов определенного диаметра путем изменения расстояния между подвесками.

2. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Выполнение измерений и оценка вибрационного состояния судовых трубопроводов зависят от конструктивно-технологических и эксплуатационно-технических факторов и является сложной и трудоемкой задачей.

Решение ее осложняется такими специфическими особенностями трубопроводов судовых систем как:

- большая протяженность, наличие соединений, отводов, тройников и т.п., различных видов арматуры;
- расположение большей части систем в труднодоступных местах;
- ограниченность выбора мест установки датчиков вибрации при эксплуатации судов;

- влияние на результаты измерений режимов работы присоединенного оборудования и его вибрососстановия.

Протяженность судовых трубопроводов, имеющих тысячи разъемных и неразъемных соединений различного типа, составляет несколько десятков километров.

До 50 % общей протяженности трубопроводов находится в труднодоступных местах под настилом плит. Около 15 % судовых трубопроводов покрыты изоляцией, что делает невозможным установку виброподатчиков. Трудоемкость выполнения регулярных измерений вибрации протяженных участков трубопроводов судовых систем очевидно превышает возможности судовых экипажей. Поэтому необходимо максимально минимизировать объем контролируемых точек измерения и оптимизировать их расположение.

Так же, как и для судовых механизмов и оборудования [17], измерения вибрации трубопроводов судовых систем должны проводиться для основных режимов работы силовой энергетической установки. На режимах запуска и остановок присоединенных механизмов, стационарных режимах с различными уровнями мощности и расходами рабочей среды могут быть предъявлены свои требования к вибрационным характеристикам трубопроводов.

Результаты измерения вибрации трубопроводов представляются в виде среднеквадратических значений (СКЗ) вибропремещения или виброскорости частотного диапазона измерений (общий уровень).

В диапазоне измерений целесообразно контролировать спектральный состав вибраций. Это позволяет разделять формы колебаний при определении неисправностей.

3. ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИИ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Стандарт ГОСТ Р ИСО 10816-1-97 [4] дает общее руководство установления норм вибрации механизмов и оборудования для четырех категорий технического состояния.

Основой разработки норм вибрации любого энергетического оборудования является статистический метод обработки результатов многократного контроля уровней вибрации, регистрируемых в определенных точках при нормальных и максимально возможно одинаковых условиях. При этом предполагается, что распределения вероятностей уровней на различных частотах подчиняется нормальному закону.

В эксплуатации установленные нормы проверяются и корректируются вычислением ошибок «ложная тревога» и «пропуск дефекта», а также по рекомендациям различных стандартов, норм изготовителей оборудования и опыта эксплуатации.

В разд. 9 в части VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов приведены нормы вибрации различных механизмов и энергетического оборудования. Вибрация трубопроводов судовых систем рассматривается как местная и к ней не применяются нормы присоединенных механизмов и оборудования. Нормы вибрации судовых трубопроводов, разработанных и используемых Регистром в практике технического наблюдения и судовладельцами при технической эксплуатации судов, до настоящего времени не было. В качестве норм вибрационного состояния трубопроводов могут использоваться допустимые уровни вибрации в соответствующем диапазоне частот и в соответствующих точках измерений, рекомендованные изготовителями механизмов и оборудования.

При отсутствии норм вибрации от изготовителя механизмов и оборудования в качестве норм вибрации судовых трубопроводов могут приниматься уровни вибрации, измеренные при приемо-сдаточных испытаниях. Результаты измерений вибрации при приемо-сдаточных испытаниях могут являться базовыми и использоваться в эксплуатации для оценки вибрационного состояния трубопроводов при проведении периодических измерений.

Трубопроводы обвязки судовых механизмов по своим конструктивным характеристикам должны быть способны выдерживать вибрацию уровня, допустимого для механизма.

Такой подход к нормированию вибрации должен быть применен для трубопроводов обвязки главных и вспомогательных дизелей, газотурбинных двигателей, поршневых компрессоров, винто-рулевые колонки и в отдельных случаях для других механизмов (сепараторы, насосы).

Фактически такой подход реализован в стандартах ГОСТ Р ИСО 20816-8-2021 [5] и в ГОСТ 30938-2002 [7] по поршневым компрессорам, где приведены нормы по присоединенным трубопроводам.

Следует отметить некоторые положения указанных выше стандартов, которые были использованы при разработке норм Регистра для контроля вибрации судовых трубопроводов.

Во-первых, в указанных стандартах для трубопроводов приведены нормы среднеквадратических значений и виброскорости, и вибропремещения.

Во-вторых, значение норм вибрации трубопровода принимается равным наибольшему значению норм вибрации элементов присоединенных механизмов.

В ГОСТ 30938-2002 [7] установлены нормы для трех классов компрессоров, определенные на корпусах подшипников, где уровень вибрации наиболее высок. Границы зон вибрационного состояния трубопроводов стандарта [7] определены на уровне максимальных значений норм вибрации компрессора, причем, установленного на виброзоляторах (см. табл. 1).

Таблица 1
Общие средние квадратические значения виброскорости (мм/с) трубопроводов [7]

Техническое состояние		Класс компрессора		
Зона	Оценка	1	2	3
<i>A</i>	хорошо	7,1 вкл.	11,2 вкл.	18 вкл.
<i>B</i>	приемлемо	7,1 — 11,2	11,2 — 18	18 — 28
<i>C</i>	допустимо	11,2 — 18	18 — 28	28 — 45
<i>D</i>	недопустимо	больше 18	больше 28	больше 45

Нормы вибрации трубопроводов судовых систем приведены в правилах DNV где, в разделе по вибрации механизмов и оборудования [18] указаны предельное значение нормы виброскорости (зона *D*) для трубопроводов в диапазоне частот 4 — 200 Гц: 45 мм/с.

При разработке норм вибрации трубопроводов судовых систем были использованы:

- фактические результаты измерений АО «ЦНИИМФ» при выполнении оценки эффективности амортизирующих конструкций и вибrosостояния трубопроводов во время швартовых испытаний;
- фактические результаты измерений вибрации механизмов и трубопроводах на речных и морских судах, выполненных организациями, имеющими признание Регистра. Пример измерений приведен в табл. 2.

Таблица 2
Результаты измерения вибрации трубопроводов на б/т «Турий»*

Контролируемое оборудование	Результаты измерений вибрации, мм/с
Насос ГД корпус насоса пресной воды ГД (навешенный вихревой насос).	17,48
Насос ГД, трубопровод на входе насоса, ДУ50, 70 — 100 мм от корпуса насоса.	12,85
Насос ГД, трубопровод на выходе насоса, ДУ50, 70 — 100мм от корпуса насоса.	14,88
Насос ГД, трубопровод на входе насоса, ДУ50, 300 — 400мм от корпуса насоса после резинового компенсатора.	2,97
Насос ГД трубопровод на входе теплообменника ДУ50, 100 — 150мм от корпуса теплообменника.	5,24
Насос ВРШ трубопровод на входе насоса ВРШ (шестеренный насос с электроприводом 1500 об/мин), ДУ32, 300мм от корпуса насоса.	4,97
Насос ВРШ трубопровод на выходе насоса ВРШ (шестеренный насос с электроприводом 1500 об/мин), ДУ25, 100мм от корпуса насоса.	3,03

* — измерения выполнены и предоставлены Кисляковым Сергеем Владимировичем.

Уровень вибрации трубопроводов зависит от вибрации присоединенного механизма, его вибрационного состояния во время работы. Поэтому при установлении норм вибрации, проведении вибрационного контроля судовых трубопроводов, анализа полученных результатов и оценки их вибрационного состояния необходимо учитывать данные контроля и оценки вибрации состояния механизмов и оборудования на судах морского флота [19] и нормы вибрации присоединенных механизмов [17].

На основе обобщений и анализа результатов измерений предложены нормы трубопроводов судовых систем, представленные для четырех зон (категорий) вибрационного состояния низкочастотного (до 200 Гц) и высокочастотного (200 Гц и более) диапазонов: табл. 3 и 4 соответственно.

Низкочастотная вибрация происходит в основном на собственных частотах колебаний трубопроводов вследствие гидродинамических возмущений, действующих со стороны рабочей среды, насосов и компрессоров. Высокочастотные вибрации, измеряемые на трубопроводах, характерны при использовании в качестве присоединенных механизмов, имеющих высокую частоту вращения.

Таблица 3
Нормы НЧ-вибрации трубопроводов для диапазона частот до 200 Гц

Зоны вибрационного состояния	Общий уровень	
	V , мм/с	S , мкм
<i>A</i>	до 11,0	до 175,0
<i>B</i>	11,0 — 18,0	175,0 — 286,0
<i>C</i>	18,0 — 28,0	286,0 — 446,0
<i>D</i>	больше 28,0	больше 446,0

Таблица 4
Нормы ВЧ-вибрации трубопроводов для диапазона частот от 200 Гц и более

Зоны вибрационного состояния	Общий уровень	
	V , мм/с	S , мкм
<i>A</i>	до 18,0	до 286,0
<i>B</i>	18,0 — 28,0	286,0 — 446,0
<i>C</i>	28,0 — 45,0	446,0 — 716,0
<i>D</i>	больше 4,0	больше 716,0

Градация зон вибрационного состояния

Зона А — в эту зону попадает вибрация трубопроводов новых судов, вводимых в эксплуатацию или вибрация после ремонта трубопроводов и их опор.

Зона В — трубопроводы, вибрация которых попадает в эту зону, считаться пригодными для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков.

Зона С — трубопроводы, вибрация которых попадает в эту зону, могут рассматриваться как непригодные для длительной и непрерывной эксплуатации. Следует усилить наблюдение и провести анализ состояния и условий работы трубопровода для принятия решения о необходимости проведения ремонтных работ.

Зона D — уровни вибрации в данной зоне рассматриваются как достаточно серьезные для того, чтобы вызвать повреждение трубопроводов и присоединенного оборудования.

Зоны вибрационного состояния предназначены для качественной оценки вибрационного состояния судовых трубопроводов и принятия решения для устранения повышенной вибрации.

Уровни значений норм вибрации для категорий вибрационного состояния судовых трубопроводов корреспондируется с нормами вибрации DNV [18], а также с нормами вибрации:

- для трубопроводов поршневых компрессоров, которые рекомендованы в стандартах ГОСТ Р ИСО 20816-8-2023 [5] и ГОСТ 30938-2002 [7];
- для магистральных и технологических трубопроводов нефтегазовой промышленности [9 — 12];
- редуцирующих линий газораспределительных станций [20].

Порядок использования предлагаемых норм для оценки вибрационного состояния судовых трубопроводов определяется методическими рекомендациями по проведению контроля вибрации судовых трубопроводов.

4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРОВЕДЕНИЮ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Для обеспечения проведения контроля вибрационного состояния трубопроводов судовых систем разработан специальный нормативный документ «Методические рекомендации по проведению контроля вибрации судовых трубопроводов» в качестве приложения 2 к разд. 8 «Системы и трубопроводы» Руководства по техническому наблюдению за постройкой судов. Документ имеет исключительно рекомендательный статус и описывает методы и критерии оценки вибрационного состояния металлических судовых трубопроводов при приемке и в период эксплуатации судна. Целями контроля вибрации судовых трубопроводов являются:

- оценка вибрационного состояния;
- выявление причин повышенной вибрации и выполнения технических мероприятий по их устранению;
- оценка эффективности виброзолирующих подвесок.

Измеряемыми параметрами в определенных частотных диапазонах являются:

- абсолютные среднеквадратические значения общих уровней скорости V_e , мм/с;
- размах перемещения S_e , мкм.

Количественная оценка вибрации трубопроводов может представляться в относительных логарифмических единицах — децибелах (дБ).

Точки измерений должны быть четко обозначены метками или специальными знаками. Измерения вибрации следует производить в середине каждого пролета между опорами трубопровода в точках по окружности в вертикальном и поперечном направлениях относительно оси трубопровода. При обнаружении повышенных вибраций измерения следует производить в 4 — 6 точках по окружности в тех сечениях трубопровода, где обнаружены максимальные виброперемещения. При контроле вибрации с целью оценки вибрационного состояния трубопровода измерения проводятся, в точках определенного сечения:

- на прямолинейном участке трубопровода, по возможности, сечения измерений должны располагаться вблизи опор (крепления подвески или на ближайшем фланце к присоединенному механизму) и на середине пролета между опорами;
- при наличии в пролете между опорами отводов (тройниковых соединений) измерения выполняются в одном сечение в конце отвода;
- при повороте трубопровода измерения вибрации следует проводить в двух сечениях смежных сторон.

Результаты вибрационных измерений должны фиксироваться в протоколах с четким указанием места измерения вибрации, применявшейся аппаратуре, параметров, характеризующих вибрационное состояние, режима работы.

5. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДАХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВИБРАЦИИ

Для проверки адекватности рекомендованных норм допустимой вибрации трубопроводов была произведена оценка переменных напряжений, возникающих в трубах при параметрах вибрации, указанных в табл. 3 и 4. Были проведены расчеты напряжений, возникающие в трубе при деформации в результате вибрации в зависимости от виброскорости. В работе [21] приводятся две формулы, связывающие напряжения, возникающие в трубопроводе с параметрами вибрации виброскоростью V и виброперемещением S :

$$\sigma_{\max} = V_{\max} \sqrt{cE\rho}, \quad (1)$$

где E — модуль продольной упругости материала трубы, МПа;

ρ — плотность материала трубы, кг/мм³;

V_{\max} — виброскорость, мм/сек;

C — коэффициент, учитывающий распределение амплитуд напряжений и виброскорости по трубопроводу.

При изгибных колебаниях, когда распределение напряжений и виброскоростей существенно отличаются для различных условий закрепления, значения C необходимо определять для каждого случая отдельно. Для случая колебаний прямолинейного трубопровода, закрепленного на двух шарнирных опорах в [21] предлагается получить значение C путем подстановки значений частоты собственных колебаний трубопровода в уравнение, описывающее напряжения, возникающие в трубе при синусоидальных колебаниях. В результате авторы получили значение $C=2$. В [21] предлагается для общего случая применять $C=3$, что мы используем для дальнейшей оценки.

Следует помнить, что формула (1) получена с использованием частоты собственных колебаний трубопровода, то есть оценка производится для трубопровода, находящегося в состоянии резонанса, чего стараются избежать при проектировании трубопроводов и для чего были сформулированы требования Регистра по защите трубопроводов от резонанса [1]. Учитывая, что в состоянии резонанса амплитуда колебаний значительно увеличивается, оценка напряжений с использованием виброскорости представляется достаточно консервативной с ошибкой в безопасную сторону. Но формула (1) удобна для оценки величины напряжений, так как согласно ей наибольшее напряжение изгиба зависит только от измеряемой виброскорости и свойств материала трубы, получается, что для данных условий закрепления напряжения в трубопроводе не зависят от конструкции трубопровода и способа его закрепления. Подставив в формулу (1) наибольшие допускаемые значения виброскорости, соответствующие уровню D табл. 4 $V_{\max}=45$ мм/с, получаем для стальных труб $E=2,06 \times 10^5$ МПа и $\rho=8 \times 10^{-6}$ кг/мм³, значение напряжений $\sigma_{\max}=100$ МПа.

Для углеродистых сталей, широко применяющихся для судовых трубопроводов, уровень полученных напряжений будет соответствовать примерно половине предела текучести, что может быть допустимо для кратковременных режимов, например, прохода через резонансную частоту, но постоянная длительная работа трубопровода в таких условиях приводит к отказу трубопровода и выходу системы из строя. В методических указаниях по контролю за состоянием металлических напорных трубопроводов гидроэлектростанций [22] для стальных трубопроводов применяется в качестве допускаемых напряжения 80 МПа. Таким образом, оценка подтверждает, что представленные в методике контроля вибрации трубопроводов допустимые уровни виброскорости соответствуют порогу безопасной эксплуатации и являются достаточно обоснованными.

Более точную оценку напряжений, возникающих в трубопроводе, можно получить согласно формуле (2) по результатам измерения виброперемещения S . Именно такая оценка используется в методике [22]. При этом учитывается форма колебаний, диаметр трубы и расстояние между опорами.

$$\sigma_{\max} = \frac{S D E i^2 \pi^2}{4l^2}, \quad (2)$$

где S — виброперемещение, мм;
 D — наружный диаметр трубы, мм;
 l — расстояние между опорами, мм;
 i — номер формы колебаний.

Однако провести оценку указанного в методике Регистра допустимого уровня виброперемещений не представляется возможным, так как такая оценка требует данных о геометрии закрепления трубопровода и ее можно произвести только связав требования по вибрации труб с требованиями по расположения подвесок на трубопроводе, которые в настоящее время в Правилах Регистра отсутствуют. Оценка напряжений в трубах при использовании различных стандартов, применяемых на верфях возможно в будущем как продолжение настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполнения работы являются нормативно-методической основой для контроля и оценки вибрационного состояния трубопроводов судовых систем при приемо-сдаточных испытаниях и эксплуатации судна. Измерение вибрации судовых трубопроводов может выполнять экипаж судна при осуществлении периодического контроля вибрационного состояния (мониторинга) механизмов и оборудования или при появлении признаков повышенной вибрации.

Практическая значимость заключается в разработке технических и процедурных требований РС, которые позволяют осуществить защиту судовых трубопроводов от возникновения вибрационного резонанса при проектировании, во время приемки и на ранней стадии эксплуатации судов, а также организовать мониторинг вибрационного состояния трубопроводов судовых систем во время эксплуатации судов.

Использование положений Методических рекомендаций по проведению контроля вибрации судовых трубопроводов позволяет проводить контроль, оценку вибрационного состояния и выявлять причины повышенной вибрации трубопроводов судовых систем во время швартовных, приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации судна.

Методические рекомендации по проведению контроля вибрации судовых трубопроводов могут применяться в Системе мониторинга технического состояния и технического обслуживания по состоянию при введении этих систем на судах и реализации безразборного освидетельствования.

Оценка напряжений, возникающих в судовых трубопроводах в результате вибрации, показала обоснованность принятого в методике значения порогового уровня допускаемой виброскорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голуб Е.С., Шурпяк В.К. Разработка требований по защите от возникновения резонанса в трубопроводах судовых систем//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 70/71, 2023, с.108 — 116.
- ГОСТ Р ИСО 20283-4-2017. Вибрация. Измерения вибрации на судах Часть 4. Измерения и оценка вибрации судовой пропульсивной установки.
- ГОСТ Р 56646-2015. Вибрация. Руководство по выбору критерии оценки вибрационного состояния машин.
- ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство.
- ГОСТ Р ИСО 20816-8-2023. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 8. Установки компрессорные поршневые.
- ГОСТ Р ИСО 13373-1:2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы.
- ГОСТ 30938-2002. Компрессорное оборудование. Определение вибрационных характеристик малых и средних поршневых компрессоров и нормы вибрации.
- ГОСТ 32388-2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и технологические воздействия.
- ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах.
- РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов.
- СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
- ОСТ 5.5104-79. Трубопроводы судовые. Методика расчета безотказности и долговечности элементов и допустимые скорости потоков морской воды.
- РД В5Р.5198-82 (с изм. 1 — 3). Толщина стенок трубопроводов корабельных систем и трубопроводов систем корабельных энергетических установок. Методика и нормы расчета.
- ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов.
- DNV-RP-D101. Structural analysis of piping systems, edition July 2017. Webpage. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/dnvg1-rp-d101-structural-analysis-of-piping-systems-64f8fb.html> (accessed on: 02.02.2023).
- Шурпяк В.К Сравнение требований нормативных документов по установке опор и подвесок судовых трубопроводов//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 35, Санкт-Петербург, 2012, с. 123 — 135.
- Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки. Российский морской регистр судоходства, СПб, 2022.
- Rules for classification of ships. Pt.6 Additional class notation. Ch. 15 Sec 2. DNV.
- Вибродиагностика: Монограф. /Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др.; Под. ред. Г. Ш. Розенберга, СПб: ПЭИПК, 2003, 284 с.
- Соколинский Л.И., Губкина И.М., Толстых Ю.Ю., Блинов Ф.В. Нормирование вибрации редуцирующих линий газораспределительных станций. Газовая промышленность № 12 (761), 2017, с. 78 — 82.
- Самарин А.А. Вибрация трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. — М.: Энергия, 1979, 288 с.
- РД 153-34.0-20.340-98. Методические указания по контролю за состоянием металлических напорных трубопроводов гидроэлектростанций. РАО "ЕЭС РОССИИ", 1999.

REFERENCES

- Голуб Е.С., Шурпяк В.К. Razrabotka trebovaniy po zashchite ot vozniknoveniya rezonansa v truboprovodakh sudovykh sistem [Development of requirements for protection against resonance in pipelines of ship systems]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, Nos. 70/71, 2023, pp. 108 — 116.
- ГОСТ Р ИСО 20283-4-2017. Vibration. Vibration measurements on ships Part 4. Measurement and evaluation of the vibration of the ship's propulsion system. (In Russian)
- ГОСТ Р 56646-2015. Vibration. Guidelines for the selection of criteria for assessing the vibration state of machines.
- ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1. General guidelines. (In Russian)
- ГОСТ Р ИСО 20816-8-2023. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 8. Compressor piston installations. (In Russian)
- ГОСТ Р ИСО 13373-1:2009. Condition monitoring and diagnostics of machines. Vibration monitoring of the condition of machines. Part 1. General methods. (In Russian)
- ГОСТ 30938-2002. Compressor equipment. Determination of vibration characteristics of small and medium reciprocating compressors and vibration standards. (In Russian)
- ГОСТ 32388-2013. Technological pipelines. Norms and methods of calculation for strength, vibration and technological effects. (In Russian)
- ГОСТ 32569-2013. Technological steel pipelines. Requirements for the device and operation in explosion- and fire-hazardous and chemically hazardous industries.(In Russian)
- РТМ 38.001-94. Guidelines for calculating the strength and vibration of technological steel pipelines. (In Russian)
- СА 03-003-07. Calculations for strength and vibration of steel process pipelines. (In Russian)
- ОСТ 5.5104-79. Ship pipelines. The methodology for calculating the reliability and durability of elements and the permissible speeds of seawater flows. (In Russian)
- РД В5Р.5198-82 (with amendments 1 — 3). Wall thickness of pipelines of shipboard systems and pipelines of systems of shipboard power plants. Methods and norms of calculation. (In Russian)

14. OST 5.95057-90. Ship systems and systems of ship power plants. Typical technological process of manufacturing and installation of pipelines. (In Russian)
15. DNV-RP-D101. Structural analysis of piping systems, edition July 2017. Webpage. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/dnvg1-rp-d101-structural-analysis-of-piping-systems-64f8fb.html> (accessed on: 02.02.2023).
16. Shurpyak V.K. *Sravnenie normativnykh dokumentov po ustanovke opor i podvesok sudovykh truboprovodov* [Comparison of the requirements of regulatory documents for the installation of supports and suspensions of ship pipelines]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 35, St. Petersburg, 2012, pp. 123 — 135.
17. Rules of Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations. Russian Maritime Register of Shipping, SPb, 2022.
18. Rules for classification of ships. Pt.6 Additional class notation. Ch. 15 Sec 2. DNV.
19. Rozenberg G.Sh., Madorsky E.Z., Golub E.S. et. al. *Vibrodiagnostika* [Vibrodiagnostics]. St. Petersburg. PEIPC, 2003, 284 p
20. Sokolinsky L.I., Gubkina I.M., Tolstikhin Yu.Yu., Blinov F.V. *Normirovanie vibratsii redutsiruyushchikh liniy gazoraspredeliteynykh stantsiy* [Normalization of vibration of reducing lines of gas distribution stations]. Gas industry No. 12 (761), 2017, pp. 78 — 82.
21. Samarin A.A. *Vibratsiya truboprovodov energeticheskikh ustanovok i metody ikh ustraneniya* [Vibration of pipelines of power plants and methods for their elimination]. Moscow: Energy, 1979, 288 p.
22. RD 153-34.0-20.340-98. Methodological guidelines for monitoring the condition of metal pressure pipelines of hydroelectric power plants. RJSR "UES OF RUSSIA", 1999. (In Russian)



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.518+65.011.56

ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ

С.В. Миклуш, АО «Адмиралтейские Верфи», Санкт-Петербург, e-mail: miklush.SV@ashipyards.com

В.А. Миклуш, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, e-mail: miklush-v@yandex.ru

В статье рассмотрены вопросы технологии цифровизации мониторинга и управления производственными процессами в судостроении. Описаны уровни управления промышленными предприятиями. Рассмотрены возможности использования автоматизированного мониторинга производственных процессов на основе технологии IoT (промышленный интернет вещей). Проанализированы сложности внедрения цифровых форм мониторинга и управления на различных этапах производственного цикла строительства судовых заказов. Исследованы свойства и особенности РЧИ технологии. Приведены возможные пути применения РЧИ технологии для мониторинга технологических процессов в судостроении на этапе формирования судовых систем, с целью минимизации затрат и повышения эффективности управленческих решений. Определены основные критерии разработки модели управления сложными производственными процессами судостроительного предприятия с использованием РЧИ технологии, на основе методологии квалиметрического анализа критерии качества управления.

Ключевые слова: судостроение, цифровизация управления, мониторинг производственных процессов, РЧИ технология

TECHNOLOGY OF MONITORING AND MANAGEMENT DIGITALIZATION FOR COMPLEX PRODUCTION PROCESSES OF A SHIPBUILDING ENTERPRISE: PROBLEM STATEMENT AND MAIN CRITERIA

S.V. Miklush, JSC "Admiralty Shipyards", St. Petersburg, e-mail: miklush.SV@ashipyards.com

V.A. Miklush, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg,
e-mail: miklush-v@yandex.ru

The article considers the issues of digitalization technology of monitoring and management of production processes in shipbuilding. The levels of management of industrial enterprises have been described. The possibilities of using automated monitoring of production processes based on IoT technology (industrial Internet of Things) have also been considered. The difficulties of implementing digital forms of monitoring and management at various stages of the production cycle of the construction of ship orders have been analyzed. The properties and features of RFID technology have been investigated. Possible ways of using RFID technology for monitoring technological processes in shipbuilding at the stage of formation of ship systems in order to minimize costs and improve the efficiency of management decisions, have been given. The main criteria for the development of a management model for complex production processes of a shipbuilding enterprise using RFID technology based on the methodology of qualimetric analysis of management quality criteria have been determined.

Keywords: shipbuilding, digitalization of management, monitoring of production processes, RFID technology

АКТУАЛЬНОСТЬ

Судостроение — это сложный производственный процесс, в который вовлечены множество отраслей промышленности и науки. Производственные процессы судостроительного предприятия представляют собой сложную и многосоставную структуру. Имеют нелинейный характер и множество взаимопроникающих наложений.

Современные суда являются многосоставным изделием с высоким уровнем интеграции и автоматизации. Причем уровень автоматизации неуклонно возрастает и стремится к своему логическому экстремуму в качестве абсолютно автономных судов.

В связи с этим перед судостроителями встают все более сложные задачи на всех этапах строительства заказов, начиная с проектирования и заканчивая испытаниями и сдачей, по обеспечению необходимого класса автоматизации, которые выражаются в увеличение номенклатуры изделий и приборов, увеличение кабельной продукции, трудоемкости на производство работ и времени на наладку и испытания судовых систем.

Основное значение для понимания продвижения строительства судовых заказов имеет получение оперативной и непрерывно актуализируемой информации о текущем состоянии выполнения производственных процессов. Особенno важно иметь возможность мониторинга производственных процессов в реальном масштабе (режиме) времени, что позволяет повысить качество используемых данных по критериям, основными из которых следует считать: системность, оперативность, достоверность, устойчивость, непрерывность, информативность, безизбыточность.

Государственная программа развития (2017 год) «Цифровая экономика Российской Федерации» и распоряжение Правительства РФ от 6 ноября 2021 года № 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» задает вектор развития промышленных предприятий и расширяет внедрение концепции «Индустрии 4.0» в судостроении, обеспечивая трансформацию в «умное предприятие», с использованием технологий цифровых двойников, предиктивной аналитики и промышленного интернета вещей, с целью повышения производительности и конкурентоспособности отрасли в целом [1, 2].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование технологии РЧИ (Радио Частотной Идентификации) и рекомендаций по эффективному применению цифровых меток для идентификации изделий и мониторинга продвижения технологических производственных процессов. Использование специализированной среды для управления и отображения информации по продвижению технологических процессов производства в реальном режиме времени.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формирование концепции исследования. Система управления производственными предприятиями состоит из следующих уровней [3]:

- уровень стратегического управления (АСУП, ERP) — административное и финансовое планирование, определяющее какие заказы выполнять, с каким бюджетом, в какие сроки, из каких комплектующих;
- уровень пооперационного управления (АСУПП, MES) — уровень начальников цехов, технологов, мастеров, определяющий технологические решения по реализации конкретных планов производства; какое оборудование использовать; в каком порядке, с целью минимизации потерь;
- уровень диспетчерского управления (АСУТП, SCADA) — уровень контроллеров и диспетчеров, обеспечивающий мониторинг и обеспечение производственных процессов в соответствии с технологией.

Системы мониторинга промышленных предприятий решают задачу дистанционного наблюдения функционирования и позволяющие оценивать эффективность работы различного типа оборудования. Они связаны с данными по наличию комплектующих, материалов, и интегрированы в информационные системы предприятий. Позволяют анализировать эффективность использования и состояние производственного оборудования, на котором непосредственно осуществляется технологический процесс производства с

помощью электрических, гидравлических, пневматических исполнительных механизмов, а также позволяют формировать аналитические отчеты, прогнозировать и создавать оптимизационные модели для повышения качества управления и уменьшения производственных издержек.

Но при этом, как правило, не мониторятся, а, следовательно, и не контролируются системные показатели управления: итоговые степени (уровни) выполнения планов участков, бригад, цехов, ожидаемые уровни реализации этих планов на конечные сроки реализации, параметры качества выполненных операций, задач, что для управления, особенно, системного — весьма важно и перспективно.

Мониторинг производственных процессов и технологий, связанных с изготовлением отдельных деталей и узлов на станках с ЧПУ достаточно хорошо освоен и используется повсеместно. Гораздо сложнее организовать мониторинг процессов на окончательном этапе постройки судов, в то время, когда насылаются огромное количество технологических процессов друг на друга.

Для формирования систем мониторинга на рынке присутствуют различные датчики и контролеры, позволяющие формировать системы на основе IoT (Internet of Things, Интернет вещей), но возникают трудности с интеграции данных мониторинга в бизнес-процессы предприятия. Только крупные предприятия способны себе позволить внедрение таких технологий из-за высокой удельной стоимости.

Следует отметить, что Интернет вещей является основой «умных» заводов [4]. Он коммутирует различное оборудование друг с другом для того, чтобы облегчить обмен данными. Множество типов датчиков, с возможностью подключения к облаку, устанавливаются на производствах, чтобы собрать данные, которые используются в оптимизации производственного процесса. Массив данных имеет одну из главных ролей на «умном» заводе. Любое решение в области оптимизации производства осуществимо только после процесса сбора данных. Современные средства цифровизации позволяют передавать большие массивы данных в реальном режиме времени и обеспечивают централизованные варианты хранения. Главный результат работы этих процессов — автоматизация. Современные датчики и системы управления оборудованием способны работать автономно и минимизируют человеческий фактор в производственных процессах и позволяют обнаруживать неисправности, анализируя данные, получаемые от датчиков и способны принять решение об остановке работы оборудования без привлечения человека.

Основной критерий эффективности промышленной автоматизации определяет использование собираемых данных [4]. Важно отметить, что сети автоматизации с использованием технологий IoT, наряду с способностью собирать данные, должны и пересыпать данные либо в облако или в интегрированный центр обработки данных. В таких центрах реализуются технологии анализа данных, такие как, например, Hadoop и MapReduce. Также здесь формируются прогностические и предиктивные модели на основе полученных данных.

Планирование и мониторинг производственных процессов на судостроительном предприятии осуществляется в соответствии с сетевым графиком строительства заказов, посредством сред многопроектного планирования и контроля (такие как SAP, Primavera), функционирующих на основе баз данных MS SQL, Oracle и др. Это многопользовательские и многозадачные системы планирования проектов и управления ресурсами, которые позволяют формировать сложные многоуровневые структуры и планировать ресурсы, события с учетом различных ролей и квалификаций. Каждое событие в этом графике включает в себя множество различных технологических процессов и действий. На завершающем этапе постройки показательным критерием продвижения строительства заказов являются предъявленные и принятые заказчиком и Регистром построчные и швартовные удостоверения. Построечные удостоверения включают в себя корпусные, механосборочные, электромонтажные работы. Они подразделяются на корпусные, достроечные, механические и электрические. Каждое удостоверение включает в себя перечень пооперационных приемок в соответствии с чертежом и/или схемой. Фактом, подтверждающим выполнения работ по данному удостоверению, является принятое и подписанное заказчиком и Регистром удостоверение. Существуют большие системы и удостоверения, которые требуют большой трудоемкости и длительных сроков исполнения. Для контроля продвижения работ по этим направлениям необходимо предусматривать более подробную и фрагментированную технологию мониторинга производственного процесса более подробно и фрагментировано.

На заключительном этапе постройки заказов, при проведении испытаний судовых систем и оборудования, завершение испытаний оформляется подписанием швартовных удостоверений по соответствующим системам. Швартовные документы также подразделяются на общесудовую часть (оборудование помещений), судовые устройства, судовые системы, энергетическая установка, электротехническая часть, средства связи и навигации. На данный момент основная сложность заключается в формировании параметров мониторинга производственных процессов судостроительного предприятия в виду их многообразия, взаимопроникновения и нелинейности, особенно на достроечном этапе строительства и этапе испытаний, где окончательно формируются судовые системы жизнеобеспечения, главная энергетическая

система, комплексная система управления техническими средствами, включающие в себя завершение корпусных, механо-сборочных, электро-монтажных и пусконаладочных работ.

Исследование свойств и особенностей РЧИ. Одним из направлений автоматизации производственных процессов является использование технологий радиочастотной идентификации (РЧИ), или RFID меток. Это технология передачи и хранения информации при помощи радиоволн.

Существуют несколько параметров по которым производится классификация РЧИ меток: [5]

- по типу питания, различаются активные и пассивные. Наличие или отсутствие внутреннего питания влияет на дальность действия, скорость и пропускную способность, надежность;
- по частоте рабочего диапазона, от сотен кГц (устаревшие модели) до 5,6 ГГц (новейшие форматы);
- по исполнению и эксплуатации- наклейки, бирки, корпуса.

Также в систему идентификации, помимо меток, входят: антенны, РЧИ-ридеры, серверы, компьютеры.

Основные преимущества РЧИ-технологии:

- большая дальность действия (до несколько сотен метров);
- бесконтактность, не требуется прямая зона видимости;
- считывание в реальном режиме времени;
- метки возможно размещать в любом месте;
- неограниченный срок службы пассивных меток;
- возможность записи большого количества информации на метки;
- возможность шифрования информации, записанной на метки.

Разнообразные технологические решения РЧИ используются для решения множества задач: беспроводного сбора данных считывателями с электронных меток, прикрепленных к объектам или встроенных в них, для идентификации и других целей. Системы РЧИ включают в себя различное оборудование, программное обеспечение, сетевые серверы и базы данных, которые позволяют передавать информацию с меток в интегрированную систему промышленных предприятий. Эти системы позволяют повысить уровни безопасности и конфиденциальности. Большое применение получили РЧИ технологии в логистике и поставке оборудования. Следует выделить два основных типа РЧИ технологий. Первые являются составной частью мониторинга и контроля производственных процессов в промышленности, а вторые используются для идентификации и трекинга производимой продукции.

Для реализации функции контроля все комплектующие, приборы и изделия на складе маркируются РЧИ метками с записанными на них идентификатором, привязанным к базе данных, что позволяет проследить путь каждого изделия со склада в производственные цеха.

В цехах устанавливаются РЧИ-считыватели во всех производственных помещениях, на сборочных линиях. Они позволяют отслеживать маршрут перемещений всех изделий и передавать полученные данные в централизованную базу данных с последующим формированием предупредительной сигнализации, с уведомлением диспетчеров о любых отклонениях в технологической последовательности операций и о нештатных ситуациях.

К сложностям внедрения технологии РЧИ идентификации в судостроении следует отнести то, что радиочастотные метки подвержены влиянию металла. Эта особенность вовсе не исключает применение РЧИ меток, но приводит или к необходимости использования более дорогих меток, разработанных специально для установки на металлические поверхности или к нестандартным способам закрепления меток на объекте.

Разработка модели цифровизации мониторинга и управления производственными процессами судостроительного предприятия на основе технологии РЧИ.

Для того чтобы иметь представление о степени продвижения постройки заказа необходимо предусмотреть технологию мониторинга всех процессов, работающую практически в реальном режиме времени, что позволяет визуализировать СПП в специальной среде с возможностью моделирования развития различных сценариев и прогнозированием критических моментов влияющих на срывы сроков строительства заказа. Также необходимо минимизировать человеческий фактор при выполнении отчета и мониторинга производственных процессов, таким образом, чтобы система мониторинга диагностировала факт совершенного события и выполнения процесса в автоматическом режиме и, в редких, исключительных случаях, посредством подтверждения со стороны человека.

На этапе выпуска РКД на строящийся заказ фактически формируется база данных изделий, узлов, приборов, механизмов, иначе говоря, составных частей судна. В данную базу входят корпусные, механические, электрические схемы и чертежи. Каждое изделие имеет свой уникальный индекс, по которому его возможно идентифицировать. Технология РЧИ идентификации позволяет записывать этот индекс на метку и после нанесения на соответствующее изделие, предоставляется возможность дистанционного считывания нахождения конкретного изделия или прибора.

Следует отметить, что большая часть изделий и приборов поставляется на судостроительное производство сторонними производителями, поэтому мониторинг необходимо осуществлять с момента поступления изделий на склад. При производстве изделий машиностроения идентификация с помощью РЧИ-меток позволит отслеживать передвижение составных частей при межзональных операциях.

На конечном этапе постройке заказа, когда формируются судовые системы, технология РЧИ-идентификации позволит получить фактические данные об установке составных изделий и приборов на заказе. В соответствии с формированием построенных удостоверений каждое удостоверение состоит из перечня чертежей, схем и, следовательно, из оборудования и изделий, входящих в него. Идентификация оборудования и изделий позволяет получать информацию о состоянии производственных процессов по формированию судовых систем на заказе практически в реальном режиме времени. Выполнение каждой операции имеет определенную трудоемкость, и по результату мониторинга возможно определение фактически затраченной трудоемкости и прогнозирование продвижения процесса изготовления соответствующих судовых систем, и как результат всего заказа в целом.

На этапе швартовных испытаний заказа основным критерием завершения пуско-наладочных работ является окончание предъявления соответствующего швартовного удостоверения, относящееся к определенной судовой системе. В процессе наладочных работ необходимо мониторить и контролировать продвижение робот и планировать необходимое обеспечение в части материальной части (судовое оборудование, оснастка, оборудование для тестирования) и технологическую последовательность испытаний.

Особое значение в разработке модели цифровизации мониторинга и управления производственными процессами в судостроении необходимо уделить последовательности операций и их нелинейности и взаимозависимости. Огромное количество компонентов и вариантов развития процессов приводит к усложнению предиктивного прогнозирования и управления производственными процессами в судостроении. В связи с этим перспективной методологией анализа таких сложных систем следует считать квадиметрический анализ [6], основанный на измерениях и оценках критериев качества управления производственных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие современных цифровых технологий в автоматизации и РЧИ идентификации позволяет создавать цифровые модели мониторинга и управления сложными технологическими процессами судостроительного предприятия на основе квадиметрического анализа. Использование таких систем позволяет открыть качественно новые пути решения в повышении качества управления производственными процессами и обеспечить прогнозирование развития ситуации при пристройки судовых заказов, что в итоге приведет к оптимизации процесса планирования, сокращению издержек и сроков строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» утв. Распоряжением Правительства РФ 28 июля 2017 года. № 1632-р.
2. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» от 6 ноября 2021 года. № 3142-р.
3. Белов А.А., Малафеев А.В., Автоматизированная система мониторинга и анализа производственного процесса / «Вестник ИГЭУ» Вып. 4 2005.
4. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Дрожжинов В.И., Куприяновская Ю.В., Иванов М.О. Интернет Вещей на промышленных предприятиях // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162, Vol. 4, No. 12, 2016.
5. Зуборов, И.А. Применения RFID технологий в деятельности различных субъектах хозяйствования / Молодой ученый. Выпуск № 12 (12) 2009, с. 17 — 22.
6. Субетто А.И., Алексеев А.В. Теория практики квадиметрического обеспечения развития морских автоматизированных систем / Актуальные проблемы морской энергетики: материалы седьмой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции в рамках Второго Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018, с. 78 — 86.

REFERENCES

1. The program "Digital Economy of the Russian Federation" approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 1632-r of July 28, 2017. (In Russian)
2. Decree of the Government of the Russian Federation "On approval of the strategic direction in the field of digital transformation of manufacturing industries" dated November 6, 2021, No. 3142-p. (In Russian)
3. Belov A.A., Malafeev A.V. *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i analiza proizvodstvennogo protsessa* [Automated system of monitoring and analysis of the production process] / "Bulletin of IGEU" Issue 4, 2005.
4. Kuprianovsky V.P., Namiot D.E., Drozhzhinov V.I., Kuprianovskaya Yu.V., Ivanov M.O. Internet of Things at industrial enterprises // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 Vol. 4, No. 12, 2016.
5. Ziborov I.A. Applications of RFID technologies in the activities of various business entities / Young scientist. Issue No. 12 (12) 2009, pp. 17 — 22.
6. Subetto A.I., Alekseev A.V. *Teoriya praktiki kvalimetriceskogo obespecheniya razvitiya morskikh avtomatizirovannykh sistem* [Theory of practice of qualimetric support for the development of marine automated systems] // Actual problems of marine energy: materials of the seventh All-Russian Interdisciplinary scientific and Technical conference within the framework of the Second All-Russian Scientific and Technical Forum "Ship power engineering: from the past to the future". — St. Petersburg: Publishing House of SPbGMTU, 2018, pp. 78 — 86.

УДК 623.827

БЛОК-МОДУЛЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

А.В. Юшков, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: yushkovav@gmail.com

А.Н. Дядик, д-р техн. наук, профессор, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: dyadik@rambler.ru

Настоящая статья связана с определением блок-модуля ЭХГ с ТПТЭ и его основного оборудования. В статье рассмотрены схемно-конструктивное исполнение блок-модуля электрохимического генератора с твердополимерным топливным элементом для воздухонезависимой энергетической установки и технические решения и принципы построения, обеспечивающие выполнение электрохимическим генератором функционального назначения. Приведено краткое описание батареи топливных элементов БТЭ-50К мощностью 50 кВт, а также функциональное назначение и принцип работы ее основных элементов. Также в статье представлено техническое описание систем блока-модуля ЭХГ, включая системы преобразования и коммутации электроэнергии (СПКЭ), предназначенной для обеспечения электроэнергией потребителей собственных нужд оборудования блока ЭХГ. Представлена модель компоновки блок-модуля электрохимического генератора и обслуживающих систем.

Ключевые слова: ЭХГ, ТПТЭ, ВНЭУ, топливный элемент, водородная энергия

BLOCK-MODULE OF AN ELECTROCHEMICAL GENERATOR WITH A SOLID POLYMER ELECTROLYTE

А.В. Yushkov, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: yushkovav@gmail.com
А.Н. Dyadik, DSc, professor, SMTU, e-mail: dyadik@rambler.ru

This article is related to the definition of the ECG block module with TPTE and its main equipment. The article considers schematic design of the block module of an electrochemical generator with a solid polymer fuel cell for an air-independent power plant and technical solutions and principles of construction, ensuring the performance of an electrochemical generator of functional purpose. The article provides a brief description of the BTE-50K fuel cell battery with a capacity of 50 kW, as well as the functional purpose and principle of operation of its main elements, while presenting a technical description of the ECG unit-module systems, including electric power conversion and switching systems (SPCE), designed to provide electricity to consumers for their own needs of the ECG unit equipment. A model of the layout of the block module of an electrochemical generator and service systems has also been presented.

Keywords: ECG, TPFC, air-independent air engine, fuel cell, hydrogen energy

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнанным фактом считается, что неатомные подводные морские объекты нового поколения невозможно представить без воздухонезависимых энергоустановок (ВНЭУ). Это в одинаковой степени относится как к обитаемым, так и к необитаемым (робототехническим) объектам.

- ВНЭУ для подводных морских объектов нового поколения развиваются по двум направлениям:
- тепловые энергоустановки (ТЭУ), основанные на тепловых циклах и машинных способах преобразования энергии, среди которых наибольшие перспективы имеют двигатель с внешним подводом теплоты (ДВПТ) — двигатель Стирлинга и парогазотурбинные установки замкнутого цикла;
 - энергоустановки на топливных элементах или иначе ЭУ на основе электрохимических генераторов (ЭУ с ЭХГ).

Анализ состояния развития и внедрения ВНЭУ на подводных морских объектах показывает, что в настоящее время более десятка зарубежных стран уже имеют в своем составе неатомные подводные лодки (НАПЛ), оснащенные ВНЭУ указанных выше типов. Их сравнение по таким критериям, как КПД, шумность и некоторым другим наглядно показывает, что ВНЭУ с ЭХГ значительно превосходят остальные типы ВНЭУ по всем основным параметрам.

В настоящее время на территории Российской Федерации активно ведутся работы по развитию воздухонезависимых энергетических установок на основе топливных элементов. Заказчиком данных работ является Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. «ЦНИИ СЭТ» выполняет

работы по созданию ВНЭУ с ЭХГ с твердополимерным топливным элементом применительно к морским объектам. Цель настоящей работы — продемонстрировать структурную и габаритную модели блок-модуля ЭХГ и обслуживающих его систем для возможности ее дальнейшей оптимизации применительно к морским подводным объектам.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящей статье приводится техническое описание и расчетные характеристики единичного блока-модуля ЭХГ мощностью 450 кВт.

В подтверждение принятых решений по ЭХГ выполнены расчеты блока-модуля ЭХГ функционального агрегата автономного функционального модуля ВНЭУ [1] и приведены в табл. 1. Данные расчеты будут подтверждены проведением стендовых испытаний совместно с обслуживающими системами. Опытный образец изготовлен и находится на территории предприятия (изготовителя).

Таблица 1
Технические характеристики блока-модуля ЭХГ

Наименование параметра	Значение
1. Тип ЭХГ	Блок-модуль ЭХГ на базе БТЭ с ТПТЭ
2. Уровень разработки	Техническое предложение.
3. Номинальная электрическая мощность блока-модуля ЭХГ, кВт	450
4. Количество энергоблоков в составе блока-модуля ЭХГ, шт.	4
5. Количество батарей в энергоблоке, шт.	2
6. Мощность единичной батареи, кВт	56,25
7. Электроэнергия, выдаваемая потребителю: род тока напряжение, В	Постоянный от 175 до 320
8. Коэффициент полезного действия на номинальной нагрузке, %	59,5
9. Коэффициент полезного действия на нагрузке 20 %	72
10. Система запуска	Автоматическая (по сигналу от СУ)
11. Давление водорода на входе в блок-модуль ЭХГ, МПа (абс.), не менее	0,2
12. Давление кислорода на входе в блок-модуль ЭХГ, МПа (абс.), не менее	0,2
13. Расход водорода на номинальной нагрузке, кг/ч	22,7
14. Расход кислорода на номинальной нагрузке, кг/ч	180,2
15. Температура водорода на входе в блок-модуль ЭХГ, °С	от 20 до 75
16. Температура кислорода на входе в блок-модуль ЭХГ, °С	от 5 до 70

В первом разделе статьи приведены основные технические характеристики опытного образца блока-модуля ЭХГ мощностью 450 кВт. Как видно из табл. 1 при сравнительно невысоком потреблении реагентов, а также сравнительно низкой температурой на входе, опытный образец обладает внушительность мощностью и КПД.

2. ОПИСАНИЕ ВЫБРАННОЙ СТРУКТУРЫ БЛОКА-МОДУЛЯ

Во втором разделе статьи описана структурная схема энергоблока блока-модуля ЭХГ, которая наглядно иллюстрирует взаимодействие между основными элементами энергетической установки. Из представленной структурной схемы можно сделать вывод, что за счет применения технологии струйных аппаратов была обеспечена рециркуляция рабочих газов, тем самым оптимизирована работа системы и увеличен ее КПД.

Блок-модуль ЭХГ мощностью 450 кВт объединяет энергоблоки, состоящие из батарей ТЭ типа «БТЭ-50К», и прочее оборудование в единый энергетический комплекс с обеспечением энергоблоков, как основных структурных единиц блока-модуля ЭХГ, рабочими средами и алгоритма взаимодействия всего оборудования. Это позволяет выбрать оптимальные характеристики оборудования и просчитывать энергетические и массовые потоки на всех режимах его функционирования. Структурная схема энергоблока блока-модуля ЭХГ приведена на рис. 1.

Для оптимизации схемы энергоблока организована рециркуляции анодного и катодного газов для получения избыточного расхода реагентов (водорода и кислорода) через реакционные камеры БТЭ-50К с целью поддержания баланса между водяной, паровой и газовой фазами реагентов, необходимого для штатного функционирования БТЭ-50К в заданных условиях работы. Рециркуляция рабочих газов

осуществляется с помощью струйных аппаратов, что исключает затраты собственных нужд на электропитание побудителей расхода (рециркуляции) рабочих газов и увеличивает надежность этих систем.

Две батареи БТЭ-50К в энергоблоке подключены по электричеству последовательно, по газам — параллельно.

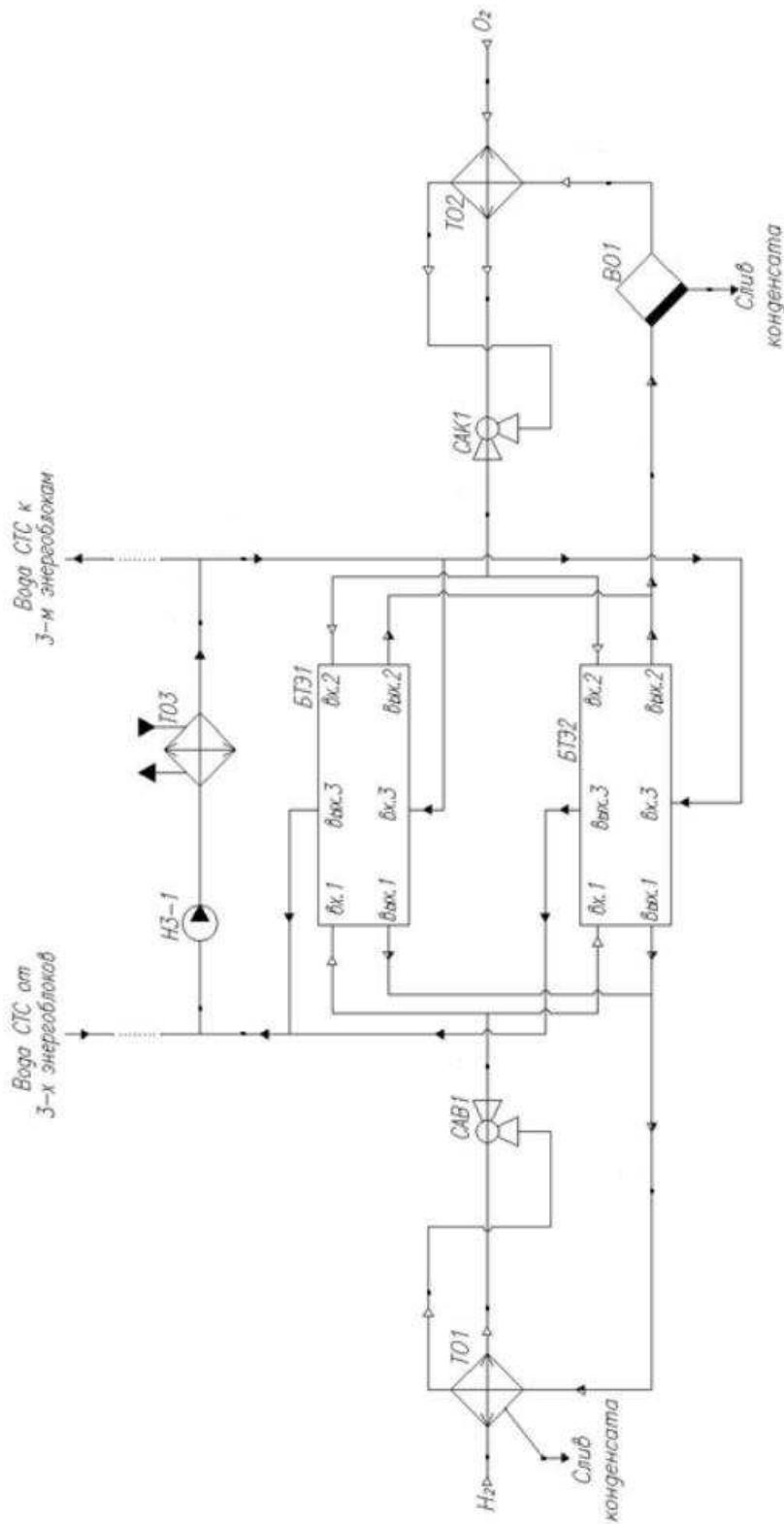


Рис. 1 Структурная схема энергоблока

3. СОСТАВ БЛОКА-МОДУЛЯ ЭХГ

Блок-модуль ЭХГ мощностью 450 кВт включает в себя:

- четыре энергоблока, каждый из которых включает две БТЭ-50К;
- систему хранения, подготовки и подачи топлива;
- систему хранения, подготовки и подачи окислителя;
- систему терmostатирования;
- систему преобразования и коммутации электроэнергии;
- систему автоматического управления и контроля.

Источником электроэнергии в энергоблоке блока-модуля ЭХГ мощностью около 112 кВт являются две батареи твердополимерных топливных элементов БТЭ-50К, соединенные по электричеству последовательно. В основе работы топливного элемента лежит принцип получения электроэнергии постоянного тока в ходе протекания электрохимической реакции. При подаче топлива (водорода) в анодную полость батареи ТЭ и окислителя (кислородно-азотной смеси) в катодную образуется электричество, вода и тепло.

Конструктивно батарея БТЭ-50К состоит из четырех секций по 45 топливных элементов, собранных между собой двумя крышками: передней и задней. Отбор электроэнергии от батареи производится с токосъемных пластин передней и задней секций.

Основой электрохимической части ТЭ в каждой секции является интегрированный мембрально-электродный блок (МЭБ). Конструкция МЭБ состоит из двух рамок из поликарбоната, мембранны с расположеными с обеих сторон газодиффузионными слоями. На мембрану предварительно нанесены с обеих сторон тонкие каталитические слои. Распределение газовых потоков по поверхностям МЭБ, разделение двух смежных ТЭ и обеспечение передачи электрического тока от одного ТЭ к смежному ТЭ при последовательном их соединении в секции осуществляется камерами биполярными холодильными БХК через металлические сетки, расположенные между БХК и МЭБ. БХК состоит из двух штампованных пластин, изготовленных из листа толщиной 0,1 мм, с гофрами в области, соприкасающейся с МЭБ, и расположенной между ними уплотнительной рамкой. Гофры пластин БХК выступают наружу и образуют множество параллельных, со стороны кислорода — вертикальных, со стороны водорода — горизонтальных каналов. Взаимно-перпендикулярное расположение гофр катодной и анодной пластин БХК обеспечивается при сборке и образует перекрестное движение реагентов в рабочей зоне ТЭ: вертикальное — по кислороду, горизонтальное — по водороду. Распределительная сетка, расположенная внутри БХК, обеспечивает равномерность потока воды СТС в объеме БХК, а также электрический контакт анодной и катодной пластин БХК. Подача рабочих сред в батарею и отвод из нее продуктов реакции осуществляется через каналы в изоляционных пластинах и крышках, а далее через трубопроводы обеспечивающих систем.

Основное оборудование энергоблоков блока-модуля ЭХГ технологически увязано обслуживающими системами, обеспечивающими подвод рабочих сред: топлива и окислителя, воды терmostатирования и инертного газа (азота), а также электрическими связями коммутации и каналами управления.

Оборудование энергоблоков блока-модуля ЭХГ в зависимости от функционального назначения отнесено к соответствующей системе, имеющей следующие обозначения: система хранения, подготовки и подачи топлива (СХППТ); система хранения, подготовки и подачи окислителя (СХППО); система терmostатирования (СТС).

СППТ обеспечивает подачу топлива (конвертированного водорода) от системы ВНЭУ в контур рециркуляции анодного газа БТЭ-50К, а также поддержание необходимой кратности рециркуляции анодного газа и вынос накопившейся в анодных полостях БТЭ-50К влаги. Рециркуляция анодного газа обеспечивается инжекционным устройством — струйным аппаратом [2 — 6] по одному на каждый энергоблок, в котором преобразуется потенциальная энергия водорода, поступающего от системы ВНЭУ, в кинетическую энергию движения инжектируемой среды (анодный газ) с заданной кратностью расхода.

СХППТ включает в свой состав трубопроводы и арматуру.

Контур рециркуляции водорода подразумевает использование струйных аппаратов в качестве побудителей расхода, использующих потенциальную энергию подаваемого газа (водорода), с минимальным потреблением электроэнергии на собственные нужды, и предназначен для организации избыточного расхода водорода через анодные полости с целью поддержания баланса между водяной, паровой и газовой фазами топливной смеси, необходимого для штатного функционирования БТЭ-50К.

Реализация струйных технологий [2] в контуре рециркуляции анодного газа обеспечивает поддержание требуемых для функционирования БТЭ-50К термодинамических параметров (температуры, давления, влажности) паро-водородной смеси, поступающей на вход БТЭ-50К, периодические продувки парогазовой

топливной смеси в атмосферу с целью удаления накопленных нереагирующих примесей и удаление конденсата из тракта рециркуляции в систему ВНЭУ.

Струйный аппарат рециркуляции водорода представляет собой конструктивно моноблочную сборку из восьми параллельно включенных струйных аппаратов с единой приемной камерой низкого давления, оборудованной устройством оптимизации эжектируемого потока, и единую напорную камеру, также оборудованную устройством оптимизации смешанного потока.

Система подготовки и подачи окислителя (СППО) обеспечивает подачу кислорода, из криогенного хранилища системы ВНЭУ в контур рециркуляции катодного газа БТЭ-50К, для обеспечения в ней процесса электрохимического окисления водорода, а также поддержания необходимой кратности рециркуляции катодного газа и вынос накопившейся влаги в катодных полостях БТЭ-50К. Рециркуляция катодного газа обеспечивается аналогичным образом с помощью инжекционного устройства.

СХПО включает в свой состав трубопроводы с арматурой.

На ветке рециркуляции катодной парокислородной смеси установлен подогреватель катодного газа, возвращаемого на вход инжектирующих устройств, и влагоотделитель, являющиеся основными элементами контура подачи кислорода в БТЭ-50К. Контур рециркуляции кислорода подразумевает использование аналогичных по конструкции струйных аппаратов в качестве побудителей расхода, как и в контуре рециркуляции водорода.

Система терmostатирования (СТС) обеспечивает необходимый температурный режим работы БТЭ-50К с отводом избыточной физической теплоты реакции электрохимического окисления водорода. В состав СТС входят трубопроводы, арматура, а также датчики давления и температуры. Теплоноситель СТС снимает теплоту, выделяющуюся при электрохимической реакции окисления водорода кислородом в ТЭ, которая затем передается теплоносителю системы заказа через теплообменник.

По коллекторам СТС вода подводится параллельно к каждой батарее БТЭ-50К. Вода через патрубок на крышке БТЭ-50К поступает в БХК каждого ТЭ, проходит через внутреннюю полость БХК, охлаждая ТЭ, и через выходной патрубок отводится от батареи.

Избыток теплоты, выделяющейся в активных слоях электродов ТПТЭ, неизрасходованный при частичном испарении образующейся реакционной воды, передается теплоносителю системы СТС.

Для компенсации изменения объема теплоносителя в контуре СТС применяется компенсационная емкость.

Система преобразования и коммутации электроэнергии (СПКЭ) предназначена для обеспечения электроэнергии потребителей морского объекта и потребителей собственных нужд оборудования ВНЭУ, включая САУ и К, коммутации (включение-отключение) и защиты ЭХГ по главной силовой сети.

Источниками входных напряжений для СПКЭ являются БТЭ, вырабатывающие постоянное напряжение. Вид электроэнергии, выдаваемой ЭХГ — постоянный ток напряжением.

Блок-модуль ЭХГ включает в себя четыре группы по две последовательно соединенные по току БТЭ. Указанное включение позволяет задействовать все восемь БТЭ одного агрегата ВНЭУ, необходимых для получения мощности подключения 450 кВт.

В состав СПКЭ входят инверторы DC/AC, преобразующие постоянное напряжение ЭХГ в трехфазное 380 В и однофазное 220 В переменное напряжение с частотой тока 50 Гц, преобразователи DC/DC [1].

Контроль параметров блока-модуля ЭХГ и автоматическое управление технологическими процессами обеспечивает система автоматического управления и контроля (САУ и К).

Таким образом, можно сделать выводы о конструктивных особенностях и функциональном назначении блока-модуля ЭХГ и его обслуживающих системах.

4. МОДЕЛЬ БЛОКА-МОДУЛЯ ЭХГ

В четвертом разделе статьи представлена компоновка элементной базы блок-модуля ЭХГ.

В статье рассмотрена модель компоновки автоматизированного блока-модуля электрохимического генератора, состоящего из восьми батарей БТЭ-50К с трубопроводами, вспомогательными механизмами, системой автоматического управления и контроля в помещении 3500×1250×1450 мм. Расположение оборудования блока-модуля ЭХГ в заданном помещении показано на рис. 2.

Восемь батарей БТЭ-50К (поз. 1) объединены в две группы по четыре и установлены симметрично в левой и правой частях помещения (поз. 5) по две батареи друг над другом. Две соседние по горизонтали батареи (на одном уровне) образуют энергоблок и электрически соединены последовательно. В каждый

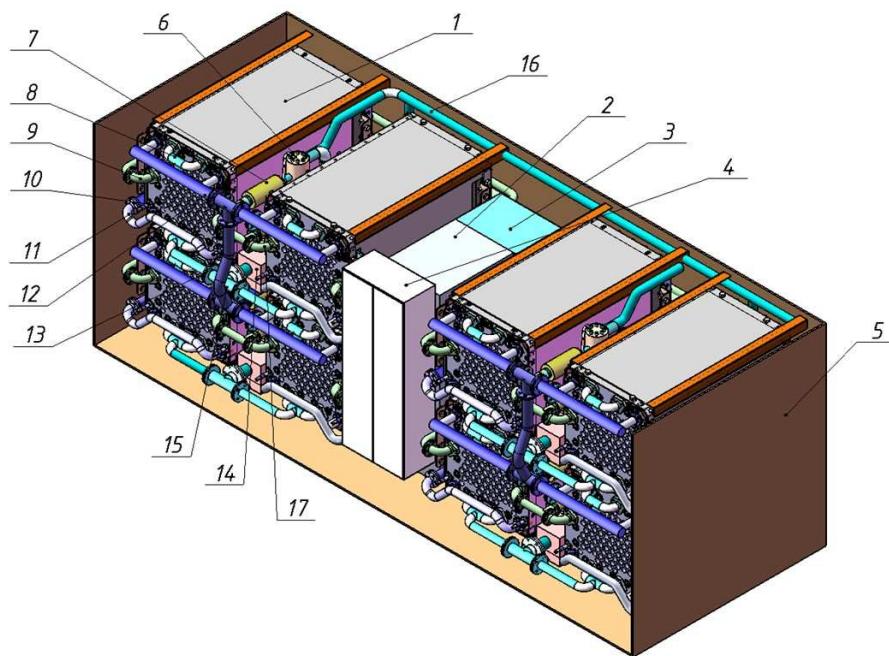


Рис. 2 Габаритная модель энергоблока

энергоблок подается топливо и окислитель (водород и кислород) с раздачей на каждую батарею через трубопроводы поз. 8, 15, 16, 17. При этом имеется система отвода неизрасходованного в БТЭ водорода через трубопровод поз. 9, кислорода через трубопровод поз. 13 и возврата в энергоблок кислорода через теплообменник (поз. 6) и струйный аппарат (поз. 7). Аналогичные аппараты имеются для возврата в БТЭ неизрасходованного водорода. Отходящий от энергоблока кислород проходит также через конденсато-отводчик (поз. 14) с целью удаления реакционной воды. Подача воды СТС осуществляется по трубопроводу поз. 11, отвод ее по трубопроводу поз. 12. Через трубопровод поз. 10 отводится реакционная вода.

В средней части помещения расположены циркуляционный насос поз. 2, теплообменник системы СТС, шкаф блока СУ поз. 4, преобразователь частоты циркуляционного насоса поз. 3, а также необходимые клапаны и датчики.

Четыре пары батарей образуют четыре энергоблока, соединенные электрически параллельно. Каждый энергоблок имеет общую систему трубопроводов кислорода поз. 16, водорода поз. 17, воды СТС поз. 11 и дренажа реакционной воды поз. 10.

Батареи установлены и закреплены в ячейках общего каркаса с направляющими, по которым каждая батарея может быть выдвинута с целью ее демонтажа из блок-модуля. Каркас соединен с корпусными конструкциями морского объекта. Батареи в рабочем положении зафиксированы и надежно закреплены.

Кабели от батарей подсоединяются к токопроводящим (медным) шинам, расположенным над энергоблоками.

Трубопроводы рабочих сред и дренажа реакционной воды (продукта реакции водорода и кислорода) включают в себя трубопроводы, принимающие водород, кислород, воду для СТС, азот для продувки от систем ВНЭУ — магистральные трубопроводы. Следующий уровень подсистем подачи рабочих сред — трубы, раздающие и собирающие рабочие среды, теплообменные аппараты, струйные аппараты, обеспечивающие рециркуляцию газов.

Каждый энергоблок (состоит из двух батарей) подключен к следующему оборудованию:

- общим устройствам подачи кислорода и водорода: трубы от главной магистрали, теплообменники поз. 6 и струйные аппараты поз. 7 (инжекторы, обеспечивающие рециркуляцию рабочих сред) и клапаны;
- общие устройства и трубопроводы, отводящие водород и кислород от БТЭ: трубы, водоотделитель (из трубопровода кислорода), трубы подвода «вторичной» среды к теплообменнику перед струйным аппаратом.

Местом преимущественного расположения этих узлов принято пространство между батареями каждого энергоблока.

Трубопроводы воды СТС расположены перед передними крышками батарей четырех энергоблоков. Эти трубопроводы воды СТС объединены в общую схему двух энергоблоков, поскольку СТС является общей для всего блока-модуля ЭХГ.

Трубопроводы дренажа реакционной воды разделены для кислородной и водородной части трубопроводов и раздельно сливают ее в систему ВНЭУ.

Таким образом, в данной статье приведены данные по основным расчетным характеристикам блока-модуля ЭХГ, описана структурная схема энергоблока, приведен состав и функциональное назначение блок-модуля ЭХГ и его обслуживающих систем, а также представлена габаритная модель размещения элементной базы. В результате представленная в статье информация может быть актуальна для оптимизации опытного образца ВНЭУ с целью дальнейшего его применения от морских подводных объектов до космических аппаратов. За последние двадцать лет отечественные разработки уже сделали значительный шаг вперед в области развития ВНЭУ с ЭХГ и при определенном инвестировании в данную отрасль может быть наложено серийное производство уже в обозримом будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландграф И.К. и др. Блок ЭХГ функционального агрегата ВНЭУ мощностью 420 кВт. Расчет характеристик/ КЛГИ.563644.001РР. 2012. — 30 с.
2. Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю. Двухфазные струйные аппараты. — Л.: Судостроение, 1989. — 240 с.
3. Андреев В.М., Дядик А.Н., Шаманов Н.П. Зависимость для определения предельного напора двухкомпонентного струйного аппарата//Теплофизические процессы в судовых энергетических установках/Труды ЛКИ, 1981, с. 33 — 37.
4. Мясищиков В.Е. Пароводяные инжекторы. Расчет, проектирование, применение, 100 вариантов конструкции. — СПб.: Элмор, 1997, 416 с.
5. Дядик А.Н. Экспериментальное исследование двухкомпонентного струйного аппарата//Труды ЛКИ: Проблемы повышения эффективности СЭУ, 1985. с. 31 — 36.
6. Андреев В.М., Дядик А.Н., Шаманов Н.П. Коэффициент инъекции двухкомпонентного струйного аппарата//Депонирована в ЦНИИ «Румб», БСИ «Судостроение», вып. 1, 1982. № ДР-1479. — 7 с.

REFERENCES

1. Landgraf I.K. et al. *Blok EKHG funktsionalnogo agregata VNEU moshchnostyu 420 kVt. Raschet kharakteristik* [The ECG unit of the VNEU functional unit with a capacity of 420 kW. Calculation of characteristics]/ KLGИ.563644.001РР. 2012, — 30 p.
2. Shamanov N.P., Dyadik A.N., Labinsky A.Yu. *Dvukhfasnye struynye apparaty* [Two-phase jet apparatuses]. — L.: Shipbuilding, 1989. — 240 p.
3. Andreev V.M., Dyadik A.N., Shamanov N.P. *Zavisimost dlya opredeleniya predelnogo napora dvukhkomponentnogo struynogo apparata* [Dependence for determining the limiting pressure of a two-component jet apparatus]//Thermophysical processes in marine power plants/ Proceedings of the LKI, 1981. pp. 33 — 37.
4. Myasnikov V.E. *Parovodyanie inzhektory. Raschet, proektirovaniye, primenie, 100 variantov konstruktsii* [Steam–water injectors. Calculation, design, application, 100 design options]. — St. Petersburg: Elmore, 1997. — 416 p.
5. Dyadik A.N. *Eksperimentalnoe issledovanie dvukhkomponentnogo struynogo apparata* [Experimental study of a two-component jet apparatus]//Works of LKI: Problems of increasing the efficiency of SEU, 1985. pp. 31 — 36. 6. Andreev V.M.,
6. Andreev V.M., Dyadik A.N., Shamanov N.P. *Eksperimentalnoe issledovanie dvukhkomponentnogo struynogo apparata* [Injection coefficient of a two–component jet apparatus] //Deposited in the Central Research Institute "Rumb", BSI "Shipbuilding", issue 1, 1982. No. DR-1479. — 7 p.

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (<https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/nts.php>). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
 - фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
 - сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
 - индекс УДК;
 - аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
 - ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Представляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
 - основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
 - список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neurofiziologija [Neurophysiology]*. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniia v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. *Matematicheskoe modelirovaniye plazmy v sisteme kompaktnyi tor*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. *Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostei i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv* [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://ts-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

• цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

• краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

следовать хронологию статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

не включать несущественные детали;

обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

• выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общезвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация — книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "... для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовок, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (kuteynikov.ma@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Комpetентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolsix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritervices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn-24-dlcyxgbyj.xn-80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtp.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

Фото для обложки журнала предоставлено Мажириным Ильей Аркадьевичем, инженером-инспектором Дальневосточного филиала РС

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 72/73

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 31.01.2024. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/tu/