

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

НОВЫЕ КРИТЕРИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ
ИТОГИ РАБОТЫ ИМО

МОРСКИЕ ПОДВОДНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ
ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

МОРСКИЕ ОПЕРАЦИИ
ОЦЕНКА РИСКОВ И НОРМАТИВНАЯ БАЗА



№ 64/65
декабрь
2021

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

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.С. Бойко

E-mail: boyko.ms@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, главный редактор журнала, 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., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

А.В. Марченко – д.т.н., проф., Свальбардский 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 ВИНТИ 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 журнал «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.

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor-in-Chief

Maxim Boyko

E-mail: boyko.ms@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, Editor-in-Chief of Research Bulletin by 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, Head of Hull Department, 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

№ 64/65

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
- 2.9.7 – Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

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
- 2.9.7 – Operation of water transport, water ways, and hydrography

Санкт-Петербург
2021



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Шурпьяк В.К., Толмачев С.А., Мусонов М.В. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу 4

V.K. Shurpyak, S.A. Tolmachev, M.V. Musonov New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work

ОБОЗРЕНИЕ: Итоги 77-й сессии Комитета ИМО по защите морской среды 18

Чернов О.А. Система проверки государств — членов ИМО: современное состояние и переход к дистанционному формату 19

O.A. Chernov IMO member state audit scheme. Current state and transition to remote mode

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

Петров А.А., Рябова А.А., Рябов Ф.С. Оценка ходкости судна на открытой воде после демонтажа носового бульба 27

A.A. Petrov, A.A. Ryabova, Ph.S. Ryabov Assessment of the propulsion qualities of a ship in the open water after dismantling the bulbous bow

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Андрюшин А.В., Федосеев С.С., Кутейников М.А. Разработка проекта требований к величине глобальной ледовой нагрузки, действующей на корпус движительно-рулевой колонки для арктических судов ледовых классов **Arc4** — **Arc9** 37

A.V. Andryushin, S.S. Fedoseev, M.A. Kuteynikov Development of the draft requirements for the value of global ice loads acting on azimuth thrusters fitted on **Arc4** — **Arc9** ice class ships

Аносов А.П., Восковщук Н.И. Устройство для активной противоледовой защиты морских нефтегазовых сооружений 58

A.P. Anosov, N.I. Voskovschuk Active ice protection of offshore oil and gas facilities

ОБОЗРЕНИЕ: РС предоставляет проектанту инструмент для автоматизированной проверки корпусных конструкций 67

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА MATERIALS AND WELDING

Авдонкин А.С., Балагура С.В., Марков С.П. Оценка допустимых уровней дефектности стальных труб и сварных швов при эксплуатации морских подводных трубопроводов 68

A.S. Avdonkin, S.V. Balagura, S.P. Markov Assessment of permissible defects for steel pipes and weld seams during the operation of offshore subsea pipelines

Болховитин Ю.С., Гришин А.С., Межевитинов А.Ю., Ханухов В.К. Использование новых синтетических материалов в судовых дейдвудных подшипниках 82

Yu.S. Bolkhovitin, A.S. Grishin, A.Yu. Mezhevitinov, V.K. Hanukhov Application of new synthetic materials in ship stern bearings

ОБОЗРЕНИЕ: РС разработал требования к валам из полимерно-композиционных материалов (ПКМ) 90

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Буянов А.С., Леонова О.Н., Реуцкий А.С. Анализ опыта применения метанола и этанола 91
в качестве топлива на судах

A.S. Buyanov, O.N. Leonova, A.S. Reutsky Methanol and ethanol as ship fuel: analysis of application experience

Епихин А.И., Хекерт Е.В. Перспективные способы оптимизации систем управления судовыми 98
энергетическими установками на базе нечеткой логики и фрактального анализа

A.I. Epikhin, E.V. Khekert Promising methods for optimization of control systems for ship power plants based
on fuzzy logic and fractal analysis

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ELECTRICAL EQUIPMENT

Григорьев А.В., Малышев С.М., Васильев А.Ю. Электромагнитная совместимость судового 103
электрооборудования на судах с электродвижением

A.V. Grigoryev, S.M. Malyshev, A.Yu. Vasilyev Electromagnetic compatibility of ship electrical equipment
on ships with electric propulsion

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGY

Черейский И.З., Петров А.А., Бродянский С.В. Разработка требований Регистра к проведению 110
процедуры трехмерного сканирования корпуса судна и оценки качества полученной модели
для целей выполнения расчетов посадки и остойчивости

I.Z. Chereysky, A.A. Petrov, S.V. Brodyansky Development of RS requirements for the procedure for scanning
the ship's hull and assessing the quality of the resulting model for trim and stability calculations

КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ CONTAINER SHIPPING

Сергеичев И.В., Федоренко А.Н., Федулов Б.Н., Докучаев С.В., Скоропупов Д.А. Виртуальные 120
испытания интермодального контейнера-цистерны с сосудом из полимерных композиционных материалов

I.V. Sergeichev, A.N. Fedorenko, B.N. Fedulov, S.V. Dokuchaev, D.A. Skoropupov Virtual testing
of intermodal tank container with fiber-reinforced plastics shell

ОБОЗРЕНИЕ: Специалисты РС прошли обучение по аддитивным технологиям 133

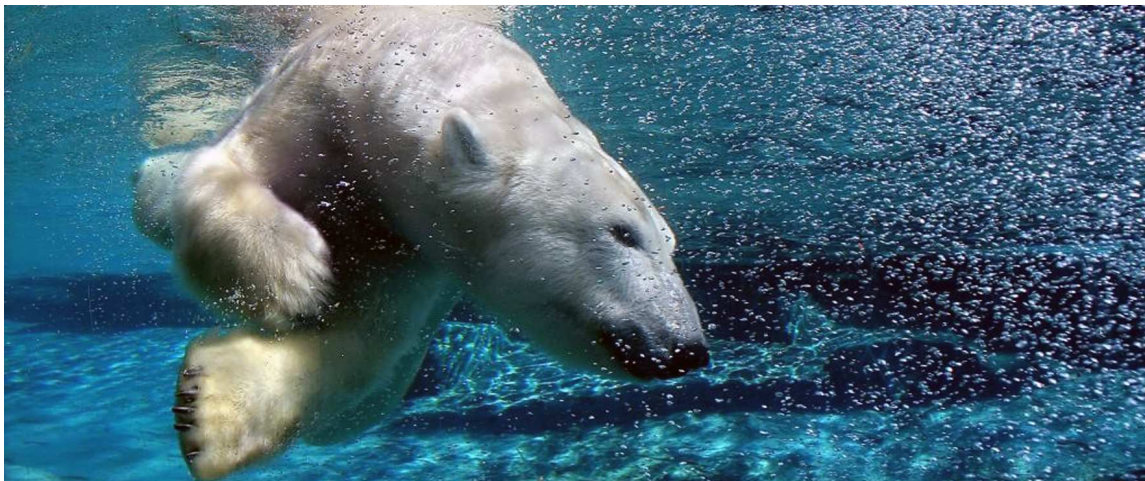
НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ OIL AND GAS FACILITIES

Мебрахту Д.А., Тимофеев О.Я. Количественная статистическая оценка риска проведения 134
морских операций

D.A. Mebrahtu, O.Ya. Timofeev Quantitative statistical risk assessment of marine operations

Вальдман Н.А., Виноградов Ф.Д., Илюхин В.Н., Таровик В.И. Концептуальные нормативно-правовые . . . 145
и технические аспекты развития требований к морским операциям

N.A. Waldman, F.D. Vinogradov, V.N. Ilyukhin, V.I. Tarovik Conceptual regulatory and technical aspects
of marine operations requirements development



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.5; 629.12.06-7

НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ИМО ПО УМЕНЬШЕНИЮ ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С МОРСКИХ СУДОВ, СОВЕРШАЮЩИХ ТРАНСПОРТНУЮ РАБОТУ

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

С.А. Толмачев, Представительство Российской Федерации при Международной морской организации, Лондон, email: tolmatchev-s@yandex.ru

М.В. Мусонов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: musonov.mv@rs-class.org

В статье изложена информация о принятых на 76-й сессии Комитета по защите морской среды (КЗМС) ИМО поправках к Приложению VI Конвенции МАРПОЛ. Документ регламентирует применение двух новых критериев энергоэффективности: Индекса энергоэффективности для существующих судов (ЕЕХИ) и эксплуатационного показателя углеродной интенсивности (СИ), которые становятся обязательными с 01.01.2023 года для существующих судов, совершающих транспортную работу. Изложены общие принципы разработки критериев энергоэффективности для морских судов и деление критериев энергоэффективности на конструктивные и эксплуатационные. Кратко описано содержание новых требований МАРПОЛ и новых рекомендательных Руководств ИМО по данному вопросу расчетам, освидетельствованию и сертификации, разработанных для более эффективного и единообразного осуществления требований, дана общая оценка авторов в отношении использованного подхода, и предложен алгоритм действий судовладельцев для соответствия новым критериям энергоэффективности. Указаны недостатки новых критериев, в частности отсутствие учета затрат энергии, не связанных с выполнением транспортной работы.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, энергетическая эффективность судна, критерии энергоэффективности, углеродная интенсивность

NEW IMO REQUIREMENTS FOR REDUCTION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM SHIPS PERFORMING TRANSPORT WORK

V.K. Shurpyak, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg,
e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

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

M.V. Musonov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: musonov.mv@rs-class.org

The article provides information on the amendments to Annex VI of the MARPOL Convention adopted at the 76th session of the IMO Marine Environment Protection Committee (MEPC), regulating the application of two new energy efficiency criteria: Energy Efficiency Index for Existing Ships (EEXI) and operational Carbon Intensity Indicator (CII). These criteria become mandatory from 01.01.2023 for existing ships performing transport work. General principles have been outlined for the development of energy efficiency criteria for sea-going ships as well as the division of energy efficiency criteria into structural and operational. The content of the new MARPOL

requirements and recommendatory IMO Guidelines on calculations, survey and certification developed for uniform implementation of the requirements, have been briefly described, general assessment has been given with regard to the approach used and an algorithm for shipowners' actions to meet the new energy efficiency criteria has been proposed. Shortages of new criteria have also been mentioned, in particular, the fact that energy consumption not related to transport work has not been accounted for.

Keywords: *greenhouse gas emissions, ship energy efficiency, energy efficiency criteria, carbon intensity*

1. СТРАТЕГИЯ ИМО ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В МЕЖДУНАРОДНОМ СУДОХОДСТВЕ

Планета Земля пригодна для жизни уже в течение 4 млрд лет, что свидетельствует о сравнительно малых изменениях температуры на ее поверхности. Это значит, что приток энергии всегда был равен ее расходу. Но в последние десятилетия на энергетический баланс планеты оказывает возрастающее влияние увеличение концентрации парниковых газов, которые связывают с антропогенным воздействием. Хотя нельзя считать доказанным, что антропогенные выбросы в атмосферу являются единственной и главной причиной изменения климата, но их влияние неоспоримо.

Основными парниковыми газами являются углекислый газ (CO_2) и водяной пар (H_2O). Но если вода конденсируется и выпадает в виде осадков, то углекислый газ задерживается в атмосфере продолжительное время, пока не будет растворен в океане или поглощен растениями в процессе фотосинтеза. Если бы в атмосфере Земли не было этих газов, то температура на ее поверхности была бы на 30°C ниже. Повышение температуры вызывает опасения таяния ледников и подъема уровня мирового океана.

С целью снижения влияния парникового эффекта и опасности изменения климата ООН приняла Рамочную конвенцию ООН об изменении климата (РКИК ООН) об общих принципах действия стран по проблеме изменения климата. Конвенция была принята на «Саммите Земли» в Рио-де-Жанейро в 1992 году и вступила в силу 21 марта 1994 года.

Позднее в 1997 году в рамках РКИК было подписан Киотский протокол, который стал первым глобальным соглашением об охране окружающей среды, основанным на рыночном механизме регулирования — механизме международной торговли квотами на выбросы парниковых газов. Первый период действия Протокола начался в 2008 году и закончился в 2012 году. В 2012 году был согласован второй период действия обязательств (Дохинская поправка к Киотскому протоколу).

Тем не менее, в рамках ежегодных конференций ООН по изменению климата проводились переговоры о мерах, которые должны быть приняты после окончания второго периода действия обязательств в 2020 году. Это привело к принятию в 2015 году Парижского соглашения по климату.

Парижское соглашение по климату, «признавая, что изменение климата является общей озабоченностью человечества», обязало подписавшие его государства принять меры по сокращению антропогенного влияния на изменение климата. Основной целью этого документа провозглашено ограничения роста температуры до $1,5^\circ\text{C}$, признавая, что это значительно сократит риски и последствия изменения климата для человечества. Соглашение было принято 196 сторонами на 21-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата 12 декабря 2015 года в Париже. Соглашения вступило в силу 4 ноября 2016 года.

Россия подписала соглашение 22 апреля 2016 года и приняла его постановлением Правительства от 21 сентября 2019 года.

Участники Парижского соглашения обязуются принять национальные планы по снижению выбросов, технологическому перевооружению и адаптации к климатическим изменениям и пересматривать их в сторону уменьшения выбросов каждые пять лет. Первый пересмотр был в 2018 году на добровольной основе, а следующий, уже обязательный, — в 2023 году.

Члены Соглашения также берут на себя обязательство разработать национальные стратегии перехода на безуглеродную экономику и наладить международный обмен «зелеными» технологиями. В Соглашении ничего не говорится о механизме контроля за его соблюдением и мерах по принуждению его исполнению. Документ лишь дает право проверять информацию, предоставляемую странами об их достижениях по сокращению выбросов CO_2 .

Выбросы CO_2 от судоходства, как и от авиации, не включаются в национальную статистику. Поэтому ООН не может налагать обязательства по сокращению выбросов с судов, как это делается национальными государствами, например, на электростанции или автотранспорт. В этой связи еще в соответствии с Киотским протоколом ИМО была определена ответственная за ограничение выбросов международного судоходства

организацией, а судоходство получило статус независимого, рассредоточенного и глобального сектора мирового хозяйства, который должен регулироваться со стороны ИМО.

Особая проблема для судоходства заключается в том, что растущая глобализация и рост потребления влекут за собой неуклонный рост морских перевозок что, как ожидается, приведет к значительному увеличению выбросов CO_2 в этом секторе экономики к 2050 году.

Если сравнивать наземный транспорт с морским, то на тонну груза при перевозках на одинаковое расстояние грузов железнодорожным транспортом выделяется в $2 \div 7$ раз больше, а автотранспортом в $5 \div 15$ раз больше CO_2 , чем от морских судов. Таким образом, с точки зрения влияния на изменение климата, судоходство является наиболее благоприятным видом транспорта.

Однако на тонну перевозимого груза судоходство выбрасывает в несколько сотен раз больше SO_x и NO_x и более чем в 50 раз больше твердых частиц (одним из компонентов которых является «черный углерод»), чем современный наземный транспорт. Поэтому в первую очередь ИМО были разработаны нормативы по ограничению выбросов в атмосферу с судов наиболее вредных веществ: NO_x , SO_x и летучих органических веществ.

Пока не подпадают под регулирование инструментов ИМО содержащиеся в выхлопных газах твердые частицы, но ИМО в настоящее время предметно занялось этим вопросом.

По данным ИМО [1] около 90 % мировых грузов перевозятся морскими судами и поэтому сохранение морских перевозок является необходимым условием для устойчивого роста мировой торговли. Во всем мире судоходство выбрасывает около 1 млрд. тонн CO_2 в год, что на 2018 год составило около 2,9 % всех антропогенных выбросов CO_2 . Около 80 % приходится на грузовые суда, а 20% — на рыболовные суда, пассажирские суда и т.д.

Для того чтобы соответствовать температурным целям Парижского соглашения предполагается, что к 2050 году глобальные выбросы CO_2 будут сокращены как минимум вдвое по сравнению с уровнем 1990 года.

Между тем, выбросы CO_2 от судоходства уже значительно увеличились с 1990 года. Если рост продолжится, а все другие секторы экономики сократят свои выбросы CO_2 в соответствии с Парижским соглашением, то при наихудшем сценарии к 2050 году судоходство может существенно увеличить свою долю в суммарных антропогенных выбросах CO_2 .

Существуют разные прогнозы развития этой ситуации, от самых пессимистичных (до 10 % выбросов от судоходства) до умеренных, принимающих во внимание тот факт, что с 2008 года рост мировой торговли морем не пропорционален росту выбросов от судоходства. Это хорошо видно на рис. 1 [2], где оранжевые кривые показывают увеличение грузопотока в процентах, а голубая кривая показывает уменьшение выбросов CO_2 от международного судоходства в процентах относительно данных 2008 года. В связи с целым комплексом мер, принятых под эгидой ИМО, в будущем эта тенденция будет только усиливаться.

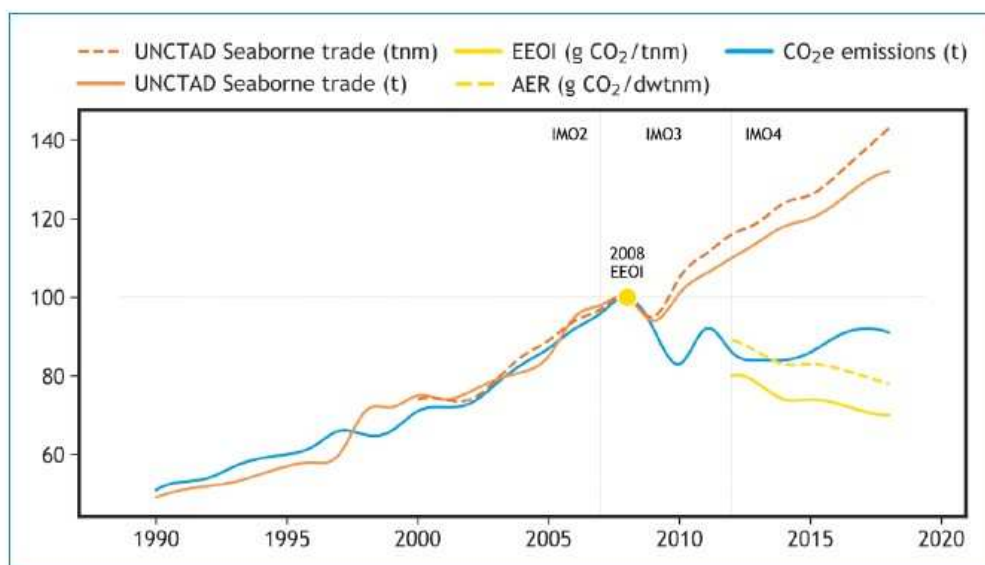


Рис. 1 График изменения морской торговли и выбросов CO_2 с судов по данным [2]

Тем не менее, с середины 2010-х годов, одновременно с разработкой и принятием Парижского соглашения, в ИМО предметно начали обсуждаться вопросы разработки универсальных мер регулирования выбросов CO₂ для судоходного сектора. В результате этой работы в 2011 году были приняты первые поправки к Приложению VI к МАРПОЛ в отношении энергоэффективности новых судов (индекс *EEDI*), а на 70-й сессии КЗМС в октябре 2016 года ИМО было принято решение о разработке Первоначальной стратегии ИМО по снижению выбросов с судов (далее — Первоначальная стратегия). Первоначальная стратегия [3] была принята в апреле 2018 года на 72-й сессии КЗМС и включала в себя три основных направления будущей работы (уровня амбиций):

1. снижение выбросов CO₂ с судов за счет постепенного ужесточения конструктивных и эксплуатационных требований к энергоэффективности для определенных типов судов, совершающих транспортную работу;

2. снижение выбросов CO₂ на единицу транспортной работы в среднем по международному судоходству не менее чем на 40 % к 2030 году, цель — снижение до 70 % к 2050 году по сравнению с показателями 2008 года; а также

3. обеспечение достижения пикового уровня выбросов парниковых газов с судов, осуществляющих международные перевозки, в кратчайшие сроки, с целью дальнейшего сокращения общих годовых выбросов как минимум на 50 % к 2050 году по сравнению с 2008 годом.

В рамках Первоначальной стратегии предполагается разработка кратко- (до 2023 года), средне- (до 2030 года) и долгосрочных мер (после 2030 года) конкретного характера по снижению выбросов парниковых газов в международном судоходстве.

Для оценки фактических объемов выбросов парниковых газов с судов ИМО периодически организует проведение исследований. Последнее такое исследование [2] было проведено в 2020 году. На основании полученных данных предполагается пересмотр Первоначальной стратегии в 2022 — 2023 гг.

2. КРИТЕРИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

Для реализации Первоначальной стратегии ИМО приняла решение разработать ряд специальных инструментов (критериев энергоэффективности) для регулирования выбросов CO₂. Первым из них стал конструктивный коэффициент энергоэффективности для новых судов (*EEDI* — Energy Efficiency Design Index), который в настоящее время является обязательным для определенных типов судов, включая пассажирские, совершающих транспортную работу и поставленных 1 июля 2015 года и после этой даты.

Критерии энергетической эффективности применяются для того, чтобы охарактеризовать процесс производства, передачи или потребления энергии, оценить потенциал энергосбережения на различных объектах (установка, цех, предприятие, судно, жилой район, регион, государство) и обосновать правильность выбора энергосберегающих мероприятий.

В общем виде понятие «критерий» означает общую характеристику процесса, которую необходимо выразить в численной форме количественным показателем или оценкой. Критерий должен обладать универсальностью и отражать те свойства объекта, которые интересны для регулирования. Таким образом, критерий — это признак, на основании которого формируется оценка качеств объекта или процесса, причем тех качеств, которые нас интересуют, то есть для различных целей требуются различные критерии для оценки разных качеств одного и того же объекта.

Поскольку нас интересует энергетическая эффективность, то в качестве такого критерия можно выбрать отношение критерия «вреда» (затрат энергии или выброса вредных веществ при ее получении) к критерию «полезности», который для транспортного судна характеризуется транспортной работой. В общем виде это можно выразить простой универсальной формулой

$$K = E/U,$$

(1)

где U — полезность объекта;

E — затраты энергии при выполнении функций объекта, обеспечивающих его полезность.

При этом можно разделить критерии энергоэффективности на 2 группы:

- **конструктивные**, характеризующие совершенство объекта, то есть коэффициенты, оценивающие потенциальную энергетическую затратность объекта при выполнении своих функций по прямому назначению в течение жизненного цикла изделия;

• текущие или **эксплуатационные**, то есть коэффициенты, учитывающие затраты энергии и пользу, производимую объектом за какой-то промежуток времени, например, календарный год, то есть насколько эффективно использовался объект в течение какого-то определенного периода.

В качестве примера конструктивного критерия энергоэффективности судна можно рассмотреть вышеуказанный EEDI. При разработке EEDI в качестве критерия полезности, характеризующего пользу транспортного судна, была выбрана транспортная работа, которую может произвести судно при полной загрузке с эксплуатационной скоростью.

В качестве критерия, характеризующего энергопотребление выбрано количество CO₂, выбрасываемое судном в процессе выполнения этой транспортной работы. Выбор количества CO₂ в качестве критерия энергозатратности судна был обусловлен тем, что была целью являлся учет возможности применения различных сортов топлива и создания таким образом предпочтений для применения газового топлива на судах.

При расчете EEDI учитываются только судовые потребители энергии, работающие на ходу судна, то есть только потребители, задействованные при производстве судном транспортной работы. Другие потребители топлива, не задействованные на ходу судна для обеспечения работы пропульсивной установки, например, вспомогательные котлы, не учитываются.

Требования к EEDI устанавливают стандарт энергоэффективности для судов, экологическая нагрузка при этом измеряется в граммах выбросов CO₂ и соотносится с пользой для общества, выраженной в виде транспортной работы. Впервые в 2008 году на 57-й сессии КЗМС в документе MEPC57/4/12 от японской стороны была представлена расчетная формула для определения величины конструктивного индекса CO₂ который имеет размерность: г CO₂/т-миля.

$$\text{Attained design CO}_2 = \frac{CF \cdot SFC \cdot P}{\text{Capacity} \cdot V_{ref}} \quad (2)$$

В числителе этой формулы величина номинальной мощности главного двигателя P , кВт, умноженная на удельный расход топлива этого двигателя SFC , г/кВт-ч, и на безразмерный переводной коэффициент CF , г CO₂/г топлива, между расходом топлива в двигателе, г, и выбросами CO₂, г, определенными по содержанию углерода в конкретном топливе.

В знаменателе формулы — произведение величины вместимости судна (в качестве вместимости предполагалось принимать дедвейт) и эксплуатационной скорости судна V_{ref} , выраженной в узлах.

Согласно Руководству по методу расчета $EEDI$ для новых судов, вступившее в силу с 01.01.2013 года (MEPC.212(63)), с поправками, внесенными MEPC 308(73) [4], необходимо пользоваться формулой (3), которая является развитием исходной:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w \cdot f_m} + \frac{((\prod_{j=1}^M f_j \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{AE_{eff(i)}}) C_{FAE} SFC_{AE}) - (\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w \cdot f_m} \quad (3)$$

В числителе формулы (3) присутствуют 4 члена, первый из которых отражает расход топлива главной пропульсивной установкой, второй учитывает расход топлива на производство электроэнергии вспомогательными генераторами на ходу судна, третий учитывает мощность, потребляемую валогенератором, и мощность, высвобождающуюся в результате применения на судне инновационных технологий для выработки электроэнергии на ходу судна (при их наличии), и четвертый учитывает мощность инновационной технологии, использующуюся для приведения судна в движение (при наличии).

В знаменателе формулы — произведение величины вместимости судна Capacity (в качестве вместимости принимается дедвейт, т, или валовая вместимость GT для пассажирских судов) и скорости судна V_{ref} , при мощности, равной 0,75 максимальной. Для учета особенности конструкции судна предусмотрены специальные коэффициенты (f_j, f_i, f_c, f_m, f_w) учитывающие ледовый класс судна и другие особенности его назначения и условий эксплуатации.

Достигнутый конструктивный коэффициент энергетической эффективности $EEDI$ судна должен соответствовать требуемому значению $EEDI$, которое зависит от типа, размера и даты закладки киля судна. Резолюцией MEPC.203(62) были приняты поправки к Приложению VI к МАРПОЛ, включающие базовую кривую (базовую линию) допустимых значений $EEDI$ для грузовых судов.

В качестве базовых линий для различных типов судов было рекомендовано принять осредненную величину *EEDI* для данной группы судов, которая является функцией вместимости и выражается формулой

$$\text{Reference line value} = ab^{-c}, \quad (4)$$

где b — дедвейт;

a и c — константы, определенные из регресс-анализа для каждого типа судна.

Для построения базовых линий была использована база данных Lloyd's Register Fairplay (LRFP). Пример построения базовой линии показан на рис. 2.

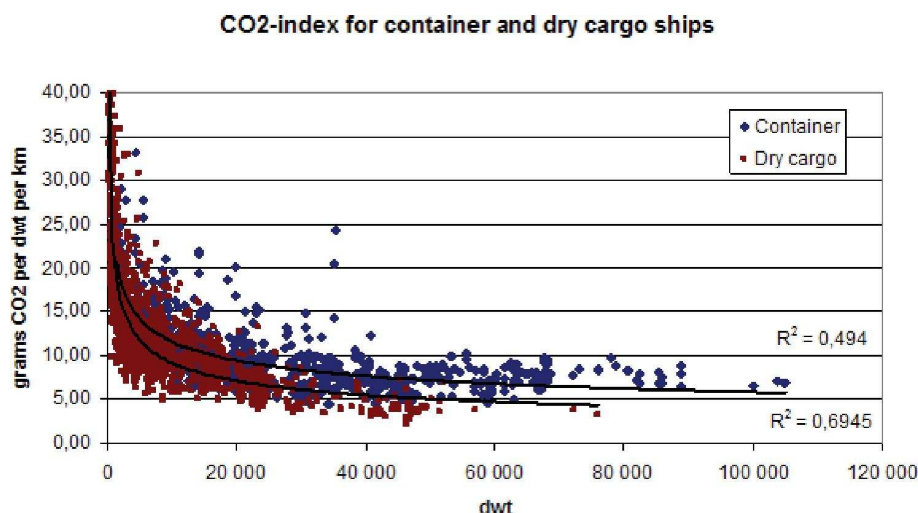


Рис. 2 Пример построения базовой линии для контейнеровозов и судов для генеральных грузов валовой вместимостью более 400 [1]

Однако простая разработка базовых линий приводит только к возможности оценки энергоэффективности. Для уменьшения выбросов с судов, что и является основной задачей, введены специальные понижающие коэффициенты в зависимости от года постройки судна. Согласно правилу 21 Приложения VI к МАРПОЛ 73/78 достигнутый *EEDI* нового судна должен быть не более требуемого *EEDI*, который определяется как

$$\text{Требуемый } EEDI = (1 - X/100)Ref, \quad (5)$$

где X — понижающий коэффициент, отражающий требование по уменьшению расхода топлива на милю и тонну перевозимого груза для новых судов на период до 2025 года (для 2025 года он определен максимальной величиной 30, в зависимости от дедвейта для всех типов судов, к которым применяются требования);

Ref — значение базовой линии в зависимости от типа судна и дедвейта, рассчитанной по формуле (4).

Запланировано три этапа увеличения понижающего коэффициента в среднем на 10 %. В настоящее время с 01.01.2020 года действует вторая фаза уменьшения требуемого *EEDI*.

EEDI предназначен для установления стандартов энергоэффективности, которым суда должны придерживаться на стадии проектирования. При этом, чем позже дата постройки судна, тем более строгим будет стандарт, установленный МАРПОЛ для такого судна.

Пример построения графика требуемого *EEDI* для балкеров показан на рис. 3.

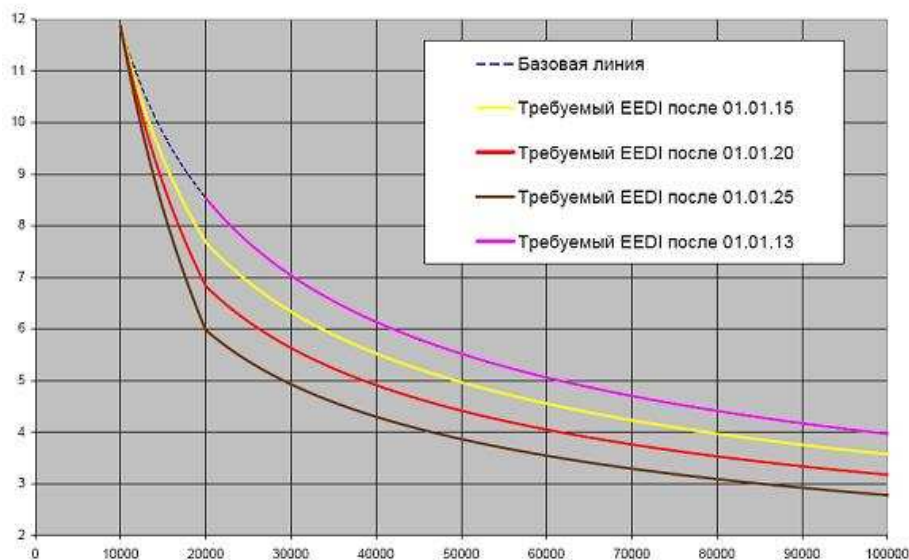


Рис. 3 Требуемый *EEDI* для балкеров в зависимости от дедвейта и года постройки

3. НОВЫЙ КОНСТРУКТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ *EEXI*

В рамках реализации Первоначальной стратегии в 2018 году ИМО приступила к разработке краткосрочных мер по снижению выбросов CO_2 с судов, которые касались энергоэффективности.

Учитывая уровень амбиций, установленный в Первоначальной стратегии, а также соответствующие прогнозы о том, что темпы уменьшения выбросов CO_2 в связи с расширением применения *EEDI* будут недостаточными, ИМО решила по этому вопросу отступить от основополагающего принципа своей работы о нежелательности распространения новых требований на существующие суда и начала разработку критериев энергоэффективности для судов, находящихся в эксплуатации:

- конструктивного *EEXI* (Energy Efficiency Existing Ship Index, конструктивный коэффициент энергоэффективности существующих судов); и
- эксплуатационного показателя интенсивности выбросов углерода (*CII*).

На 76-й сессии КЗМС в июне 2021 года были приняты соответствующие поправки к Приложению VI к МАРПОЛ, которые вводят эти новые показатели для существующих судов [5]. Для этого пришлось практически полностью переписать ряд отдельных Правил и всю часть 4 Приложения VI к МАРПОЛ «Энергоэффективность судов», название которой поменялось на «Углеродная интенсивность международного судоходства» (см. табл. 1).

Таблица 1

**Соотношение нумерации существующих правил Приложения VI к МАРПОЛ
и пересмотренных на 76-й сессии КЗМС [5]**

Правило существующего Приложения VI МАРПОЛ	Правило пересмотренного Приложения VI МАРПОЛ	Название
19	19	Применение
19А*	20	Цель
19В*	21	Функциональные требования
20	22	Достигнутый конструктивный коэффициент энергоэффективности (достигнутый <i>EEDI</i>)
20А*	23	Достигнутый коэффициент энергоэффективности существующего судна (достигнутый <i>EEXI</i>)
21	24	Требуемый <i>EEDI</i>
21А*	25	Требуемый <i>EEXI</i>
22	26	Судовой план управления энергоэффективностью (SEEMP)
22А	27	Сбор и поставка данных о расходе судового топлива
22В*	28	Эксплуатационная углеродная интенсивность
23	29	Развитие технического сотрудничества и передачи технологий, связанных с улучшением энергоэффективности судов
* — новые Правила, ранее одобренные 75-й сессией КЗМС.		

Кроме того, для однозначного понимания и выполнения новых требований в срочном порядке были разработаны десять новых Руководств, три из которых все еще находятся в стадии разработки и должны быть приняты на 78-й сессии КЗМС в 2022 году.

Требования в отношении конструктивного коэффициента энергоэффективности для существующих судов (*EEXI*) вступают в силу с 1 ноября 2022 года. *EEXI* применяется ко всем судам тех же типов, на которые распространяются требования по *EEDI*, за исключением пассажирских судов. Такие суда должны будут, по аналогии с *EEDI*, провести расчет достигнутого *EEXI*, который должен быть меньше или равен требуемому значению *EEXI* для данного типа судна.

В соответствии с правилом 25 Приложения VI к МАРПОЛ 73/78 достигнутого *EEXI* должен быть меньше требуемого *EEXI* или равен ему:

$$\text{Достигнутый } EEXI \leq \text{Требуемый } EEXI, \quad (6)$$

где Требуемый $EEXI = (1 - Y/100) \times \text{величина Базовой линии } EEDI$.

Величина понижающего коэффициента Y определяется из таблицы в этом правиле.

Срок выполнения требования — к первому плановому периодическому освидетельствованию судна или первоначальному, в зависимости от того, что наступит ранее 1 января 2023 года или после этой даты. Соответствие оформляется путем выдачи нового Международного свидетельства об энергоэффективности судна (IEEC).

Конвенция МАРПОЛ устанавливает основные требования в отношении *EEXI*, а также понижающий коэффициент от значения базовой линии для конкретного типа и вместимости судна, рассчитанной для *EEDI*. Требуемое значение *EEXI* определяется для различных типов судов, причем величины понижающих коэффициентов связаны с базовой кривой *EEDI*. Эти величины находятся в диапазоне между фазами 2 и 3 понижающих коэффициентов *EEDI*, что означает на практике, что требуемый *EEXI* для существующих судов в ряде случаев равен требуемому *EEDI* для судна в постройке.

EEXI, также, как и *EEDI*, характеризует выбросы CO_2 на тонну перевезенного груза и милю пройденного расстояния. **Принципиальное различие** *EEXI* и *EEDI* состоит в том, что *EEDI* предварительно рассчитывается еще на этапе проектирования судна, и поэтому если судно не соответствует требуемым показателям *EEDI*, по этому показателю в проекте выбирают двигатель меньшей мощности или более экономичный, с меньшим удельным расходом топлива.

При расчете *EEXI* двигатель уже выбран и установлен на судне, поэтому если судно не соответствует требуемым показателям *EEXI*, то судно сможет продолжать эксплуатацию только при ограничении мощности двигателя. Ограничение мощности должно быть зафиксировано и предусмотрено в конструкции двигателя специальным механическим устройством-ограничителем, например упором, ограничивающим движение топливной рейки или соответствующими электронными средствами управления. Устройство ограничения мощности должно быть опечатано на судне, а снятие ограничения возможно для использования полной

мощности двигателя только в экстремальных штормовых условиях эксплуатации судна, когда недостаток мощности на валу может повлиять на безопасность.

EEXI является конструктивным индексом, а не эксплуатационным, то есть значение индекса определяется только конструкцией судна, а не способами его использования. Основная формула расчета *EEXI* (7) в соответствующем Руководстве ИМО [6] повторяет формулу (3) для расчета *EEDI* из Руководства ИМО по методам расчета *EEDI* [4]:

$$EEXI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w \cdot f_m} + \frac{((\prod_{j=1}^M f_j \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{nEFF} f_{eff(i)} P_{AEff(i)} C_{FAE} SFC_{AE}) - (\sum_{i=1}^{nEFF} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME}))}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w \cdot f_m} \quad (7)$$

Выбросы рассчитываются исходя из установочной мощности главного двигателя, соответствующего удельного расхода топлива главного двигателя и вспомогательных двигателей, а также коэффициента пересчета между видом топлива и соответствующей массой CO_2 .

Транспортная работа определяется как произведение дедвейта судна и скорости, связанной с потребляемой мощностью. Расчет не учитывает максимальную мощность двигателя, для большинства типов судов расчет производится для эксплуатационной мощности равной 75 % полной мощности главного двигателя или 83 % ограниченной мощности главного двигателя (в случае установленного ограничителя мощности). Для этой удельной мощности рассматривается соответствующий удельный расход топлива главного двигателя и скорость, которую судно развивает при этой мощности.

Расчетная скорость для *EEXI* определяется на основе ходовых испытаний, проводимых в рамках сертификации *EEDI*. Для судов, предшествующих *EEDI*, расчетная скорость *EEXI* берется из кривой скорости/мощности, определенной в модельных испытаниях или из материалов ходовых испытаний судна.

Руководство по расчетам *EEXI* предлагает возможность расчета контрольной скорости по приближенной формуле, основанной на типе судна, дедвейте и установочной мощности. Эта приближительная расчетная скорость будет консервативной, так как в формуле предусмотрен коэффициент запаса, составляющий 5 % скорости или 1 уз в зависимости от того, что меньше. Поэтому выгоднее по возможности использовать материалы отчетов о модельных испытаниях или ходовых испытаниях судна.

Причиной введения формулы приближенной контрольной скорости является возможное отсутствие необходимых данных по ходовым испытаниям судна.

Может возникнуть аналогичная дилемма и для конкретных значений расхода топлива главных и вспомогательных двигателей в отношении возможного отсутствия данных об испытаниях двигателя. Для этого случая стандартные максимальные значения удельного расхода топлива главных и вспомогательных двигателей приводятся в руководстве по расчетам *EEXI* (190 г/кВт*час для главных двигателей и 215 — для вспомогательных). Эти значения удельного расхода топлива консервативны, и поэтому применение данных о типовых испытаниях двигателя улучшает достигнутый *EEXI*. Рекомендуется пользоваться соответствующими отчетами.

Требования по расчету *EEXI* так же, как и *EEDI*, не применимы к судам, не совершающим транспортную работу, а также к судам ледового класса категории А, как это определено в Полярном кодексе.

Требования к *EEXI* применяются к существующим судам с 01.01.2023 года и время на приведения судов в соответствие этим требованиям весьма ограничено. Для безболезненного внедрения на флоте новых требований можно порекомендовать судоходным компаниям в общем случае следующий **алгоритм действий**.

1. Определить суда компании, подпадающие под требования по *EEXI*.
2. Для судов, имеющих сертификацию по *EEDI*, произвести проверку того, удовлетворяет ли достигнутый *EEDI* требуемому *EEXI* в соответствии с Руководствами ИМО, используя имеющийся Технический файл по *EEDI*. Если удовлетворяет, новый расчет *EEXI* и Технический файл по *EEXI* не требуется.
3. Рассчитать требуемый и достигнутый *EEXI* на основе консервативных оценок (по приближенной формуле скорости и консервативных данных по удельному расходу топлива). Если расчеты удовлетворительные, то оформить их в виде требуемого «Технического файла *EEXI*», представить в классификационное общество, если оно имеет соответствующее поручение Морской Администрации флага судна и получить необходимые документы.
4. Если в п. 3 требуемый *EEXI* меньше достигнутого, то судовладельцу следует предпринять усилия по уточнению расчетной скорости V_{rev} и расхода топлива. Значение V_{rev} может быть уточнено путем пересчета данных ходовых испытаний судна при постройке или проведения новых, соответствующих методике *EEDI*.

Удельный расход топлива возможно уточнить у производителя двигателя из материалов испытаний дизеля по выбросам NO_x .

5. Если предпринятые в п. 4 действия не приводят к выполнению требований по *EEXI*, необходимо определить величину ограничения мощности главного двигателя, при которой требования выполняются, и провести установку соответствующих устройств на двигатель. Для этого необходимо обратиться к производителю двигателя.

4. НОВЫЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ СИ

Так же, как и *EEDI* для новых судов, *EEXI* является показателем технического совершенства судна с точки зрения его энергоэффективности.

То есть, рассматривая конструкцию судна и сопоставляя ее со средним значением аналогичного показателя для группы однотипных судов, можно сделать заключение о соответствии требованиям. При этом сделанное таким образом заключение будет верным в течении всего срока эксплуатации судна, если только судно не подвергнется модернизации.

Это принципиально отличает конструктивные показатели, которыми являются *EEDI* и *EEXI* от эксплуатационных критериев, к которым следует отнести индекс углеродной интенсивности (Carbon Intensity Indicator — *CII*) и план управления энергоэффективностью судна (*SEEMP*).

Новый критерий энергоэффективности судов *CII*, введенный поправками к Приложению VI к МАРПОЛ [4], принятыми на 76-й сессии КЗМС, является эксплуатационным показателем, учитывающим фактическое потребление топлива и расстояние, пройденное для каждого отдельного судна в эксплуатации. Согласно Руководству ИМО по вычислению *CII* [7] достигнутый индекс углеродной интенсивности можно выразить простой формулой:

$$\text{attained } CII = M/W,$$

(8)

где M — суммарная масса в граммах эмиссии CO_2 с судна в течении года, которая рассчитывается путем суммирования массы каждого сорта потребленного топлива, перемноженного на соответствующий для этого сорта топлива переводной коэффициент, взятый из Руководства по расчету *EEDI* [2];
 W — транспортная работа, которая вычисляется как суммарное расстояние.

Транспортная работа определена как произведение вместимости судна (валовая вместимость для круизных, грузовых и пассажирских судов ро-ро, дедвейт для остальных типов судов, на которые распространяется требование) на пройденное расстояние в морских милях в соответствии с информацией, представленной по каждому судну в систему сбора данных по расходу топлива ИМО (IMO DCS), за вычетом расстояния, пройденного в условиях, которые подпадают под исключения (подробнее об исключениях — далее).

Требование распространяется на суда валовой вместимостью более 5000 определенных типов, совершающие транспортную работу. Кроме того, требование распространяется на круизные пассажирские и пассажирские ро-ро.

После 2023 года ежегодно для таких судов должен производиться расчет т.н. достигнутого показателя углеродной интенсивности (*Attained CII*) на основе данных по потребленному топливу. Достигнутый *CII* определяется как количество выбросов CO_2 (в граммах) от топлива, потребленного на борту, на единицу транспортной работы.

Достигнутый *CII* должен быть меньше или равным требуемому *CII* (*Required CII*), который определяется по формуле, аналогичной формуле (5) в Руководстве ИМО [9], где приводятся конкретные значения базовых линий для типов судов, определяющих требуемый *CII*, а также значения ежегодных понижающих коэффициентов требуемого *CII*.

Требуемые значения (базовые линии) рассчитываются на основе усредненных фактических данных по углеродной интенсивности в международном судоходстве и вместимости судов в соответствии с доступными данными из Системы сбора данных по расходу топлива (DCS — Data Collection System) ИМО.

В качестве отправной точки был взят 2019 год — первый год, за который есть данные в DCS. Такой подход позволил избежать необходимости пересчета имеющихся в наличии данных в показатели 2008 год, от которых отталкивается Первоначальная стратегия ИМО. Также это дало возможность основывать расчет базовых линий на более достоверных данных при понимании, что базовые значения будут устанавливаться с учетом достигнутого с 2008 по 2019 гг. фактического снижения углеродной интенсивности.

Поправки предполагают применение к базовым линиям ежегодного понижающего коэффициента для целей последовательного снижения углеродной интенсивности международного судоходства в целом в пределах согласованного уровня амбиций, заложенного в Первоначальной стратегии, т.е. как минимум на 40 % к 2030 году от уровня 2008 года.

Руководство ИМО (9) по понижающим коэффициентам содержит методику определения достигнутой эксплуатационной углеродной интенсивности международного судоходства в целом, предложения по расчету разницы между 2008 годом, являющимся точкой отсчета в соответствии с Первоначальной стратегией, и 2019 годом, который взят за основу при разработке базовых линий (ввиду наличия данных), методику расчета ежегодных понижающих коэффициентов и предлагаемые их конкретные значения в период 2020 — 2027 гг.

Способы достижения *CII* на предстоящие три года должны указываться в плане управления энергоэффективностью (SEEMP).

Рассчитанный показатель достигнутого *CII* должен представляться в Администрацию (или признанную организацию) совместно с данными по потребленному топливу. Администрация верифицирует полученную информацию и на ее основе определяет **рейтинг углеродной интенсивности** А, В, С, D и E, где А — наивысший рейтинг, который присваивается судну.

На ежегодной основе до 2030 г. предполагается ужесточение требований в отношении требуемых значений *CII*. Данные о рейтинге заносятся в выдаваемый Администрацией (или признанной организацией) Документ о соответствии по потребленному топливу, который теперь подтверждает еще и выполнение требований по *CII*.

В случае низкого рейтинга (Е в течение года или D в течение трех лет подряд) судно должно разработать план корректирующих действий и включить его в пересмотренный SEEMP, который должен быть представлен Администрации в течении одного месяца после предоставления отчета о достигнутом *CII*.

Следует также отметить, что поскольку Первоначальная стратегия ИМО говорит о снижении выбросов не менее чем на 40 % к 2030 году **в среднем по международному судоходству**, существование определенного количества менее энергоэффективных судов (с рейтингами E и D) за счет более энергоэффективных (с рейтингами А и В) вполне допустимо.

Как и в случае с *EEDI/EECI*, требования по *CII* не будут распространяться на суда категории А, как определено в Полярном кодексе.

Таким образом, для большинства типов судов достигнутый *CII* будет считаться по методике, аналогичной расчету Annual Efficiency Ratio (AER) в рамках т.н. «Принципов Посейдона» — отраслевого самоуправляемого соглашения между крупнейшими финансовыми институтами, направленного на реализацию климатических целей, на основе которого принимаются решения о финансировании проектов в судоходной отрасли. Многим судовладельцам знакома эта методика, соответственно, это облегчит для них внедрение новых требований ИМО.

Достигнутая эксплуатационная углеродная интенсивность международного судоходства в целом рассчитывается как суммарные выбросы в граммах на единицу суммарной транспортной работы за соответствующий год.

Важным элементом является расчет того, на сколько по факту снизилась эксплуатационная углеродная интенсивность международного судоходства с 2008 по 2019 гг. Это необходимо, чтобы правильно рассчитать, насколько еще необходимо снижать углеродную интенсивность, чтобы достичь требуемых 40 % снижения от уровня 2008 года, начиная с года начала применения требований (2023 год) до 2030 года.

Было предложено два способа расчета, в зависимости от различных подходов к определению транспортной работы:

- «подход на основе спроса» или demand-based (в основе перевезенный груз); и
- «подход на основе предложения» или supply-based (в основе — вместимость судна).

Первый способ дает необходимость снижения углеродной интенсивности международного судоходства в целом к 2030 году от уровня 2019 года приблизительно в 11 %, второй — в 22 % [9].

Соответственно, два способа расчета определяют понижающие коэффициенты в пределах 1 % или 2 % ежегодно.

Выбор одного из двух способов расчета, а также определение конкретных значений ежегодных понижающих коэффициентов стали предметом ожесточенных споров между государствами в ходе 76-й сессии КЗМС ИМО.

Ссылаясь на положения Первоначальной стратегии ИМО, некоторые наиболее амбициозные государства предлагали не ограничиваться 22 %-м снижением, а выступали за гораздо большие показатели снижения углеродной интенсивности международного судоходства в целом (до 75 % к 2030 году от уровня 2019 года) и соответственные значения ежегодных понижающих коэффициентов [10].

По итогам переговоров удалось согласовать и одобрить компромиссный вариант, представленный в табл. 2 [9], включающий три фазы.

Таблица 2

Согласованные на 76-сессии КЗМС ежегодные значения понижающего коэффициента для расчета достигнутого *СИ*

Год	Значение понижающего коэффициента	Фазы применения
2020	1 %	Фаза 1
2021	1 %	
2022	1 %	
2023	2 %	Фаза 2
2024	2 %	
2025	2 %	
2026	2 %	
2027	—	Фаза 3
2028	—	
2029	—	
2030	—	

Таким образом, начиная с фазы 2, т.е. после начала применения требований в 2023 году, ежегодное ужесточение требуемого *СИ* в течение четырех лет составит 2 %, суммарное за период 2020 — 2026 гг. — 11 %.

Определение значений понижающих коэффициентов для фазы 3 станет предметом переговоров в ИМО при пересмотре требований в 2024 — 2025 гг.

Дополнительно предполагается, что в этот период руководства ИМО по углеродной интенсивности, которые на сегодня являются формально рекомендательными, будут переработаны в обязательный одноименный кодекс ИМО (Carbon Intensity Code).

Для целей более точного учета особенностей конструкции судов и их эксплуатации судов в различных условиях и регионах ИМО разрабатывает дополнительное руководство по поправочным коэффициентам и исключениям.

В частности, речь идет о введении в формулу расчета достигнутого *СИ* поправочных коэффициентов для **судов ледового класса**, чьи гидродинамические характеристики делают такие суда изначально менее энергоэффективными. Также предметно обсуждается возможность исключения части пройденного судном расстояния или затраченного топлива для целей расчета достигнутого *СИ*. Такие исключения могут быть сделаны для особых условий, например, при движении судна во льдах, при движении определенное время при силе ветра выше 7 баллов по шкале Бофорта, для операций по охлаждению или нагреву груза, мойке танков, использовании отпарного газа на газовозах, коротких рейсах и пр. Предполагается закончить эту работу до середины 2022 года и представить на 78-й сессии КЗМС.

Как отмечалось выше, камнем преткновения на 76-й сессии КЗМС в ходе разработки и обсуждения будущих требований стали значения ежегодных понижающих коэффициентов. Итоговый компромиссный вариант ряду государств показался недостаточно амбициозным, которые ссылались на то, что достигнутые договоренности находятся и так в пределах естественных значений снижения углеродной интенсивности международного судоходства (*business as usual*).

Вместе с тем необходимо учитывать два важных момента.

Первое — ежегодные понижающие коэффициенты, необходимые для достижения общего снижения углеродной интенсивности международного судоходства на как минимум 40 % к 2030 году от уровня 2008 года, как установлено Первоначальной стратегией ИМО, определяются на основе данных по всему мировому флоту (грузовые и пассажирские суда валовой вместимостью более 5000).

Фактическое снижение углеродной интенсивности международного судоходства в процентах за период 2008 — 2019 гг., а также необходимое дальнейшее снижение до 2030 года происходят за счет четырех способов.

1. Вывод из эксплуатации более старых судов и замена более энергоэффективными.
2. Строительство судов больших размеров и вместимости.
3. Оптимизация режимов эксплуатации существующих судов.
4. Технические средства снижения углеродной интенсивности существующих судов.

Однако несмотря на то, что ежегодные понижающие коэффициенты рассчитаны применительно ко всему мировому флоту, применяться они будут в соответствии с требованиями МАРПОЛ к отдельным судам.

Таким образом, первые два способа снижения углеродной интенсивности для конкретного существующего судна из четырех перечисленных выше не применимы. Это означает, что судну потребуется в гораздо большей степени использовать третий и четвертый способы (эксплуатационная оптимизация и переоборудование).

Для некоторых типов судов, если оценивать весь сегмент мирового флота, строительство более энергоэффективных судов и вывод из эксплуатации старых вносит существенный вклад в общее снижение углеродной интенсивности. Но существующим судам придется достигать целей путем только технических и эксплуатационных улучшений. Это с большой вероятностью потребует существенных вложений в переоборудование и изменений в подходах к эксплуатации, включая возможное снижение эксплуатационной скорости, отказ от определенных маршрутов или районов эксплуатации.

Второе связано с установлением границ рейтингов, назначаемых по результатам анализа значений достигнутого *CII* конкретного судна. Границы рейтингов (см. рис. 4) установлены на основе данных 2019 года, взятых из IMO DCS, 15 % от базовой линии — пределы рейтинга E [11].

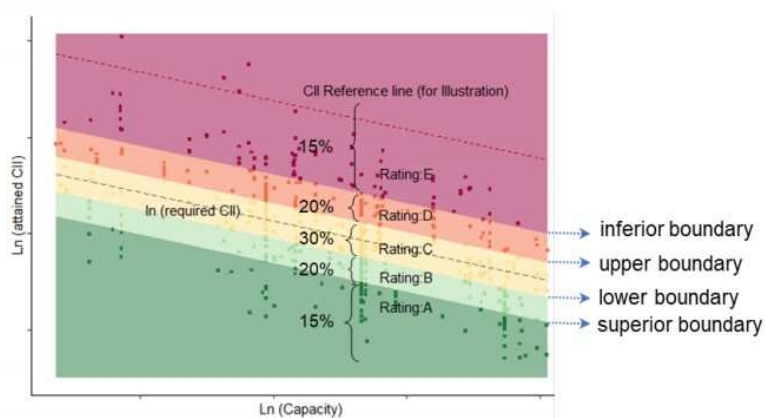


Рис. 4 Границы рейтингов, назначаемых в соответствии с *CII* rating guidelines, G4

Судам, которым назначен рейтинг E по итогам первого года применения требований (2023 год), необходимо будет разработать и выполнить в 2024 году план корректирующих действий, который позволил бы повысить рейтинг за следующий отчетный год. Это значит, что таким судам необходимо будет снизить углеродную интенсивность в течение 2024 года не на 5 % по сравнению с 2019 годом (суммарное значение понижающих коэффициентов за период 2019 — 2023 гг.), а на гораздо большее значение, чтобы выйти за пределы рейтинга E в следующем отчетном году. Насколько это будет практически выполнимо для отдельных судов — на данный момент вопрос остается открытым.

Что касается рекомендованного **алгоритма действий** судовладельца, хотя времени на приведение судна в соответствие с требованиями по *CII* немного больше, чем в случае с *EEXI* (первый отчетный год — 2023, т.е. расчет соответствия должен быть сделан в начале 2024 года), на данный момент вся архитектура требований еще не сформирована.

В частности, еще не готовы руководства по поправочным коэффициентам и исключениям, продолжается работа над рекомендательными документами по Плану управления энергоэффективностью (SEEMP).

В этой связи сложно рекомендовать оптимальный алгоритм действий по приведению судна в соответствие требованиям, тем более что *CII* является эксплуатационным критерием, и специфика эксплуатации судна в течение отчетного года непосредственно влияет на полученные результаты.

Суда, на которые распространяется требование по *CII*, в 2019, 2020 и 2021 году подавали данные в IMO DCS. На основании этих данных можно провести предварительный анализ, рассчитать достигнутый *CII* и рейтинг, оценить перспективы соответствия при применении ежегодных понижающих коэффициентов.

Более детальные рекомендации возможны ближе к середине 2022 года, когда ИМО будут разработаны и одобрены все рекомендательные руководства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянно повышающиеся требования Приложения VI к МАРПОЛ вынуждают судовладельцев применять на судах различные меры по сокращению выбросов, которые можно разделить на четыре типа технических решений.

1. **Уменьшение потребления топлива** за счет рационального использования (оптимизация маршрута) и снижения скорости.

2. **Повышение эффективности пропульсивной установки:** уменьшение удельного расхода топлива двигателями, что на существующих судах практически не осуществимо, за исключением применения устройств, ограничивающих мощность двигателя или мощность на гребном валу, установка эффективных движителей.

3. **Очистка выхлопных газов,** которая хотя и получает в настоящее время все большее распространение, но только для очистки от SO_x , NO_x , «черного углерода». Поглощение CO_2 при пропускании выхлопных газов через скруббер составляет не более нескольких процентов и не учитывается в действующих методиках расчета показателей энергоэффективности.

4. **Использование более экологически чистого топлива,** такого как уже применяющийся на судах сжиженный природный газ (СПГ) или новых, таких как, метанол. Хотя применение СПГ обеспечивает снижение выбросов CO_2 примерно на 20 %, но для существующих судов это связано с существенным дорогостоящим переоборудованием, поэтому примеров переоборудования судов для использования СПГ в качестве топлива крайне мало, особенно на фоне строительства новых судов, где применение СПГ находит все более широкое применение.

Таким образом, для существующих судов остается реально эффективным и осуществимым на практике только первые два пути повышения энергоэффективности: уменьшение потребления топлива путем оптимизации скорости судна, улучшение логистики и организации перевозок и повышение эффективности пропульсивной установки.

По мнению авторов, существенным изъяном принятых новых критериев энергоэффективности является их привязка к транспортной работе. Выбор транспортной работы в качестве критерия полезности для любого судна имеет свои недостатки: в этом случае не учитываются судовые операции (в том числе весьма энергозатратные) в ходе которых судном не совершается транспортная работа. Например, не учитывается энергопотребление при разгрузке танкера или работа генератора инертного газа при проведении грузовых операций, работа грузовых кранов при разгрузке, обработка балласта. Кроме того, никак не учитывается переход в балласте, когда транспортным судном не производится транспортная работа.

На первый взгляд может показаться, что в этом нет ничего плохого, так как если основным назначением судна является перевозка груза (то есть совершение транспортной работы), то эти неучтенные затраты энергии можно считать неизбежными и поэтому не учитывать.

Но если какие-то затраты в каком-либо неизбежном производственном процессе не учитываются в показателе энергоэффективности, то исчезает стимул экономии энергии в этом процессе. Задача стимулирования внедрения новых энергосберегающих технологий будет ограничена только энергозатратами, связанными с производством транспортной работы.

Одно и то же судно будет иметь существенно различные показатели $СИ$ в зависимости от того на каком «плече» оно работает, то есть как часто происходит операция разгрузки/погрузки. Выбросы CO_2 при проведении этих операций учитываются, а транспортной работы судно не совершает, то есть они считаются бесполезными. Кроме того, принятый коэффициент $СИ$ дает преимущества для рейсов, совершаемых в балласте, то есть бесполезных по факту, но во время которых энергопотребление существенно меньше по причине уменьшения сопротивления корпуса.

Все эти парадоксальные недостатки новых критериев не принижают их значения для отрасли и со временем могут быть исправлены или уточнены на основе опыта применения.

Насколько успешно в целом судоходная отрасль справится с этими новыми радикальными экологическими вызовами — предстоит узнать уже в самом ближайшем будущем. Но совершенно очевидно, что новые требования по $ЕЕХ$ и $СИ$, вводимые в крайне сжатые сроки, имеют беспрецедентный характер и существенно поменяют облик международного судоходства.

REFERENCES

1. MEPC 59/Inf.10 — Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization (IMO), London, UK, April 2009.
2. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020.
3. MEPC.304(72) — Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships.
4. MEPC 308(73) — 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships.
5. MEPC.328(76) — Amendments to MARPOL Annex VI (2021 Revised MARPOL Annex VI).
6. MEPC 334(76) — 2021 Guidelines on survey and certification of the energy efficiency existing ship index (EEXI).
7. MEPC.336(76) — 2021 Guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII Guidelines, G1).
8. MEPC.337(76) — 2021 Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators (CII reference lines Guidelines, G2).
9. MEPC.338 (76) — 2021 Guidelines on the operational carbon intensity reduction factors relative to reference lines (CII reduction factors guidelines, G3).
10. MEPC 76/15 — Report of the Marine Environment Protection Committee on its Seventy Sixth Session.
11. MEPC.339 (76) — 2021 Guidelines on the operational carbon intensity rating of ships (CII rating guidelines, G4).

ОБОЗРЕНИЕ: ИТОГИ 77-Й СЕССИИ КОМИТЕТА ИМО ПО ЗАЩИТЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ

77-я сессия Комитета по защите морской среды ИМО (КЗМС) прошла в дистанционном формате с 22 по 26 ноября 2021 года. Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) принял активное участие в мероприятии в составе российской делегации.

Встрече предшествовала 26-я конференция ООН по изменению климата, в связи с чем климатический аспект был ключевым в повестке 77-й сессии КЗМС.

В ходе заседания Комитет всесторонне обсудил предложения государств и международных организаций к Стратегии ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов, на основании которой ИМО разрабатывает практические меры по сокращению выбросов, включая поправки к Конвенции МАРПОЛ.

КЗМС на свой 77-й сессии подтвердил готовность ИМО начать пересмотр стратегии и завершить эту работу не позднее 2023 года. Конкретные параметры будущей пересмотренной стратегии, включая масштаб задач и перечень возможных мер регулирования, предстоит детально обсудить и согласовать в 2022 году.

КЗМС на 77-й сессии не согласовал проект резолюции, представленной группой островных государств, о намерении достичь полного сокращения парниковых газов (zero emissions) уже к 2050 году. На данном этапе такое намерение признано преждевременным.

Кроме того, КЗМС принял Стратегию по борьбе с морским пластиковым мусором с судов, которая направлена на сокращение морского пластикового мусора, образующегося и извлекаемого рыболовными судами, а также на уменьшение доли судоходства в образовании морского пластикового мусора и на повышение эффективности портовых приемных сооружений и технических средств и обработки в целях сокращения морского пластикового мусора.

После долгого обсуждения, несмотря на обоснованные возражения РФ, Китая, Индии и Саудовской Аравии, КЗМС на 77-й сессии также принял Резолюцию, которая призывает государства приступить на добровольной основе к устранению угрозы для Арктики, связанной с выбросами черного углерода, и сообщить о мерах и передовых методах сокращения выбросов черного углерода от судоходства.

Следующая сессия Комитета ИМО по защите морской среды состоится 6 — 10 июня 2022 года.

УДК 3.07

СИСТЕМА ПРОВЕРКИ ГОСУДАРСТВ — ЧЛЕНОВ ИМО: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРЕХОД К ДИСТАНЦИОННОМУ ФОРМАТУ

О.А. Чернов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: chernov.oa@rs-class.org

Международная Морская Организация (ИМО) на протяжении последних 30 лет выработала и продолжает совершенствовать комплекс специальных мероприятий, направленных на оказание всем 174 государствам — членам содействия в осуществлении инструментов ИМО. На сегодняшний день он закреплён в рамках Системы проверки государств — членов ИМО (IMSAS). Система проверки государств — членов ИМО является важным инструментом, который, с одной стороны, содействует на глобальном уровне повышению безопасности на море и защиты морской среды, с другой — направлен на оказание помощи государствам — членам ИМО в осуществлении ими своих функций государства флага, государства порта и прибрежного государства. В статье подвергнута анализу история развития нормативно-правовой базы, описывающей Систему, осуществлено ретроспективное сопоставление двух важных документов Системы: Кодекса по осуществлению документов ИМО (Кодекс ОДИ) и Вопросника, заполняемого до проверки. Рассмотрены некоторые процедурные аспекты Системы, относящиеся к планированию общего расписания и проведения конкретных проверок. Исследованы опубликованные ИМО результаты состоявшихся проверок. Проанализированы наиболее актуальные изменения, внесенные в Систему в 2021 году, касающиеся начала применения дистанционного формата проведения проверок. Сделаны выводы о целесообразности в будущем разработки типовых мероприятий для эффективной самоподготовки государств к проверкам, которые в том числе будут способствовать дальнейшему совершенствованию Системы проверки государств — членов ИМО.

Ключевые слова: система проверки государств — членов ИМО, Международная морская организация, безопасность мореплавания, защита морской среды, осуществление инструментов ИМО, кодекс ОДИ, дистанционная проверка

IMO MEMBER STATE AUDIT SCHEME. CURRENT STATE AND TRANSITION TO REMOTE MODE

O.A. Chernov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: chernov.oa@rs-class.org

Over the past 30 years, the International Maritime Organisation (IMO) has developed and continues to improve a set of special measures aimed at assisting all 174 Member States in implementing IMO instruments. To date, it is codified in the framework of the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS). The IMO Member State Audit Scheme is an important tool that, on the one hand, contributes to improving maritime safety and marine environment protection at the global level, on the other hand, it is aimed at assisting IMO Member States in carrying out their functions as a flag State, port State and coastal State. The article analyses the history of the development of the regulatory framework describing the Scheme, carries out a retrospective comparison of two important documents of the System — IMO Instruments Implementation Code (III Code) and the Pre-Audit Questionnaire. Some procedural aspects of the Scheme related to planning of general schedule of audits and conduct of specific audits have been considered. Results of audits published by IMO have also been investigated. The most relevant changes made to the Scheme in 2021, concerning the beginning of use of remote audit format, have been analyzed. Conclusions have been drawn about the expediency of developing standard measures for effective self-preparation of States for audits, which, among other things, will contribute to further improvement of the IMO Member State Audit Scheme.

Keywords: IMO Member State Audit Scheme, International Maritime Organisation, maritime safety, marine environment protection, IMO instruments implementation, III Code, remote audit

ВВЕДЕНИЕ

Созданная в середине XX века Международная Морская Организация (ИМО) за время своего существования способствовала принятию десятков конвенций и протоколов и сотен кодексов и рекомендаций. Все они касаются безопасности и охраны на море, предотвращения загрязнения и связанных с этими областями вопросов.

Столь активная нормотворческая работа ИМО стала следствием ряда серьезных происшествий на море, имевших место в контексте бурного развития мореплавания как основного вида перемещения грузов на глобальном уровне. Вследствие произошедших в последние десятилетия XX и в начале XXI века крупномасштабных морских аварий стало очевидным, что для международных организаций, таких как ИМО, крайне важно, чтобы каждое государство — член надлежащим образом применяло и обеспечивало соблюдение конвенций, участником которых оно является.

Для достижения этой цели, а также для оказания всем 174 государствам — членам помощи в осуществлении своих инструментов ИМО на протяжении последних 30 лет выработала и продолжает совершенствовать комплекс специальных мероприятий, который на сегодняшний день закреплён в рамках Системы проверки государств — членов ИМО.

С 2006 по 2015 гг. такие проверки проводились на добровольной основе, а с 2016 года им был придан обязательный статус. **Каждое государство — член ИМО подлежит проверке 1 раз в 7 лет.**

В ходе проверки ИМО проверяется соответствие государства Кодексу по осуществлению документов ИМО (Кодекс ОДИ, III Code), являющимся обязательным для членов Организации. Целью проверки является, с одной стороны, оценка степени соответствия проверяемого государства применимым требованиям, с другой стороны — оказание ему содействия в осуществлении и обеспечении соблюдения инструментов ИМО.

Проверка охватывает широчайший спектр вопросов. Они могут касаться:

- политики в области безопасности мореплавания и защиты морской среды от загрязнения с судов;
- морского законодательства;
- процедур присоединения к инструментам ИМО;
- выполнения функций государства флага, государства порта, прибрежного государства;
- подготовки кадров и др.

Для государства проверка является мероприятием повышенной важности и как правило затрагивает сразу несколько федеральных министерств (в сфере транспорта, природы, обороны) и организаций, выполняющих в системе государства различные функции в области навигации, гидрографии, спасания и др.

В данной статье исследована и обобщена история возникновения и развития Системы проверки государств — членов ИМО, проанализированы процедурные аспекты, отмечены изменения, принятые ИМО в 2021 году в связи с пандемией COVID-19.

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПРОВЕРКИ ГОСУДАРСТВ — ЧЛЕНОВ ИМО

Создание механизмов по содействию государствам — членам в осуществлении документов ИМО связано с принятием Ассамблеей ИМО в 1993 году Резолюции А.740(18) [1] «Временное руководство по оказанию помощи государствам флага». В ней среди прочего отмечалось, что ИМО подтверждает «свое стремление к обеспечению того, чтобы суда всегда соответствовали стандартам безопасности на море и предотвращения загрязнения, предписанным соответствующими конвенциями ИМО» и при этом осознаёт «трудности, с которыми сталкиваются некоторые государства в полном приведении в действие положений документов ИМО».

Руководство состояло лишь из нескольких базовых требований, которые должны выполнять государства. Например, из Руководства следовало, что помимо принятия национального законодательства государства должны определять цели на основании международных документов в сочетании с применимым национальным законодательством и проводить политику посредством издания национальных законов по достижению данных целей.

Также государствам следовало стремиться к образованию инфраструктуры, способной обеспечивать безопасность и защиту морской среды и состоящей из необходимого персонала, административных инструкций, других ресурсов для обеспечения выполнения основных требований Конвенций СОЛАС, МАРПОЛ и др. Кроме того, ряд требований касался взаимодействия государств с признанными организациями в рамках соответствующего соглашения.

В 1997 году резолюцией А.847(20) [2] Ассамблея ИМО приняла пересмотренное Руководство по оказанию помощи государствам флага в осуществлении документов ИМО. В нём излагались несколько более детализированные требования к государствам — членам ИМО.

Руководство приняло форму Кодекса в 2005 году, когда ИМО впервые опубликовала Кодекс по осуществлению документов ИМО, имеющих обязательную силу (Кодекс ОДИ, III Code), посредством принятия резолюции А.973(24) [3].

Тогда же ИМО впервые издала документ «Рамки и процедуры добровольной системы проверки государств — членов ИМО» (Рамки и процедуры проверки, резолюция А.974(24) [4]). Правительства призывались в добровольном порядке соглашаться на проведение проверок, тем самым содействуя усилиям ИМО, направленным на обеспечение последовательного и эффективного осуществления ее документов.

Таким образом, 2005 год может считаться годом начала существования двух основных нормативных документов, связанных с Системой проверки ИМО: **Кодекса ОДИ** и **Рамок и процедур проверки**.

Кодекс ОДИ впоследствии переиздавался в 2007, 2009 и 2011 годах. В 2013 году резолюцией ИМО А.1070(28) [7] была принята версия Кодекса, действующая на сегодняшний день. Кодексу был придан обязательный статус посредством включения соответствующих ссылок в основные Конвенции ИМО (СОЛАС, МАРПОЛ и пр.), и таким образом государства — члены ИМО, принявшие данные конвенции, обязаны соблюдать и положения Кодекса ОДИ. Кодекс вступил в силу 1 января 2016 года, и с этого момента все государства — члены подлежат обязательной проверке ИМО.

В 2013 году также были переизданы и Рамки и процедуры проведения проверки (резолюция А.1067(28) [6]). Кроме того, из Кодекса в отдельный документ был выделен «Неисчерпывающий перечень обязательств в соответствии с документами, которые относятся к Кодексу по осуществлению документов ИМО», актуализированная версия которого принимается с тех пор на каждом заседании Ассамблеи ИМО раз в 2 года.

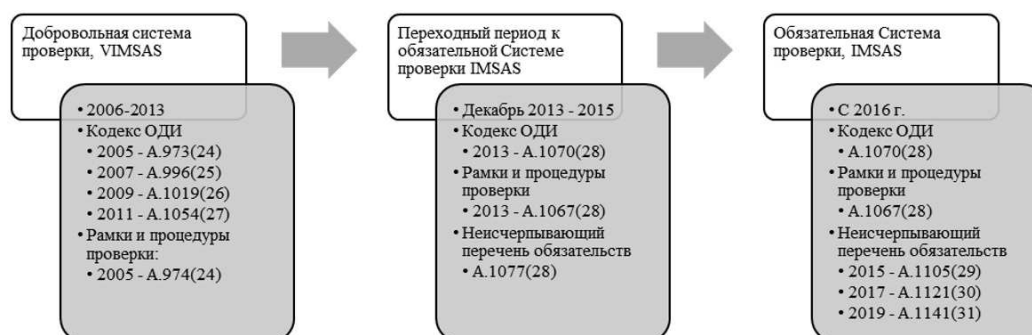


Рис. 1 Обобщенная история развития комплекса документов, связанных с Системой проверки ИМО

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ПРОВЕРКИ ИМО

Документом, описывающим все процедурные аспекты Системы проверки государств — членов ИМО, являются «Рамочные принципы и процедуры Системы», существовавшие в двух редакциях. В рамках добровольной Системы действовала резолюция А.974(24), которая была принята Ассамблеей ИМО в 2005 году. Действующая на сегодняшний день версия принята резолюцией ИМО А.1067(28) 4 декабря 2013 года и стала применяться с 2016 года одновременно со вступлением в силу Кодекса ОДИ и переходом Системы проверок к обязательному формату.

Следующие ключевые положения резолюции А.1067(28) заслуживают внимания:

«[Ассамблея признает], что со времени начала проверок в 2006 году ряд государств — членов в добровольном порядке согласились на проведение проверок и что отчеты об этих проверках, а также ответная информация, полученная от этих государств, подтверждают, что Система проверки представляет собой полезное начинание в деле усиления эффективного осуществления положений соответствующих документов ИМО, имеющих обязательную силу, участниками этих документов...»;

«[существует] необходимость оказания помощи правительствам — членам для расширения их возможностей и улучшения общей деятельности с тем, чтобы соблюдать исполнение документов ИМО [...]»;

«[Ассамблея желает] обеспечить, чтобы все государства — члены обладали общей платформой и методологией для оценки и расширения своих возможностей, а также для улучшения их общей деятельности при соблюдении положений документов ИМО [...]».

Также стоит отметить резолютивную часть документа («[Ассамблея] настоятельно призывает правительства в полной мере сотрудничать со всеми сторонами, участвующими в проведении проверок...»). В действовавшей ранее версии она была сформулирована следующим образом: «[Ассамблея] настоятельно призывает правительства в добровольном порядке соглашаться на проведение проверок...».

В Приложении к резолюции содержатся Рамочные принципы проверки, которые «описывают задачи, принципы, сферы, ответственности и аспект наращивания потенциала проверки, которые вместе составляют стратегию системы проверки». Здесь же обозначена задача проверки как **определение степени, в которой государства — члены осуществляют и обеспечивают выполнение применимых документов ИМО**.

Для выполнения этой задачи при проверках оцениваются следующие аспекты:

- соответствие стандарту проверки (т.е. Кодексу ОДИ);
- принятие государством — членом законодательства, касающегося применимых документов ИМО, участником которых оно является,
- обеспечение выполнения применимых законодательных актов государства,
- установленные механизм и меры контроля для передачи полномочий признанным организациям,
- механизм контроля и обратной связи, установленный государством в отношении его собственного процесса освидетельствования и выдачи свидетельств.

Приложение к резолюции А.1067(28) также содержит детальное описание Процедур проверки, включая следующие основные этапы (см. рис. 2):



Рис. 2 Основные элементы Системы проверки ИМО

СТАНДАРТ ПРОВЕРКИ: КОДЕКС ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ДОКУМЕНТОВ ИМО

Стандартом проверки, то есть тем основным документом, соответствие которому проверяется в рамках проверок ИМО, является Кодекс по осуществлению документов ИМО (Кодекс ОДИ). Его действующая версия была принята резолюцией А.1070(28) и с 2016 года имеет обязательный для всех государств — членов ИМО статус. На рис. 3 приведены основные элементы Кодекса ОДИ.

Поскольку в Кодекс ОДИ внесены важные изменения, актуальной задачей является сравнительный анализ действующей редакции Кодекса ОДИ и версии 2007 года (резолюция А.996(25) [5]).



Рис. 3 Основные элементы Кодекса ОДИ

Часть положений существенно изменилась по содержанию, например:

- п. 12 о поощрении государством культуры, обеспечивающей возможности повышения качества деятельности;

- п. 16 в отношении ресурсов и процессов, позволяющих управлять программой безопасности и защиты окружающей среды;

- п. 62 о независимости инспекторов государства порта.

Ряд положений впервые внесены в Кодекс, например:

- п. 7 о составных частях стратегии и законодательства государства;

- пп. 47 и 48, описывающие определенные обязательства прибрежного государства;

- пп. 54, 55 и 56, касающиеся некоторых обязанностей государства порта.

Отдельные положения Кодекса поменяли характер, причем как с рекомендательного на обязательный, так и наоборот, например:

- п. 3 об общей стратегии государства;

- п. 23 о разработке и осуществлении программы контроля;

- п. 36 о документированной системе квалификации персонала;

- пп. 39 и 40 о расследованиях несчастных случаев.

Наконец, увеличился с 58 до 63 пунктов общий объем Кодекса. Главным же произошедшим изменением стало вступление Кодекса в **обязательную силу** для всех государств — членов ИМО.

ОБЩЕЕ РАСПИСАНИЕ ПРОВЕРОК

Начиная с 2016 года, ИМО ведет расписание обязательных проверок всех 174 государств — членов. Таким образом, ежегодно к проверкам планируется 25 государств.

В 2020 году в связи с неблагоприятной эпидемической обстановкой проведение проверок было приостановлено. Это заставило ИМО [8] ко II половине 2021 года выработать ряд временных мер по применению дистанционного формата проверок. При этом не исключается и очный формат, в зависимости от конкретной ситуации в проверяемом государстве. Более того, дистанционная проверка не является обязательной, то есть государство имеет право отложить свою проверку до тех пор, пока не будет возможно ее очное проведение.

На момент подготовки данной статьи ожидалось, что проверки частично возобновятся в 2021 году (см. табл. 1). В этой связи весьма вероятным становится перенос проверок, ранее планировавшихся в 2022 году, на 2023 год.

Таблица 1

Действующее расписание проверок ИМО на 2021 и 2022 гг. [11]

Государство	Период проверки	Комментарии
2021 год		
Маврикий Мальдивские острова; Бенин; Камерун; Пакистан	Февраль Март	Проверка состоялась в 2021 г. Проверки отложены, могут состояться в 2021 году в дистанционном формате или в 2022 году
Саудовская Аравия; Доминиканская Республика; Намибия	Апрель	- // -
КНДР	Май	- // -
Малави; Швеция; Канада	Июнь	- // -
Республика Корея	Июль	- // -
Испания; Маршалловы острова	Август	- // -
Дания; Соединенное Королевство; Япония	Сентябрь	- // -
Республика Молдова; Кипр; Новая Зеландия	Октябрь	- // -
Либерия; Чили	Ноябрь	- // -
Эфиопия; Греция	Декабрь	- // -
2022 год		
Нидерланды; Италия; Таиланд; Норвегия Южная Африка; Соединенные Штаты Уругвай; Австралия; Люксембург Сингапур; Болгария Панама; Румыния; Малайзия; Аргентина Бразилия; Российская Федерация Франция; Эквадор Германия; Филиппины; Китай; Польша Гонконг, Китай; Ирландия	Февраль Март Апрель Май Июнь Июль Сентябрь Октябрь Ноябрь	Проверки, ранее запланированные на 2022 год, вероятно, будут частично проведены в 2022 году (в том числе, в дистанционном формате) или отложены на 2023 год

Введение дистанционного формата проверок повлияет и на продолжительность каждой отдельно взятой проверки. Такой вывод можно сделать из пересмотренного ИМО в 2021 году типового плана проведения проверки. Типовой план специально был разработан ИМО в виде вспомогательного Руководства для проверяющего ИМО [10]. В связи с началом применения дистанционного формата проверок образец плана был существенно доработан и расширен. Общая продолжительность проверки при этом возрастает практически вдвое: с 6 до 11 дней.

ВОПРОСНИК, ЗАПОЛНЯЕМЫЙ ДО ПРОВЕРКИ, И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРОК

Группа проверяющих должна заранее ознакомиться с особенностями законодательства и другими соответствующими аспектами государства-члена, которое она будет проверять. Для облегчения этой задачи предусмотрен специальный инструмент – Вопросник, заполняемый до проверки (ВЗП, pre-audit questionnaire, PAQ). Вопросник представляет собой обширный перечень вопросов, ответы на которые государство — член должно представить в ИМО вместе с подтверждающими документами.

Объем ВЗП и перечень входящих в него вопросов изменялись с течением времени и с развитием Системы от добровольной (резолюция А.974(24)) к обязательной (А.1067(28)), а также с внедрением дистанционного формата проверок [9].

Объем вопросника существенно вырос к настоящему времени: к 58 вопросам, включенным в резолюцию А.1067(28), добавлен еще 71 вопрос. Анализ всех трех версий ВЗП (2005 и 2016 гг. и версии, принятой в 2021 году для дистанционных проверок) показывает повышение детализации информации, которую государство должно представить до проверки. Это обусловлено необходимостью более глубокого изучения ИМО специфики государства заблаговременно до проверки.

Целесообразно выполнить подробное сопоставление ВЗП действующей и предыдущей версий, что будет способствовать облегчению его заполнения, особенно если в прошлом вопросник уже заполнялся государством.

Результаты проверок ИМО, тексты замечаний, их причин и корректирующих действий, а также положительные аспекты и лучшие практики, выявленные проверяющими, в обезличенной форме **доступны**

широкой общественности. Это предоставляет государствам хорошую информационную базу для осуществления самоподготовки к проверкам.

ИМО опубликованы 4 таких Сводных кратких отчета о проверках [12, 13, 14, 15], в которых содержится информация о 1178 замечаниях, выявленных в проведенных с 2016 по 2019 гг. 68 проверках ИМО.

Задача по систематизации этих замечаний по соответствующим статьям Кодекса ОДИ также представляется актуальной благодаря возможности увидеть наиболее типовые проблемы, с которыми сталкиваются государства, что также может быть ценно при подготовке к проверке. На рис. 4 приведено распределение количества замечаний по основным инструментам ИМО.

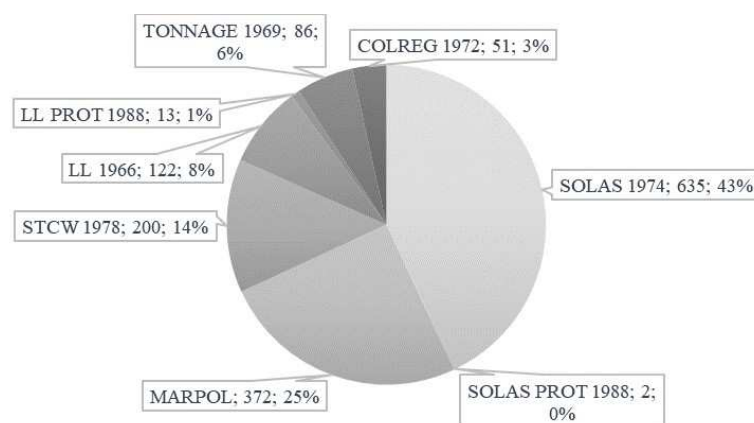


Рис. 4 Количество замечаний при проверках ИМО по основным инструментам ИМО

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международной Морской Организацией и ее Генеральным секретарем уделяется повышенное внимание проблематике осуществления и обеспечения соблюдения инструментов ИМО государствами — членами.

Система проверки государств — членов ИМО является важным инструментом, который, с одной стороны, содействует на глобальном уровне повышению безопасности на море и защиты морской среды, с другой — направлен на оказание помощи государствам — членам ИМО в осуществлении ими своих функций государства флага, государства порта и прибрежного государства.

В статье подвергнута анализу история развития нормативно-правовой базы, описывающей Систему, осуществлено ретроспективное сопоставление двух важных документов Системы — Кодекса ОДИ и Вопросника, заполняемого до проверки. Рассмотрены некоторые процедурные аспекты Системы, относящиеся к планированию общего расписания и проведения конкретных проверок. Исследованы опубликованные ИМО результаты состоявшихся проверок. Проанализированы наиболее актуальные изменения, внесенные в Систему в 2021 году, касающиеся начала применения дистанционного формата проведения проверок.

В будущем могут быть разработаны типовые мероприятия для эффективной самоподготовки государств к проверкам, которые в том числе будут способствовать дальнейшему совершенствованию Системы проверки государств — членов ИМО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резолюция Ассамблеи ИМО А.740(18). Временное руководство по оказанию помощи государствам флага.
2. Резолюция Ассамблеи ИМО А.847(20). Руководство по оказанию помощи государствам флага в осуществлении документов ИМО.
3. Резолюция Ассамблеи ИМО А.973(24). Кодекс по осуществлению документов ИМО, имеющих обязательную силу.
4. Резолюция Ассамблеи ИМО А.974(24). Рамки и процедуры добровольной системы проверки государств — членов ИМО.
5. Резолюция Ассамблеи ИМО А.996(25). Кодекс по осуществлению документов ИМО, имеющих обязательную силу, 2007 года.
6. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1067(28). Рамочные принципы и процедуры Системы проверки государств — членов ИМО.
7. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1070(28). Кодекс по осуществлению документов ИМО.
8. Итоги 125-го заседания Совета ИМО. 28 июня — 2 июля 2021 (дистанционная сессия). Международная Морская Организация.
9. Рассмотрение Советом ИМО механизма дистанционной проверки. Рабочий документ С 125/6/1. 19.04.2021.
10. Циркулярное письмо ИМО 3547 «Руководство проверяющего ИМО». 08.05.2015.
11. Расписание проверок ИМО Сайт: (<https://gis.imo.org/Public/Shared/Public/Download.aspx?FileType=UnsecuredFile&FileID=35933>).
12. Циркулярное письмо ИМО 3772. 4 сентября 2017. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).
13. Циркулярное письмо ИМО 3879. 10 октября 2018. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).
14. Циркулярное письмо ИМО 4028. 13 сентября 2019. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).

REFERENCES

1. IMO Assembly Resolution A.740(18). Interim Guidelines to Assist Flag States.
2. IMO Assembly Resolution A.847(20). Guidelines to Assist Flag States in the Implementation of IMO Instruments.
3. IMO Assembly Resolution A.973(24). Code for the Implementation of Mandatory IMO Instruments.
4. IMO Assembly Resolution A.974(24). Framework and Procedures for the Voluntary IMO Member State Audit Scheme.
5. IMO Assembly Resolution A.996(25). Code for the Implementation of Mandatory IMO Instruments, 2007.
6. IMO Assembly Resolution A.1067(28). Framework and procedures for the IMO Member State Audit Scheme.
7. IMO Assembly Resolution A.1070(28). IMO Instruments Implementation Code (III Code).
8. Council, 125th Session (C 125), 28 June — 2 July (remote session). Meeting Summary. International Maritime Organisation.
9. IMO Council. Consideration of a Remote Audit Mechanism. Meeting Document C 125/6/1. 19.04.2021.
10. IMO Circular Letter 3547 "Auditor's Manual for the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS)". 08.05.2015.
11. IMO Audits Schedule. Website: (<https://gis.imo.org/Public/Shared/Public/Download.aspx?FileType=UnsecuredFile&FileID=35933>).
12. IMO Circular Letter No. 3772. 4 September 2017. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
13. IMO Circular Letter No. 3879. 10 October 2018. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
14. IMO Circular Letter No. 4028. 13 September 2019. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
15. IMO Circular Letter No. 4317. 15 September 2020. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 656.6; 629.5.083.7

ОЦЕНКА ХОДКОСТИ СУДНА НА ОТКРЫТОЙ ВОДЕ ПОСЛЕ ДЕМОНТАЖА НОСОВОГО БУЛЬБА

А.А. Петров, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

А.А. Рябова, АО «ЦИФРА», Санкт-Петербург, e-mail: alexandra.ryabova@multiphysics.ru

Ф.С. Рябов, АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», Санкт-Петербург, e-mail: philipp.ryabov@cadfem-cis.ru

В последнее время среди судовладельцев, эксплуатирующих суда ледовых классов Arc4 — Arc5 или IA — IA Super на Северном морском пути, стали востребованными проекты по демонтажу носового бульба, целью которых является обеспечение возможности ледокольной проводки «на усах» и, как следствие, круглогодичной эксплуатации в Арктике. Поскольку основное назначение бульба — снижение волнового сопротивления на открытой воде, после подобной модернизации (при сохранении пропульсивного комплекса и размеров судна) неизбежно ухудшение ходкости и, как следствие, увеличение затрат на топливо. С помощью CFD-анализа можно достаточно быстро и с высокой точностью оценить изменение сопротивления движению судна, а при наличии достоверных данных о расходе топлива до модернизации — спрогнозировать увеличение топливных расходов. В статье приведен пример реализованного проекта по демонтажу бульба и соответствующий CFD-анализ изменения сопротивления движению судна. Предложенный подход может быть использован для практических оценок ходкости судна на этапе разработки проекта модернизации с целью долгосрочного планирования экономической деятельности судоходной компании.

Ключевые слова: бульб, демонтаж бульба, модернизация судна, буксировка «на усах», ходкость, CFD-анализ, сопротивление движению судна

ASSESSMENT OF THE PROPULSION QUALITIES OF A SHIP IN THE OPEN WATER AFTER DISMANTLING THE BULBOUS BOW

A.A. Petrov, PhD, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

A.A. Ryabova, JSC CIFRA, St. Petersburg, e-mail: alexandra.ryabova@multiphysics.ru

Ph.S. Ryabov, JSC CADFEM CIS, St. Petersburg, e-mail: philipp.ryabov@cadfem-cis.ru

Recently, among shipowners operating Arc4 — Arc5 or IA — IA Super ice-class ships on the Northern Sea Route, projects for dismantling the bow bulb have seen increase in demand. The purpose of such projects is to ensure the possibility of icebreaker close towing and, as a result, year-round operation in the Arctic. Since the main function of the bulb is to reduce the wave resistance in open water, after such a modernization (while maintaining the propulsion system and ship dimensions), a deterioration in the speed and, as a consequence, an increase in fuel costs is inevitable. With the help of CFD-analysis, it is possible to estimate the change in resistance to the movement of the ship rather quickly and with high accuracy, and if there are reliable data on fuel consumption before modernization, it is possible to predict an increase in fuel consumption. The article provides an example of a completed project for dismantling the bulb and the corresponding CFD-analysis of the resistance to the movement of the ship. The proposed approach can be used for practical assessment of the ship's propulsion qualities at the stage of developing a modernization project for the purpose of long-term planning of the economic activity of a shipping company.

Keywords: bulb, bulb dismantling, ship modernization, close towing, propulsion qualities, CFD analysis, resistance to the movement of the ship

ВВЕДЕНИЕ

Важным условием развития российской Арктики является надежная транспортировка грузов. Порт Сабетта — крупнейший порт из всех действующих на Северном морском пути, доступность которого должна быть обеспечена круглогодично. Порт расположен в северной части Обской губы, где суровые погодные условия вносят коррективы в интенсивность судоходства.

Несмотря на строительство и постепенный ввод в эксплуатацию новых судов высоких арктических классов, способных самостоятельно двигаться во льдах толщиной более 1 м, в ближнесрочной перспективе ощутимая часть привлекаемых к работе в этом регионе грузовых судов будет иметь ледовые классы не выше **Arc5** или **IA Super** по финско-шведской классификации. В зимне-весенний период при тяжелых ледовых условиях в акватории Обской губы таким судам разрешен проход только в случае их проводки ледоколом методом буксировки вплотную — «на усах».

Однако многие суда, изначально не предназначенные для такой работы, имеют бульбообразную форму носовой оконечности, что делает проводку ледоколом вплотную труднореализуемой или вовсе невозможной. В связи с этим перед судовладельцами встает вопрос о целесообразности демонтажа носового бульба и экономических последствиях такой модернизации, ведь известно, что при различных соотношениях числа Фруда и характеристик бульба, наличие последнего позволяет уменьшить волновое сопротивление при движении на открытой воде на 5 — 15 % [1, с. 146 — 147]. То есть после демонтажа бульба, при сохранении пропульсивного комплекса и размерений судна, стоит ожидать соответствующего увеличения сопротивления движению и, как следствие, повышения расходов на топливо.

Для долгосрочного планирования экономической деятельности судоходной компании использование грубых оценок может привести как к завышению, так и к занижению издержек, вызванных изменением ходкости судна. Поэтому целесообразно еще на этапе разработки проекта модернизации носовой оконечности уделить этому вопросу особое внимание.

Для оперативного решения такой задачи предлагается использовать методы вычислительной гидродинамики (также CFD от англ. computational fluid dynamics), позволяющие без существенных затрат на проведение натурных испытаний с высокой точностью определить полное сопротивление движению судна. Методы CFD широко используются для решения задач оптимизации формы корпуса при проектировании судов, например, [2 — 5], однако в настоящей работе показана эффективность и практичность CFD применительно к модернизации эксплуатирующегося судна при решении актуальной задачи по демонтажу носового бульба.

1. ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ (ДЕМОНТАЖ БУЛЬБА)

В 2020 году в АО «ЦНИИМФ» по заказу ООО «Севнор Менеджмент» был выполнен проект модернизации носовой оконечности т/х «Ямал Беркут» (бывш. "BBC Rhine", IMO 9368338), включавший разработку новой формы носовой оконечности и усиление корпуса для получения ледового класса **Arc4** (судно имело с постройки ледовый класс **IA** по финско-шведской классификации). При определении новой формы носовой оконечности учитывались следующие факторы:

- формы кормовых кринолинов атомных ледоколов ФГУП «Атомфлот» (для обеспечения безопасной проводки «на усах»);
- требования 3.10 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов [6];
- необходимость сохранить расположение подруливающего устройства и якорных ниш (см. рис. 1).

Исходная и новая формы носовой оконечности представлены на рис. 1 — 2, основные размерения судна приведены в табл. 1. Исходные чертежи и информация о судне публикуются с согласия судовладельца — ООО «Севнор Менеджмент».

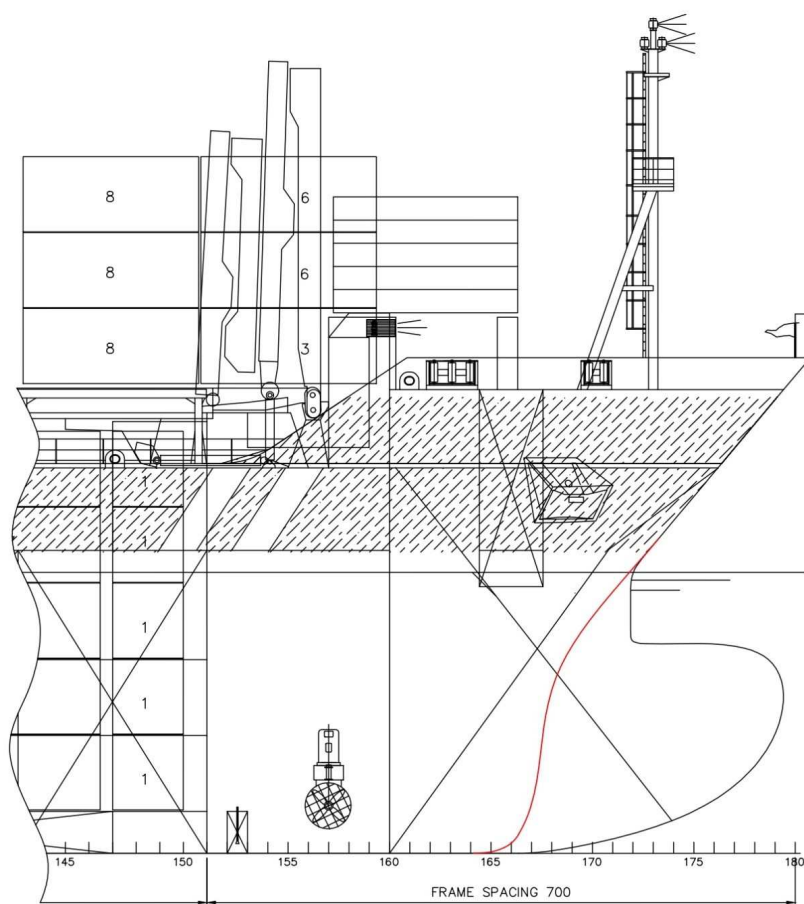


Рис. 1 Фрагмент схемы общего расположения (красный цвет — новая линия форштевня)

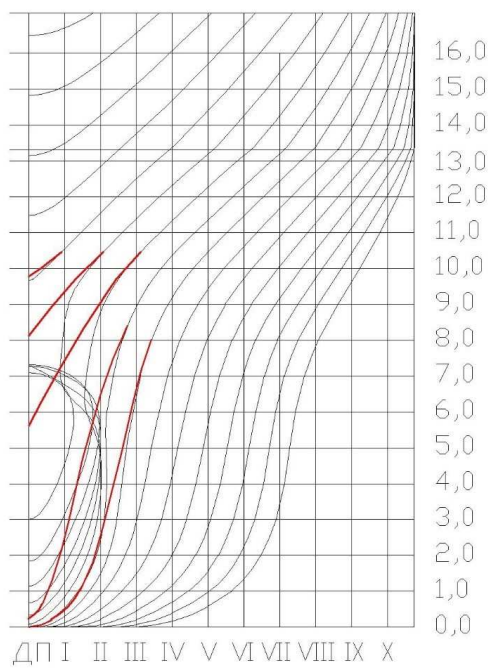


Рис. 2 Практические шпангоуты в носовой оконечности (красный цвет — новая форма шпангоутов)

Таблица 1

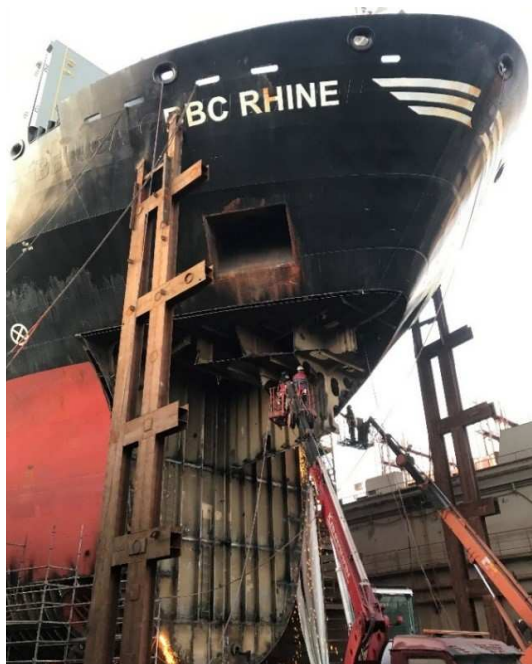
Основные размерения судна

Длина между перпендикулярами L_{pp} , м	132,00
Ширина B , м	21,50
Высота борта H , м	13,30
Осадка по ЛГВЛ d , м	9,69
Водоизмещение исходное, Δ_0 , т (при $d=9,69$ м)	22882
Водоизмещение новое, Δ , т (при $d=9,69$ м)	22721

В результате модернизации изменение коэффициента общей полноты составило $\Delta C_b = -0,002$, изменение веса судна порожнем $\Delta P = -19$ т. На рис. 3 показаны этапы реализации проекта на судоремонтном предприятии (фотографии предоставлены ООО «Севмор Менеджмент»).



а)



б)



в)

Рис. 3 Реализация проекта:

а) — постановка судна в док; б) — демонтаж бульба; в) — результат модернизации

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ СУДНА

Ходкость судна — способность перемещаться с заданной скоростью при наиболее эффективном использовании мощности силовой установки — характеризуется двумя основными элементами: сопротивлением движению судна и эффективностью его движителей [7]. Учитывая то, что в рассматриваемой задаче гребной винт и СЭУ не изменяются, главным критерием для оценки ходкости судна будет выступать полное сопротивление R , определяемое как

$$R = R_f + R_r = R_f + R_{vp} + R_w, \quad (1)$$

где R_f — сопротивление трения;
 R_r — сопротивление давления (остаточное сопротивление);
 R_{vp} — сопротивление формы;
 R_w — волновое сопротивление.

Для определения сопротивления движению судна на открытой воде использовано программное обеспечение (далее — ПО) ANSYS Fluent, реализующее метод CFD. Одним из преимуществ данного ПО является возможность определить отдельно составляющие R_f и R_r полного сопротивления, что косвенно позволит оценить корректность расчета применительно к рассматриваемой задаче — поскольку наличие бульба в большей степени влияет на волновое сопротивление, разница между составляющими R_r для двух моделей должна быть значительней относительно разницы между R_f .

Расчетные 3-D модели судов приведены на рис. 4.

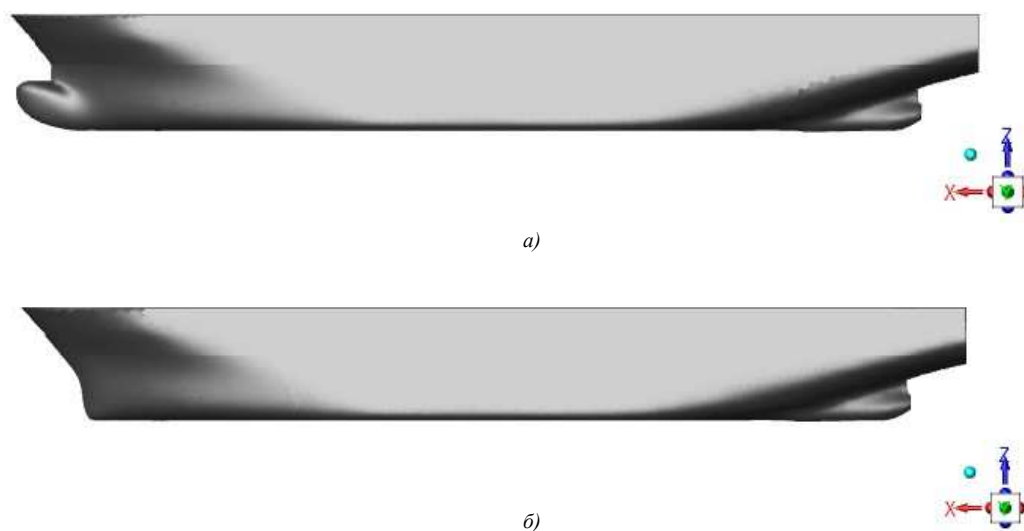


Рис. 4 3-D модели судна
 а) — судно с бульбом; б) — судно после модернизации.

Моделирование границы раздела фаз осуществлялось в ANSYS Fluent с помощью математической модели осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса и неразрывности с методом Volume of Fluid, описанной, например, в [8]. Расчетная область была разделена на две части: надводную и подводную. Для измельчения сеточной модели на границе раздела фаз во fluent meshing применялась опция surface of influence (см. рис. 5).

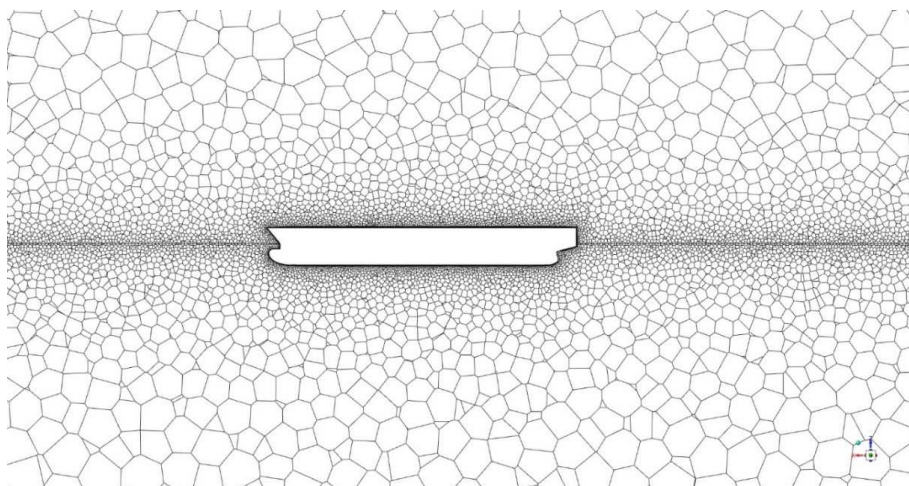


Рис. 5 Фрагмент сеточной модели в плоскости симметрии судна

Решение задачи осуществлялось с использованием принципа обращенного движения: рассматривалось натекание с постоянными скоростями на неподвижный корпус судна воздушной и водной сред в направлении, противоположном оси X глобальной системы координат (СК), то есть по нормали к входным границам. При таком подходе расчетная область и сеточная структура остаются неподвижными, что существенно экономит вычислительные ресурсы. Рассматривалось 4 скорости натекания: 6, 10, 13 и 15 узлов.

Размеры расчетной области выбирались из соображения минимизации возмущений на ее границах и приведены на рис. 6. Количество ячеек в сеточной модели составляло порядка 2 млн.

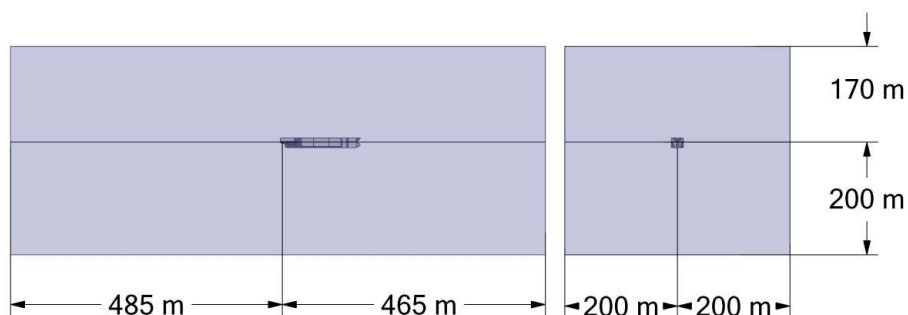


Рис. 6 Габаритные размеры расчетной области

Активация опции Open Channel Flow в настройках модели Volume of Fluid позволяет задать на входных и выходных границах значение уровня дна, а также начальное положение уровня свободной поверхности (в данном случае $Z = 0$ м глобальной СК, что соответствует значению осадки судна, приведенного в табл. 1). Таким образом после инициализации расчета пользователь получает плоскую начальную конфигурацию свободной поверхности, которая автоматически перестраивается в ходе расчета, а также начальное распределение гидростатического давления в соответствии с заданными значениями уровней дна и свободной поверхности акватории [9].

Верхняя, нижняя и боковые границы домена имеют граничное условие стенки с проскальзыванием, то есть нормальные компоненты вектора скорости и градиентов всех величин на этих границах равны нулю. На поверхностях судна задается граничное условие стенки без проскальзывания, которое обычно описывается как условие прилипания и непроницаемости (касательная и нормальная компоненты скорости на границе равны нулю).

Расчет осуществлялся в неявной псевдонестационарной постановке с шагом по времени 0,5 с со схемой решателя Pressure-Based Coupled и опцией Coupled with Volume Fraction. При расчете свободной поверхности использовалась схема compressive. В качестве модели турбулентности была выбрана y^+ — независимая модель $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport). Число Куранта в процессе расчета принималось равным 5.

При таких настройках установившееся решение достигалось примерно за 20 — 30 тыс. итераций. При этом выполнялись необходимые критерии сходимости: достижение заданного уровня невязок, неизменного значения полного сопротивления судна (отклонение от среднего значения в пределах 1 — 3 %), стремление значения дисбаланса по массе к нулевой отметке.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ CFD-АНАЛИЗА

Результаты CFD анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета сопротивления движению судна

V , уз	Re	Fr	Корпус с бульбом			Корпус без бульба			Разница в процентах		
			R_r^{bulb} , Н	R_f^{bulb} , Н	R^{bulb} , Н	R_r^{debulb} , Н	R_f^{debulb} , Н	R^{debulb} , Н	$ \Delta R_r $, %	$ \Delta R_f $, %	$ \Delta R $, %
6	4,5E+08	0,083	39987	42166	82153	43434	41746	85180	7,94	1,01	3,55
10	7,4E+08	0,138	67509	109566	177076	75250	109496	184746	10,29	0,06	4,15
13	9,7E+08	0,179	124715	178101	302817	149468	177438	326906	16,56	0,37	7,37
15	1,1E+09	0,206	209657	233924	443580	260308	233211	493519	19,46	0,31	10,12

На рис. 7 представлены кривые зависимости полного сопротивления от скорости для двух вариантов исполнения корпуса.

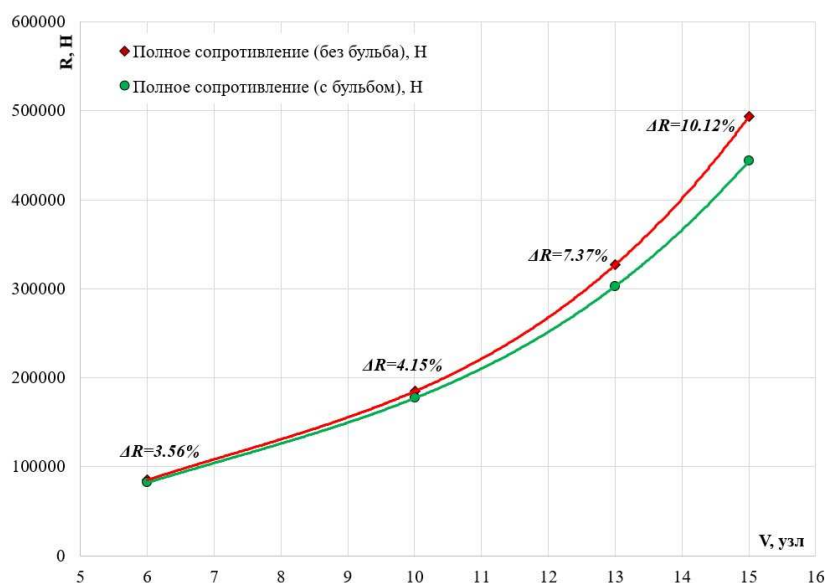


Рис. 7 Зависимость величины полного сопротивления от скорости судна

Видно, что с увеличением скорости судна увеличивается и полное его сопротивление, причем зависимость эта в обоих случаях имеет нелинейный характер. Это объясняется тем, что с ростом скорости волнообразование становится все более интенсивным, соответственно возрастает сопротивление давления и его роль в общем сопротивлении.

Движущееся судно приводит в движение значительные массы воды, наиболее высокие волны образуются в районе носовой оконечности, при этом часть из них расходится в стороны, образуя систему расходящихся волн, располагающихся симметрично по левому и правому бортам. Вторая система волн образуется вблизи кормовой оконечности, но высота этих волн обычно меньше, чем в носовой части.

Кроме того, по бортам судна можно заметить профиль поперечных волн. От высоты и профиля носовой волны зависит распределение гидродинамического давления вблизи форштевня, поэтому изменяя носовые обводы корпуса можно в некоторой степени влиять на носовую волновую систему, тем самым уменьшая волновое сопротивление.

На рис. 8 изображена форма свободной поверхности при движении судна с бульбом. Качественно картина для судна без бульба не меняется, однако наблюдается некоторое увеличение высоты носовой и поперечных волн (в пределах 1 — 2 %).

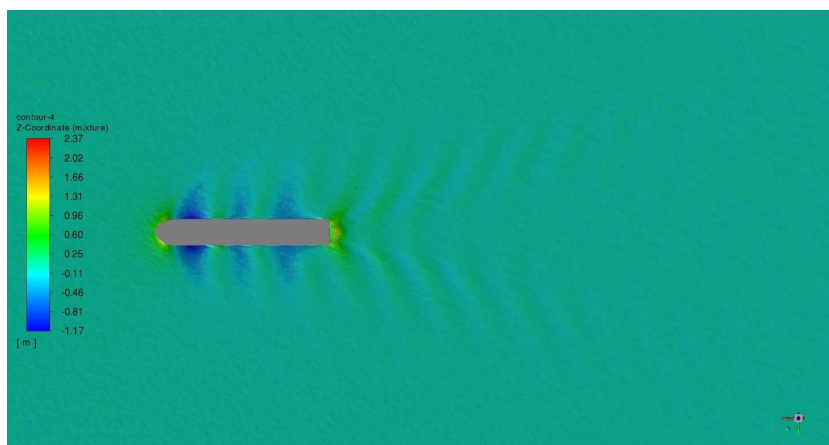


Рис. 8 Форма свободной поверхности при $V=15$ узлов (судно с бульбом)

На рис. 9 представлено распределение коэффициента давления по подводной части корпусов судна с бульбом и судна после модернизации. Коэффициент давления $\bar{p}$ — это безразмерная величина, равная разности местного давления и давления в невозмущенном потоке, отнесенная к скоростному напору невозмущенного потока:

$$\bar{p} = \frac{p - p_{\infty}}{\rho V_{\infty}^2 / 2}, \quad (2)$$

где p — местное давление (давление в выбранной точке на теле);
 p_{∞} — давление в невозмущенном потоке;
 ρ — плотность среды;
 V_{∞} — скорость невозмущенного потока.

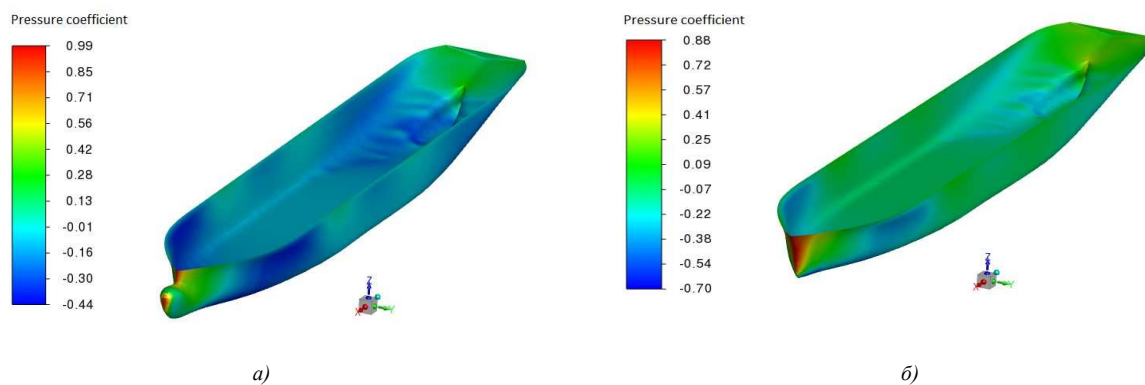


Рис. 9 Распределение коэффициента давления на подводной части судна при $V=15$ узлов:
 а) — судно с бульбом; б) — судно после модернизации

В результате местного повышения давления в передней части бульба, сбегающий с него поток подходит к корпусу судна с уже в некоторой степени пониженным давлением, что в свою очередь и приводит к снижению сопротивления давления для рассматриваемого корпуса.

Графически распределение коэффициента давления вдоль обвода рассматриваемых подводных частей корпусов в плоскости их симметрии при движении судов со скоростью 15 узлов представлено на рис. 10.



Рис. 10 Распределение коэффициента давления по обводу погруженной в воду части корпусов в плоскости симметрии ($V=15$ узлов)

Результаты расчета как качественно, так и количественно соответствуют обобщенным теоретическим и статистическим исследованиям, при этом разница между вязкостными сопротивлениями $|\Delta R_f| = 0,06 \div 1,01$ % существенно меньше разницы между остаточными сопротивлениями $|\Delta R_k| = 7,94 \div 19,46$ %, что подтверждает корректность численного моделирования. Нужно отметить, что для корпуса с бульбом вклад в сопротивление со стороны вязкостных сил несколько больше, чем для модифицированного судна, что обусловлено увеличением в первом случае площади смоченной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При демонтаже носового бульба неизбежно изменение ходовых качеств судна на открытой воде, и для долгосрочного планирования экономической деятельности судоходной компании может быть актуальным вопрос количественной оценки этого изменения. Благодаря CFD-анализу можно достаточно быстро и с высокой точностью оценить изменение сопротивления движению судна, которое при одних и тех же характеристиках винто-рулевого комплекса, будет линейно влиять на расход топлива. Полученные в результате расчета данные могут быть аппроксимированы и использованы для выполнения оценок на любых скоростях.

В расчете были приняты допущения:

- тихая вода;
- метод обращенного движения;
- неучет наличия степеней свободы у судов: в процессе моделирования судно не меняло своего пространственного положения при деформации свободной поверхности.

Несмотря на допущения, принятые в расчете, такой подход может быть использован для практических оценок. При наличии достоверных сведений о расходе топлива до модернизации такой подход может быть использован непосредственно для прогнозирования экономических последствий модернизации судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронников А.В. Проектирование судов: Уч. — Л.: Судостроение, 1991. — 320 с., ил.
2. Овчинников К.Д. Анализ полного сопротивления корпуса судна на различных скоростях хода. Труды ИСП РАН. — Т. 31. — Вып. 6. 2019, стр. 195 — 202. DOI: 10.15514/ISPRAS — 2019 — 31(6) — 12.
3. Kiryanto D.Ch., Firdhaus A. Analysis of Total Ships Resistance with Variation of Hull Bow Types, Ulstein X-Bow, Spherical and Tapering Bulbous Bow using CFD Method. In Proceedings of the 6th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2018), pp. 60 — 64. DOI: 10.5220/0008374400600064.
4. Seok W., Kim Gw.H., Seo J. and Rhee S.H. Application of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement. Journal of Marine Science and Engineering 2019, 7, p. 226. DOI:10.3390/jmse7070226
5. Mahmood Sh., Huang D. Computational Fluid Dynamics Based Bulbous Bow Optimization Using a Genetic Algorithm. Journal of Marine Science and Application. 11. 10.1007/s11804-012-1134-1.
6. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. — 326 с.
7. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля: в 3 Т. — Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. — Л.: Судостроение, 1985. — 786 с., ил.
8. Али Р., Тряскин Н.В. Изучение влияния относительного взаимного расположения двух движущихся параллельно судов на их гидродинамические характеристики. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-3 (50). с. 59 — 65. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.042
9. Ansys Fluent, Release 2021 R1, Help System, Fluent help, user manual, 26.3.5 Modeling Open Channel Flows, ANSYS, Inc.

REFERENCES

1. Bronnikov A.V. *Proektirovaniye sudov* [Ship design]. Leningrad, Sudostroenie, 1991. 320 p.
2. Ovchinnikov K.D. *Analiz polnogo soprotivleniya korpusa sudna na razlichnykh skorostyakh khoda* [Analysis of total resistance for different ship speeds]. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 6, 2019, pp. 195 — 202.
3. Kiryanto, Deddy Chrismianto and Ahmad Firdhaus. Analysis of Total Ships Resistance with Variation of Hull Bow Types, Ulstein X-Bow, Spherical and Tapering Bulbous Bow using CFD Method. In Proceedings of the 6th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2018), pages 60-64. DOI: 10.5220/0008374400600064.
4. Woochan Seok, Gwan Hoon Kim, Jeonghwa Seo, and Shin Hyung Rhee. Application of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement. Journal of Marine Science and Engineering 2019, 7, 226. DOI:10.3390/jmse7070226
5. Shahid Mahmood, Debo Huang. Computational Fluid Dynamics Based Bulbous Bow Optimization Using a Genetic Algorithm. Journal of Marine Science and Application. 11. 10.1007/s11804-012-1134-1.
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, RS, 2020 326 p. (In Russian)
7. Voytkunsky Ia.I. *Spravochnik po teorii korablia* [Ship theory handbook], Leningrad, Sudostroenie, 1985. 786 p.
8. Rami Ali, Nikita V. Tryaskin. Study the influence of the relative position of two vessels moving in parallel on their hydrodynamic characteristics. Marine intellectual technologies, No. 4, Part 3, 2020. pp. 59 — 65. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.042
9. Ansys Fluent, Release 2021 R1, Help System, Fluent help, user manual, 26.3.5 Modeling Open Channel Flows, ANSYS, Inc.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.129.791

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЙ К ВЕЛИЧИНЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА КОРПУС ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОЙ КОЛОНКИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ СУДОВ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ ARC4 — ARC9

А.В. Андриюшин, д-р техн. наук, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», Санкт-Петербург, e-mail: AndryushinAV@cniimf.ru

С.С. Федосеев, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», Санкт-Петербург, e-mail: FedoseevSS@cniimf.ru

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

В статье представлены основные результаты НИР «Разработка проекта требований Регистра к величине глобальной ледовой нагрузки, действующей на корпус движительно-рулевой колонки, для включения в раздел 19 части XVII Правил классификации и постройки морских судов». В работе выполнена разработка проекта требований к величине глобальной ледовой нагрузки действующей на корпус движительно-рулевой колонки для арктических судов ледовых классов Arc4 — Arc9. В процессе работы был выполнен анализ режимов движения судов в ледовых условиях, морфологических и прочностных характеристик ледовых образований в зависимости от класса судна. Разработаны сценарии взаимодействия ДРК с ледовыми образованиями. Разработаны физические модели разрушения льда при взаимодействии ледовых образований с элементами корпуса ДРК. В статье приведены результаты расчета ледовых нагрузок на элементы корпуса ДРК по разработанному проекту требований для ледокольных судов классов Arc5 и Arc7. Выполнен сравнительный анализ нагрузок по разработанному проекту требований и Правилам DNV-GL, для классов PC6 и PC3.

Ключевые слова: движительно-рулевая колонка, ледокольные суда, ледокол, судно двойного действия, торос, ровный лед, движение за ледоколом, выход из канала, навал на кромку канала, киль тороса, консолидированная часть

DEVELOPMENT OF THE DRAFT REQUIREMENTS FOR THE VALUE OF GLOBAL ICE LOADS ACTING ON AZIMUTH THRUSTERS FITTED ON ARCTIC ARC4 — ARC9 ICE CLASS SHIPS

A.V. Andryushin, DSc, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, e-mail: AndryushinAV@cniimf.ru

S.S. Fedoseev, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, e-mail: FedoseevSS@cniimf.ru

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

The article presents the main results of the research work "Development of the draft Register requirements for the value of the global ice loads acting on the azimuth thruster to be included in Section 19, Part XVII of the Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships". The work includes the development of draft requirements for the value of the global ice load acting on the azimuth thruster of Arctic ships of Arc4 — Arc9 ice classes. In the course of the research work ship's movement regimes in ice as well as morphological and strength characteristics of ice formations depending on the class of the ship have been analyzed. Scenarios for the interaction between azimuth thrusters and ice as well as physical models of ice crushing due to the interaction of ice formations with the elements of azimuth thrusters have been developed. The article presents the results of calculating the ice loads on the elements of the azimuth thrusters in accordance with the developed draft requirements for ice ships of Arc5 and Arc7 ice classes. Comparative analysis of loads was carried out according to the developed draft requirements and DNV Rules for classes PC6 and PC3.

Keywords: *azimuth thruster, ice ships, icebreaker, double-acting ship, ridge, level ice, movement behind the icebreaker, leaving the channel, piling on the edge of the channel, ridge keel, consolidated part*

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение проектной и эксплуатационной прочности ДРК в ледовых условиях является одной из основных задач современного ледоколостроения и арктического судоходства. Определение ледовых нагрузок на элементы ДРК является составной частью указанной задачи. Указанные задачи актуализированы интенсивным развитием морских транспортных систем по вывозу углеводородов из Арктических районов крупнотоннажными танкерами.

Использование ДРК на ледокольных судах и ледоколах в значительной степени определяет их операционную эффективность и проектные решения по структуре транспортной системы (тип и количество судов и ледоколов) и организации ее работы. В качестве примера можно привести проект Yamal-1 по транспортировке СПГ из Обской Губы крупнотоннажными LNGC двойного действия с тремя ДРК типа AZIPOD, что позволило максимально снизить ледокольную поддержку на морских участках Северного морского пути (СМП). Указанный проект и реализуемые в настоящее время проекты морских транспортных систем (проект Arctic LNG 2) в максимальной степени интенсифицируют разработку проектных методик и нормативных требований к величинам ледовых нагрузок на ДРК судов арктических классов и обеспечению их прочности.

В указанной статье представлены основные результаты исследований АО "ЦНИИМФ" и РС в этом направлении.

1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНЫХ МЕТОДИК ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ДРК СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ ARC4 — ARC9

Определение (назначение) ледовых нагрузок на ДРК современных судов ледовых классов **Arc4 — Arc9** включает решение следующих взаимосвязанных задач (этапов). В первую очередь необходимо назначение расчетных режимов движения судов в ледовых условиях, морфологических и прочностных характеристик ледовых образований в зависимости от класса судна. Второй задачей является разработка сценариев взаимодействия ДРК с ледовыми образованиями. Заключительная стадия включает разработку моделей разрушения льда элементами ДРК, расчетных схем определения контактных ледовых давлений и глобальных ледовых нагрузок, а также их верификацию.

2. РАСЧЕТНЫЕ РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ ARC4 — ARC9 В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

В рамках работы выполнен анализ опыта традиционных транспортных судов классов Arc4 — Arc9. В тяжелых ледовых условиях эксплуатация выполняется в канале носом вперед под проводкой ледокола. Внедрение ДРК позволило реализовать концепцию судна двойного действия (DAS). В тяжелых ледовых условиях движение осуществляется кормой вперед, что значительно повышает операционную эффективность во льдах и снижает ледокольную поддержку судоходства.

Анализ опыта транспортировки СПГ из Обской Губы крупнотоннажными газовозами Yamalmax класса Arc7 (тип «Кристоф де Маржери») показал, что в Карском море эффективная перевозка обеспечивается без ледокольной поддержки. Для обеспечения эффективной круглогодичной транспортировки СПГ в Японию, Китай крупнотоннажными газовозами классов Arc7 — Arc8 через Восточный сектор СМП (проект Arctic LNG 2 компании «Новотек») требуется ледокольная поддержка в районах с наиболее тяжелыми ледовыми условиями. При движении в канале поддерживаются наибольшие скорости и реализуются наибольшие значения ледовых нагрузок на элементы пропульсивного комплекса.

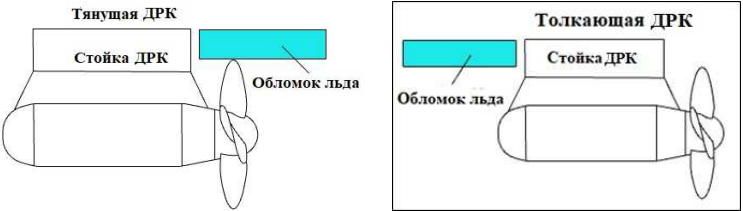
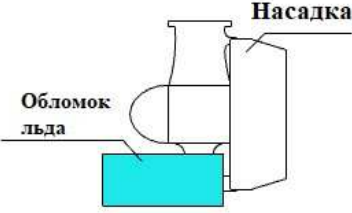
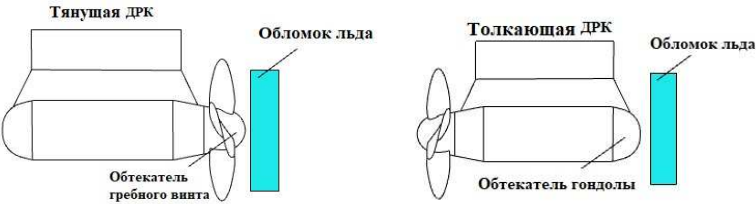
Учитывая изложенное, движение в канале за ледоколом принимается в качестве расчетного для назначения ледовых нагрузок на ДРК.

3. РАСЧЕТНЫЕ СЦЕНАРИИ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ДРК ЛЕДОКОЛЬНЫХ СУДОВ

Для назначения продольных и поперечных ледовых сил на ДРК в табл. 1 представлены основные расчетные сценарии.

Таблица 1

Расчетные сценарии для назначения продольных и поперечных ледовых сил на ДРК

№	Расчетный сценарий	Сила	Схемы
1	Продольный удар обломка льда об входящую кромку стойки тянущей и толкающей ДРК	F_{sl}	
2	Продольный удар обломка льда об входящую кромку насадки толкающей ДРК	F_{nl}	
3	Продольный удар обломка льда об обтекатель гребного винта тянущей ДРК и обтекатель гондолы толкающей ДРК	F_{cl}	

Продолжение — Табл. 1

№	Расчетный сценарий	Сила	Схемы
4	Продольное прорезание ледового покрова (обломка льда) входящей кромкой стойки тянущей и толкающей ДРК	F_{sc}	
5	Поперечный удар обломка льда с гондолой, стойкой, насадкой ДРК	F_{st} F_{pnt}	
6	Суммарная поперечная ледовая сила на ДРК от воздействия на стойку и гондолу (насадку) от удара обломком льда	F_{Σ}	
7	Поперечный навал ДРК на киль тороса	F_{ki}	

3.1 Реализация сценариев продольных ледовых сил на ДРК

Сценарии 1 — 3 продольной ледовой силы (см. табл. 1) реализуются для бортовых и центральных ДРК при прямом движении судов DAS кормой вперед, а также конвенционных судов и судов DAS носом вперед в канале (см. рис. 1 и 4).

Продольные ледовые силы на бортовые и центральные ДРК реализуются при выходе судов DAS из канала кормой вперед для предотвращения столкновения с проводящим ледоколом, см. рис. 3, и при отходе конвенционных судов задним ходом по каналу, см. рис. 7. В последних двух случаях необходимо принимать во внимание навал кормы судна на кромку канала. В случае прямого движения судна в канале продольная ледовая сила по сценариям 1 — 3 обусловлена ударом обломка льда из разрушенного корпусом ледокола ледового покрова.

В случае выхода судна DAS из канала (см. рис. 3) и отхода конвенционного судна задним ходом, (см. рис. 7), с навалом кормы на кромку канала продольные ледовые силы могут быть обусловлены ударом обломка льда из ледового покрова, разрушенного кормой судна. Последний случай не реализуется для конвенционных судов с транцевой кормой классов **Arc4** — **Arc5**, когда ледовый покров в зоне контакта с корпусом разрушается смятием практически без изгиба и образования обломком льда.

При выходе судна DAS гребными винтами вперед и отходе конвенционного судна задним ходом из канала (см. рис. 3 и 7) с навалом кормы на его кромку обломки льда из разрушенного ледового покрова двигаются по корпусу судна в виде ледовой рубашки, подпирая друг друга. В этом случае продольная ледовая сила на стойку бортовой и центральной ДРК может быть обусловлена наиболее консервативным сценарием (см. табл. 1, сценарий 4), а именно режимом прорезания льда входящей кромкой ДРК. Рассмотренный случай не реализуется для конвенционных судов с транцевой кормой классов **Arc4** — **Arc5**, когда ледовый покров в зоне контакта с корпусом разрушается смятием практически без изгиба и образования обломком льда.

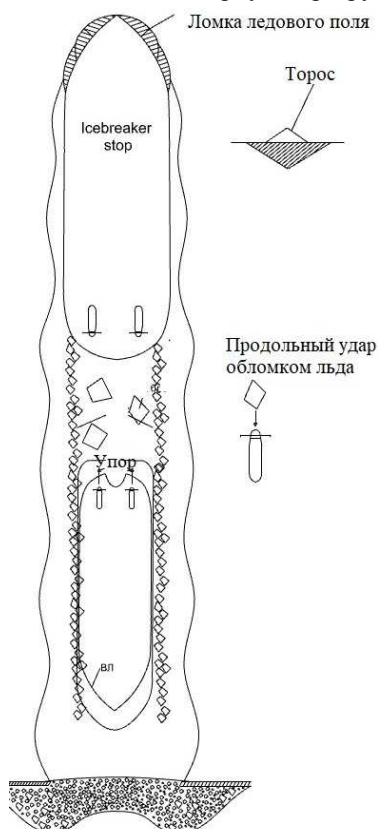


Рис. 1 Прямое движение судна DAS в канале за ледоколом. Реализация сценариев 1 — 3, см. табл. 1



Рис. 2 Экстренная остановка судна DAS (реверс) для предотвращения столкновения с проводящим ледоколом. Реализация сценариев 5 — 6, см. табл. 1



Рис. 3 Выход судна DAS из канала кормой вперед для предотвращения столкновения с проводящим ледоколом. Реализация сценариев 1 — 7, см. табл. 1



Рис. 4 Прямое движение conventional судна и судна DAS носом вперед в канале за ледоколом. Реализация сценариев 1 — 3, см. табл. 1



Рис. 5 Экстренная остановка conventional судна и судна DAS при движении носом вперед реверсом ДРК для предотвращения столкновения с проводящим ледоколом. Реализация сценариев 5 и 6, см. табл. 1



Рис. 6 Режим выхода conventional судна и судна DAS из канала носом вперед с навалом кормы на кромку канала для предотвращения столкновения с проводящим ледоколом. Реализация сценариев 5 — 7 см. табл. 1

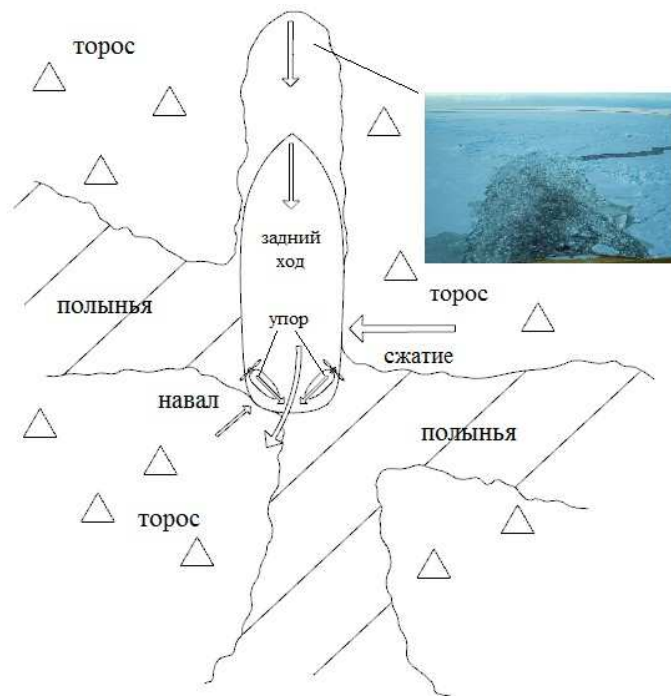


Рис. 7 Режим отхода (выхода) conventional судна задним ходом по каналу в торосистой перемычке задним ходом. Реализация сценариев 1 — 7, см. табл. 1

3.2 Реализация сценариев поперечных ледовых сил на ДРК

Поперечные ледовые силы от удара обломком льда и от навала на торос определяются сценариями 5 — 7 (см. табл. 1). Для судов DAS и конвенционных судов указанные сценарии реализуются при экстренном торможении судна реверсом ДРК (см. рис. 2 и 5), а также при выходе судна из канала, когда ДРК переключаются на большой угол (до 90°), см. рис. 3 и 6. Указанные режимы характерны для предотвращения столкновения судна с проводящим ледоколом.

3.3 Реализация сценариев поперечных ледовых сил на ДРК от удара обломком льда

Для судов DAS при движении гребными винтами вперед, а также для конвенционных судов и судов DAS при движении носом вперед поперечные ледовые силы на бортовые и центральные ДРК реализуются от удара обломком льда из разрушенного ледоколом ледового покрова при экстренном торможении судном реверсом ДРК, см. рис. 2 и 5. Для обеспечения экстренного выхода конвенционного судна и судна DAS из канала при движении носом вперед угол переключки бортовых и центральных ДРК достигает 90° , что также обуславливает возможность действия на них поперечного удара обломком льда из разрушенного ледоколом ледового покрова.

При выходе DAS из канала гребными винтами вперед для предотвращения столкновения с ледоколом или при отходе конвенционного судна по каналу задним ходом корма судна внедряется в кромку канала, в этом случае поперечные ледовые силы могут быть обусловлены воздействием обломков льда из разрушенного кормой ледового покрова (консолидированной части тороса), см. рис. 3 и 7.

Для конвенционных судов с транцевой кормой классов **Arc4** — **Arc5**, последний случай может не рассматриваться по причине, изложенной выше.

Для DAS поперечная ледовая сила от килея тороса на бортовые и центральные ДРК, (см. сценарий 7 табл. 1), реализуется при выходе из канала на режимах кормой вперед, когда ДРК переключаются на большой угол (до 90°). При движении носом вперед DAS или конвенционного судна сценарий поперечного навала ДРК на торос реализуется для бортовой ДРК при экстренном выходе судна из канала, когда угол переключки ДРК достигает 90° , а корма выносится на кромку канала и киль тороса. Для конвенционных судов указанный сценарий 7 (см. табл. 1), реализуется для центральной и бортовых ДРК при отходе назад по каналу с навалом кормы на его кромку и киль тороса.

Указанные сценарии и эксплуатационные режимы судна, соответствующие их реализации, принимаются в качестве расчетных для назначения глобальных ледовых нагрузок на корпус ДРК.

Для режима отхода (выхода) конвенционного судна задним ходом по каналу в торосистой перемычке задним ходом, см. рис. 7, указанный сценарий 4 также не рассматривается для судов классов **Arc4** и **Arc5** с транцевой кормой.

4. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Расчетные значения параметров эксплуатационных режимов морфологических и прочностных характеристик ледовых образований для назначения глобальных ледовых нагрузок на ДРК от удара обломком льда и от навала на киль тороса представлены в табл. 2 и 3 соответственно. Табл. 2 и 3 разработаны на базе предшествующего и современного опыта эксплуатации ледокольных судов с учетом Правил классификации и постройки морских судов.

Таблица 2

Расчетные значения параметров эксплуатационных режимов и морфологических характеристик ледовых образований для назначения ледовых глобальных нагрузок на ДРК от удара обломком льда

Класс судна	Расчетные значения толщины консолидированного слоя и толщины набитого льда в канале		Расчетные значения прочности льда на одноосное сжатие		Параметры обломка льда из разрушенного корпусом проводящего ледокола консолидированного слоя тороса			
	H_{con} , м	H_{ch} , м	σ_V , МПа	σ_H , МПа	Расчетная длина обломка льда, м l_d	Расчетная ширина обломка льда, м b_d	Расчетная толщина обломка льда, м H_d	Масса обломка льда, кг m_d
Arc4	1,8	1,6	11,5	9,5	2,3	3,8	1,8	7315
Arc5	2	1,9	12,5	10	3,2	5,4	2	16070
Arc6	2,6	2,3	13	10,5	4,7	7,9	2,7	46616
Arc7 — Arc9	4,5	4,0	14	11,5	6,22	10,44	4,8	144938

Здесь H_{con} — расчетная толщина консолидированного слоя тороса, м;
 H_{ch} — расчетная толщина набитого льда в канале, м;
 σ_V — расчетная прочность льда на одноосное сжатие при вертикальном нагружении, МПа;
 σ_H — расчетная прочность льда на одноосное сжатие при горизонтальном нагружении, МПа.

Таблица 3

Расчетные значения параметров эксплуатационных режимов и морфологических характеристик ледовых образований для назначения ледовых глобальных нагрузок на ДРК от навала ДРК на киль тороса

Класс судна	Расчетная глубина кия, м H_{keel}	Толщина набитого льда, м H_{ch}
Arc4	11	1,9
Arc5	11,8	2,3
Arc6	12	2,7
Arc7 — Arc9	15,5	4,0

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СКОРОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДРК С ЛЕДОВЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ

Для судов двойного действия (DAS) для назначения расчетной скорости взаимодействия ДРК с ледовым образованием должны быть рассмотрены режимы движения кормой и носом вперед.

Для DAS при движении кормой вперед вне зависимости от расположения ДРК (бортовая, центральная) расчетная скорость V_{ice} , м/с, взаимодействия ДРК с ледовыми образованиями (удар обломка льда, навал на киль тороса) определяется:

$$V_{ice} = k_{drop} \cdot V, \quad (1)$$

где V — расчетная скорость судна, м/с, определяется по формуле (3);

k_{drop} — коэффициент, учитывающий уменьшение скорости взаимодействия ДРК с обломком льда из разрушенного скулой кормы ледового покрова;

$k_{drop} = 0,9$ при навале кормы на кромку канала;

$k_{drop} = 1$ для остальных случаев взаимодействия ДРК с ледовыми образованиями (удар обломка льда, навал на киль тороса).

Для конвенционных судов и судов DAS при движении носом вперед расчетная скорость V_{ice} взаимодействия ДРК с обломком льда определяется как

$$V_{ice} = k_{location} \cdot V, \quad (2)$$

где $k_{location} = \begin{cases} 1 & \text{— бортовая ДРК} \\ 0,8 & \text{— центральная ДРК} \end{cases}$;

V — скорость судна, м/с, определяется по формуле (3).

Определение скорости движения в канале выполняется по формуле (3), которая была разработана на основании формулы Правил РС [часть VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов], с учетом поправок на натурные и модельные данные:

$$V = \frac{r_0 \cdot R_{ch}(V=5 \text{ уз}, H_{ch}) - T_{bollard}}{t \cdot T_{bollard} - r_1 \cdot R_{ch}(V=5 \text{ уз}, H_{ch})} \quad (3)$$

где $R_{ch}(V=5 \text{ уз}, H_{ch})$ — сопротивление движению судна в канале с набитым льдом на скорости $V=5$ уз, кН;
 $T_{bollard}$ — упор судна на швартовном режиме, кН;
 t, r_0, r_1 — коэффициенты.

6. МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ РАЗМЕРОВ ОБЛОМКОВ ЛЬДА ИЗ РАЗРУШЕННОГО ЛЕДОКОЛОМ (СУДНОМ ЛЕДОВОГО КЛАССА) ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Наибольшие обломки льда образуются в районе скулы носовой (кормовой) части. Характерная ширина обломка льда, в зависимости от скорости судна (ледокола), толщины льда, его прочности может быть определена [4]:

$$b_{block} = L_{static}/k_{dyn}, \quad (4)$$

где $L_{static} = 10H_{con}$ — характерная длина ледового, где H_{con} — расчетные значения толщины консолидированного слоя, см. табл. 2;
 k_{dyn} — коэффициент динамичности, характеризует динамическое усиление нагрузки разрушения ледового покрова и уменьшение характерного размера обломков льда в зависимости от скорости нагружения [12 — 15].

Длина обломка льда определяется по формуле [14]:

$$l_{block} = 0,5 \cdot b_{block} / \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Для назначения ледовой силы от удара обломком льда в качестве расчетной длины l_d и ширины b_d обломка льда принимаются следующие величины:

$$l_d = \min(b_{block}, l_{block}); \quad (6)$$

$$b_d = \max(b_{block}, l_{block}). \quad (7)$$

Масса обломка льда определяется по формуле [14]:

$$m_d = \rho_{ice} \cdot k_{fb} \cdot b_d \cdot l_d \cdot H_d, \quad (8)$$

где ρ_{ice} — плотность льда, кг/м³;
 k_{fb} — коэффициент формы обломка льда, принимается равным 0,5;
 H_d — расчетная толщина обломка льда, м, принимается равной H_{con} , м, см. табл. 2.

7. ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ НА КОРПУС ДРК

7.1 Продольная ледовая сила на обтекатель гребного винта тянущей ДРК и обтекатель гондолы толкающей ДРК от удара обломком льда

На рис. 8 представлена схема взаимодействия обтекателя гребного винта со льдом для определения продольной ледовой нагрузки на обтекатель [16, 17]. Схема основана на гидродинамической теории выдавливания ледового порошка [18 — 20].

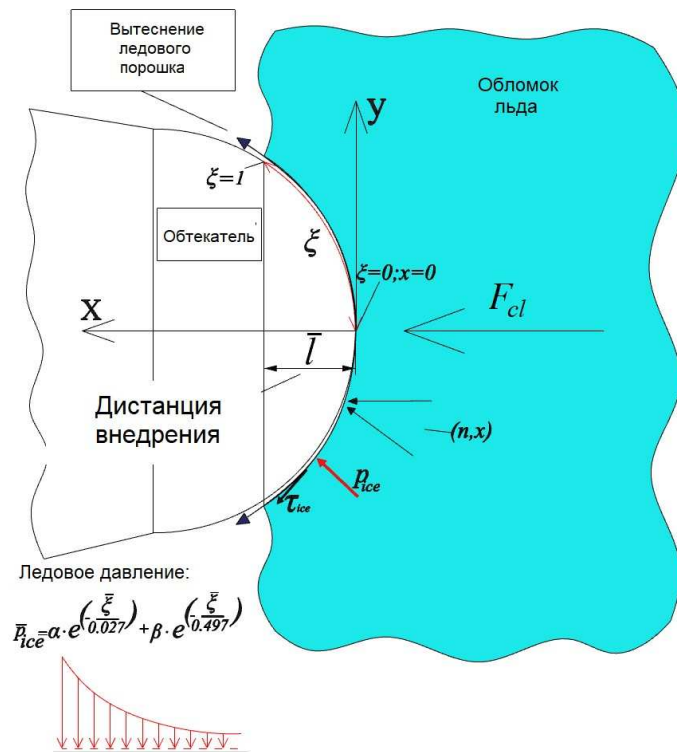


Рис. 8 Схема взаимодействия обтекателя гребного винта со льдом [17]

Ледовая продольная сила F_{cl} , действующая на обтекатель ГВ, определяется по формуле

$$F_{cl} = \int_s [p_{ice}(\xi) \cdot \cos(\hat{n}, \hat{x}) + \tau_{ice} \sin(\hat{n}, \hat{x})] ds, \quad (9)$$

где $\tau_{ice} = f_d p_{ice}$ — касательные напряжения, МПа;
 $f_d \cong (0,08 \text{ — } 0,1)$ — динамический коэффициент трения;
 ds — элемент площади обтекателя гребного винта;
 N — нормаль к поверхности обтекателя, м².

Ледовые давления p_{ice} в зоне контакта [12,17,18]:

$$\bar{p}_{ice} = a \cdot e^{-\bar{\xi}/0,027} + \beta \cdot e^{-\bar{\xi}/0,497} \quad (10)$$

где $\bar{p}_{ice} = p_{ice}/(p_{ice})_{\max}$ — безразмерное контактное ледовое давление;
 $(p_{ice})_{\max}$ — максимум ледового контактного давления;
 $\bar{\xi} = \xi/\Delta\xi$ — безразмерная координата вдоль кривой ξ (линия тока выдавливаемого ледового порошка);
 $\Delta\xi$ — длина зоны контакта по кривой ξ , $\bar{\xi} \in [0,1]$, 0 — начало зоны контакта; 1 — конец зоны контакта.

Безразмерное среднее давление:

$$\bar{p}_0 = \int_0^1 (a \cdot e^{-\bar{\xi}/0,027} + \beta \cdot e^{-\bar{\xi}/0,497}) d\bar{\xi}. \quad (11)$$

Максимум ледового контактного давления $(p_{ice})_{\max}$ определяется по формуле, предложенной Н. Soininen [4, 20]:

$$(p_{ice})_{\max} = 15 \cdot \sigma_V^{0,6}, \quad (12)$$

где σ_V — прочность льда на одноосное сжатие при вертикальном нагружении, см. табл. 2.

Необходимо отметить, что в табл. 2 в качестве расчетных значений прочности льда на одноосное сжатие представлены их максимально возможные значения, которые ограничивают возможный диапазон их изменения сверху.

Среднее локальное контактное ледовое давление p_0 в зоне контакта (локальная прочность льда на смятие)

$$p_0 = 2,4 \cdot \sigma_V^{0,6}. \quad (13)$$

При ударе обломком льда значение продольной силы в зависимости от скорости V_{ice} определяется из уравнения:

$$(m_d V_{ice}^2)/2 = \int_0^l F_{cl} dx, \quad (14)$$

где m_d — характерная масса обломка льда;

V_{ice} — скорость взаимодействия обломка льда с обтекателем;

l — дистанция внедрения обтекателя в лед по оси x .

7.2 Расчетная зависимость для назначения продольной ледовой силы на обтекатель гребного винта тянущей ДРК и обтекатель гондолы толкающей ДРК от удара обломком льда

Учитывая изложенное ранее, продольная ледовая сила на обтекатель F_{cl} , МН, определяется по формуле

$$F_{cl} = 3,14 \cdot R_c^2 \cdot p_0 \cdot (2\bar{l} - (\bar{l})^2) \cdot k_{form}(\bar{l}), \quad (15)$$

где R_c — радиус обтекателя, м;

p_0 — среднее локальное давление, МПа, определяется по формуле (13);

$\bar{l}$ — безразмерная глубина внедрения, см. рис. 8, определяется как

$$\bar{l} = 1,3375 \cdot \left[\frac{(m_d \cdot V_{ice}^2)/2}{3,14 \cdot R_c^3 \cdot p_0 \cdot 10^6} \right]^{0,6}, \quad (16)$$

где $k_{form}(\bar{l})$ — коэффициент формы, определяется

$$k_{form}(\bar{l}) = -0,1525\bar{l}^3 + 0,402\bar{l}^2 - 0,3897\bar{l} + 1. \quad (17)$$

7.3 Продольная ледовая сила на стойку ДРК

На рис. 9 представлена схема взаимодействия стойки колонки со льдом для определения ледовой нагрузки при продольном ударе [17].

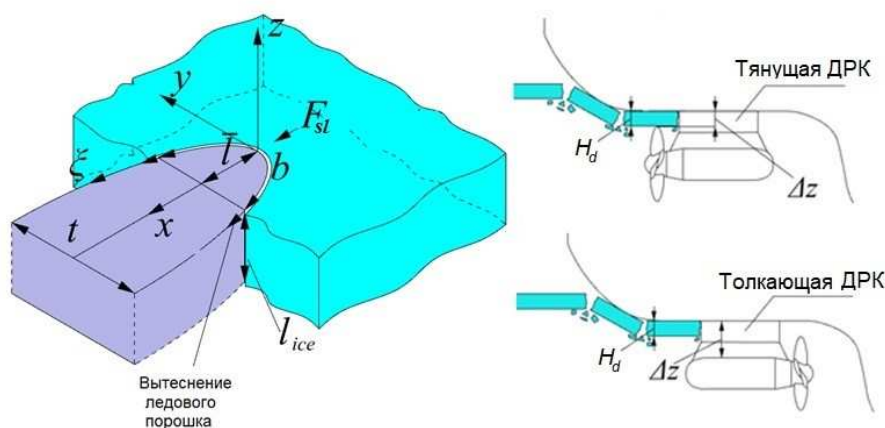


Рис. 9 Схема взаимодействия стойки колонки со льдом [17]

При ударе обломком льда значение продольной силы определяется

$$F_{nl} = b \cdot l_{ice} \cdot k_{scale}(l_{ice}) \cdot k_{form}(\bar{l}) \cdot p_0, \quad (23)$$

где l_{ice} — длина контакта, м, см. рис. 10;

$k_{scale}(l_{ice})$ — масштабный фактор, определяется по формуле (19);

p_0 — среднее локальное давление, МПа, определяется по формуле (20);

$k_{form}(\bar{l})$ — коэффициент формы, определяется по формуле (17), где $\bar{l}$ — безразмерная глубина внедрения, см. рис.10, определяется как

$$\bar{l} = 1,0864 \cdot \left[\frac{(m_d \cdot V_{ice}^2)/2}{\arccos(1 - \bar{\delta}_{ice}) \cdot R_n \cdot r^2 \cdot p_0 \cdot 10^6 \cdot k_{scale}(l_{ice})} \right]^{0,65}, \quad (24)$$

где $\bar{\delta}_{ice}$ — безразмерная высота контакта, см. рис 10;

b — зона контакта в плоскости сечения профиля, м, см. рис. 10.

7.5 Поперечная ледовая сила на стойку ДРК от удара обломком льда

На рис. 11 представлена схема взаимодействия стойки ДРК с обломком льда. Схема основана на модели разрушения льда при взаимодействии с плоской стенкой, разработана специалистами P. Varsta, K. Riska, C. Daley, P. Kujla, E. M. Апполоновым, А.В. Андюшиным и др. нашла широкое применение при определении ледовых нагрузок на корпус судна и представлена в работах [12, 13, 17, 21, 24, 26, 27].

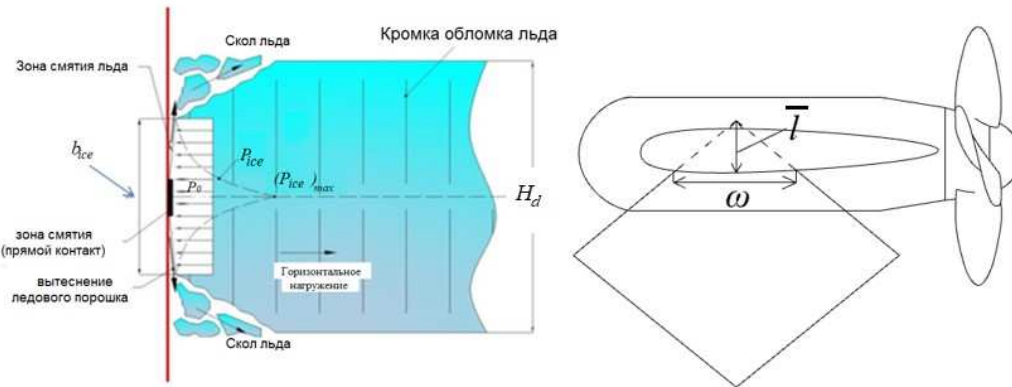


Рис. 11 Схемы поперечного удара обломка льда о стойку колонки с механизмом разрушения его кромки при взаимодействии с плоской стенкой [12, 13, 17, 21, 24, 26, 27]

При взаимодействии кромки льда с плоской стенкой с нижней и верхней поверхностями ледового покрова происходит скол элементов льда, см. рис. 11. Поэтому высота зоны контакта со льдом $b_{ice} < H_d$, где H_d — толщина обломка льда. Скол элементов льда происходит одновременно, что обуславливает масштабный эффект среднего давления по зоне контакта. С учетом изложенного, среднее давление по зоне контакта ($\omega \cdot b_{ice}$):

$$p_{ice}^{avg}(\omega \cdot b_{ice}) = p_0 \cdot k_{scale}(\omega), \quad (25)$$

где p_0 — среднее локальное давление, МПа, определяется по формуле (20);

$k_{scale}(\omega)$ — масштабный фактор, определяется по формуле (19).

В общем случае значение поперечной глобальной ледовой силы на стойку F_{st} в зависимости от скорости V_{ice} взаимодействия ДРК с обломком льда определяется из уравнения (14).

При заданной длине зоны контакта ω значение ледовой силы на стойку F_{st} определяется

$$F_{st} = \omega \cdot b_{ice} \cdot p_0 \cdot k_{scale}(\omega), \quad (26)$$

где $b_{ice} = k_{split} \cdot H_d$ — высота зоны контакта, см. рис. 11;

k_{split} — коэффициент скола, учитывающий уменьшение высоты контакта из-за сколов льда и принимается $\approx 0,4$.

Ширина зоны контакта ω , м, определяется

$$\omega = b_d \bar{l}, \quad (27)$$

где b_d — расчетная ширина обломка льда, см. формулу (7), м;

$\bar{l} = C_2 \cdot f^2 + C_1 \cdot f + C_0$ — безразмерная дистанция внедрения;
 C_2, C_1, C_0 — безразмерные коэффициенты;

$$f = 1,273 \left(\frac{\rho_{ice} \cdot k_{fb}}{k_{split} \cdot p_0 \cdot 10^6} \right) V_{ice}^2 \text{ — функционал.}$$

7.6 Поперечная ледовая сила на гондолу(насадку) ДРК от удара обломком льда

Расчетная схема представлена на рис. 12.

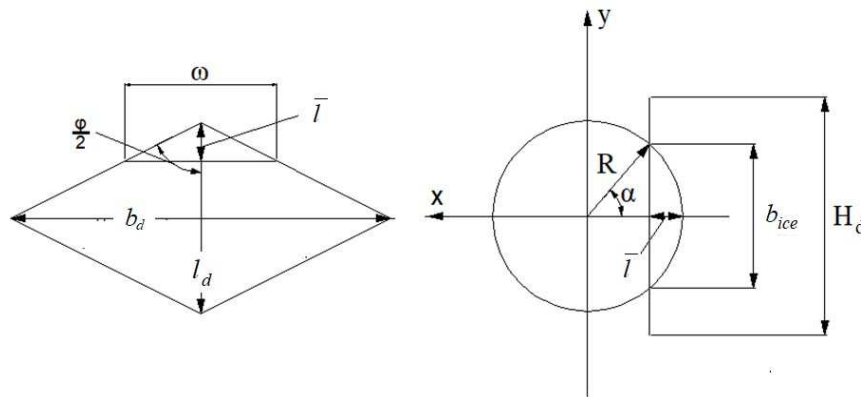


Рис. 12 Расчетная схема назначения поперечной глобальной ледовой силы F_{pnt} на гондолу и насадку ДРК от удара обломком льда

Значение поперечной глобальной ледовой силы на гондолу (насадку) F_{pnt} , МН, в зависимости от скорости взаимодействия ДРК со льдом определяется из уравнения (13).

Результаты исследований показывают, что при боковом ударе внедрение обломка льда в гондолу $\bar{l}$ (см. рис. 12) значительно меньше, чем радиус гондолы или насадки R . В этом случае значение поперечной глобальной ледовой силы на гондолу (насадку) F_{pnt} , МН, определяется как

$$F_{pnt} = 0,65 \cdot \omega \cdot b_{ice} \cdot p_0 \cdot k_{scale}(b_{ice}), \quad (28)$$

где $\omega = 2 \cdot \bar{l} \cdot R_{hub} \cdot b_d / l_d$, м — ширина зоны контакта, см. рис. 12;

$\bar{l}$ — безразмерная глубина внедрения, см. ниже;

R — радиус гондолы (насадки), м;

b_d, l_d — расчетные размеры обломка льда, м, см. формулы (6) и (7);

$b_{ice} = 2R \sin(\arccos(1 - \bar{l}))$, м — высота контакта;

$k_{scale}(b_{ice})$ — масштабный фактор прочности льда, определяется по формуле (19);

p_0 — среднее локальное давление, МПа определяется по формуле (20).

Безразмерная глубина внедрения $\bar{l}$ определяется как

$$\bar{l} = a \psi^b, \quad (29)$$

где $\psi = 0,245 \left(\frac{l_d^2 H_d}{R^3} \right) \left(\frac{\rho_{ice} \cdot k_{fb}}{p_0 \cdot 10^6} \right) V_{ice}^2$ — функционал;

a, b — параметры.

7.7 Суммарная поперечная ледовая сила на ДРК от воздействия на стойку и гондолу (насадку) от удара обломком льда

Суммарная поперечная нагрузка (сила) на ДРК F_{tt} (см. рис. 13), определяется как сумма поперечной силы на стойку F_{st} и поперечной силы на гондолу (насадку) F_{pnt} с учетом редуцирования суммарной нагрузки, обусловленного неодновременностью реализации максимальных значений слагаемых нагрузок (эффект неодновременности разрушения) [28].

$$F_{tt} = k_{red} \cdot (F_{st} + F_{pnt}), \quad (30)$$

где $k_{red} = 0,7$ — коэффициент редуцирования суммарной поперечной нагрузки, обусловленный неодновременностью реализации максимальных значений слагаемых нагрузок (эффект неодновременности разрушения) [28];

F_{st} — поперечная ледовая сила на стойку ДРК, см. формулу (26);

F_{pnt} — поперечная ледовая сила на гондолу (насадку) ДРК, см. формулу (27).

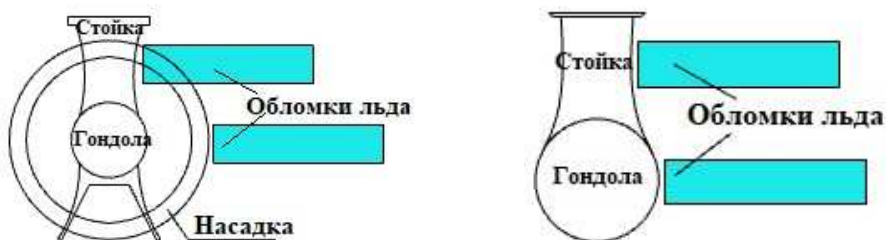


Рис. 13 Суммарная поперечная ледовая нагрузка

7.8 Поперечная ледовая сила на ДРК от кия тороса

Поперечная нагрузка на ДРК от навала на киль тороса определяется выражением (31). Данный метод расчета основан на теории «сыпучей» среды (теория Кулона — Мора):

$$F_{kt} = S p_{keel} V_{ice}^{0,66}, \quad (31)$$

где S — суммарная площадь боковой проекции ДРК;

$p_{keel} = 0,0149 \cdot H_{keel} + 0,0397$ — нормальные напряжения сдвига в киле тороса [2];

H_{keel} — глубина кия тороса, см. табл. 3;

V_{ice} — расчетная скорость взаимодействия ДРК с килем тороса, м/с.

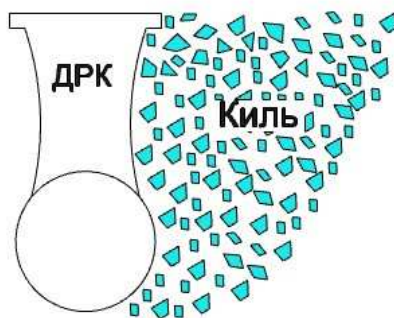


Рис. 14 Сценарий поперечного навала ДРК на киль тороса

7.9 Динамическое усиление глобальной ледовой нагрузки

Расчетная глобальная ледовая нагрузка на корпус ДРК от удара обломком льда с учетом динамического усиления определяется по формуле

$$F_{dyn} = k_{dyn} \cdot F_{ice}, \quad (32)$$

где F_{ice} — глобальная ледовая нагрузка на корпус ДРК от удара обломком льда, МН см. выше;
 k_{dyn} — коэффициент динамического усиления, определяется как

$$k_{dyn} = 1 / \left(1 - \frac{1}{4\pi^2 f^2 \Delta t^2} \right), \quad (33)$$

где f — собственная частота колебаний ДРК в составе корпуса, Гц;
 Δt — время воздействия ударной ледовой нагрузки, с, определяется как

$$\Delta t = \frac{l}{0,5 V_{ice}}, \quad (34)$$

где l — характерное внедрение обломка льда в элемент ДРК, м, определяется в разделах 7.1 — 7.5;
 V_{ice} — скорость взаимодействия ДРК со льдом, м/с.

Собственная частота колебаний f устанавливается проектантом судна на базе частотного анализа. С этой целью предпочтительно использование современных признанных (одобренных) программных продуктов, например пакета ANSYS. При собственной частоте колебания ДРК не более 10 Гц коэффициент динамического усиления принимается равным 1,2.

Для глобальной ледовой нагрузки от тороса и от прорезания учет динамического усиления не требуется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для конвенционных ледокольных судов и судов двойного действия (DAS) классов **Arc4** — **Arc9** рассмотрены операционные условия, включая характерные районы эксплуатации, определены расчетные режимы движения в ледовых условиях. Для каждого из классов **Arc4** — **Arc9** назначены расчетные значения набитого льда в канале и разработана методика определения расчетных скоростей для конвенционных ледокольных судов и судов DAS с учетом формы корпуса, компоновки и мощности пропульсивного комплекса.

Составлены сценарии взаимодействия элементов тянущей и толкающей ДРК, а также толкающей ДРК с насадкой со льдом для назначения глобальной ледовой нагрузки.

Для каждого из классов **Arc4** — **Arc9** выполнено определение расчетных параметров льда (морфологических и прочностных характеристик ледовых образований) для назначения глобальной ледовой нагрузки на ДРК.

На рис. 15 — 18 представлены сравнения результатов расчета для традиционного (конвенционного) судна класса **Arc5**, а также для крупнотоннажного судна класса **Arc7**. Расчеты выполнены по разработанному проекту нормативного документа, действующим правилам РС [10.7.6.5 части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС], TRAFI [31] к судам балтийских ледовых классов и DNV [31].

В настоящее время не существует четкой эквивалентности между классами РС, DNV, TRAFI. С учетом рекомендаций нормативного документа РС [32], расчет ледовых нагрузок для класса **Arc5** по правилам DNV выполнен для классов **PC5** и **PC6**, по TRAFI для класса **IA Super**, см. рис. 15 и 16, а для класса **Arc7** по правилам DNV выполнен для классов **PC2** и **PC3**, см. рис. 17 и 18.

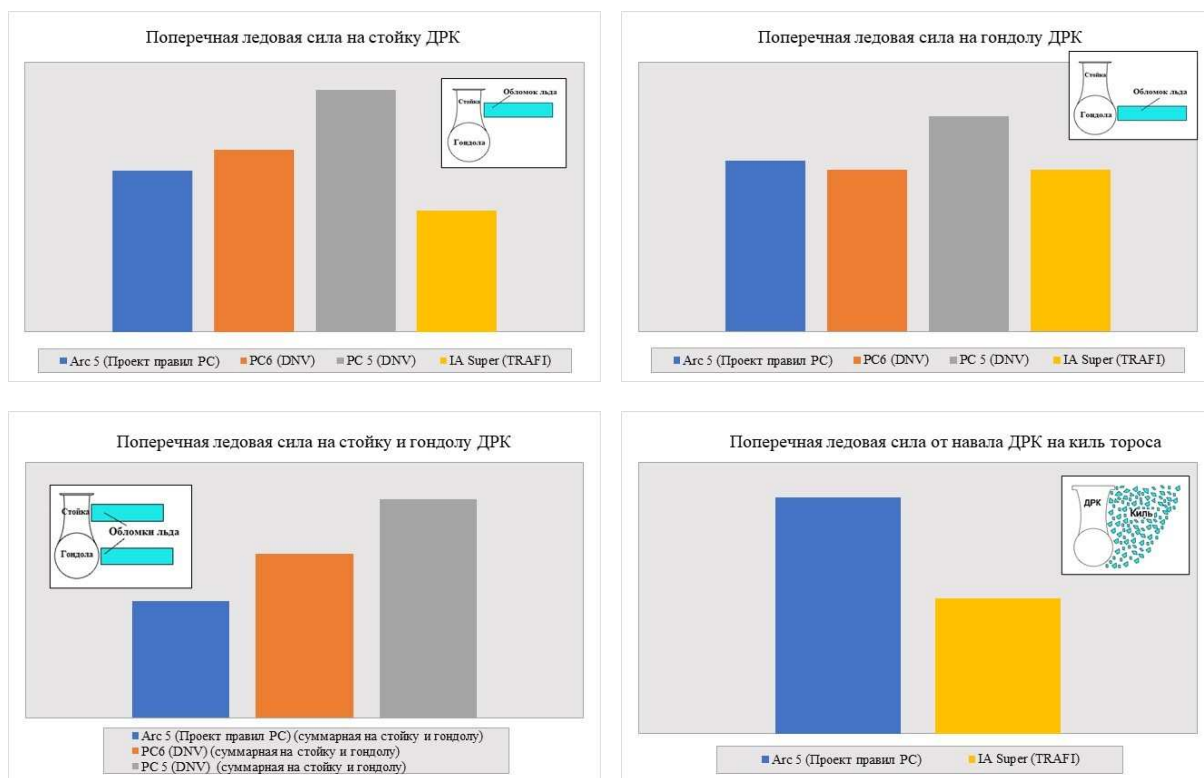


Рис. 15 Поперечные ледовые силы на ДРК ледокольного судна класса Arc5

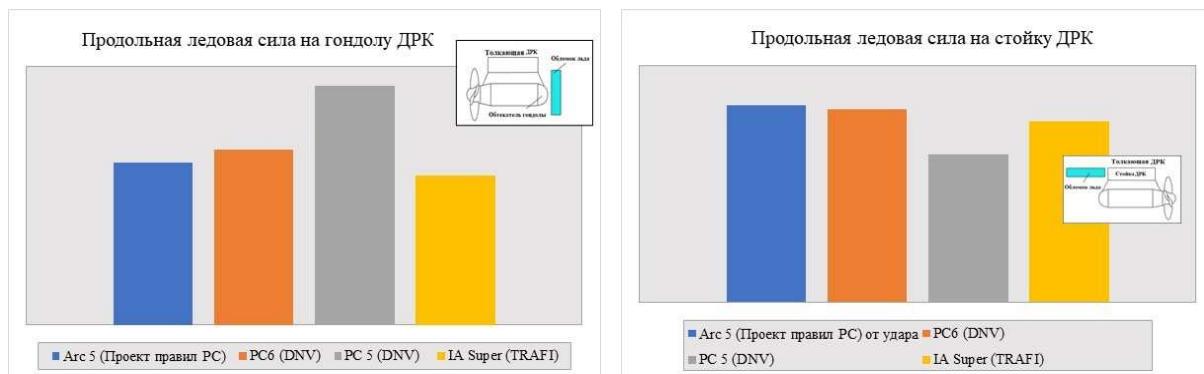
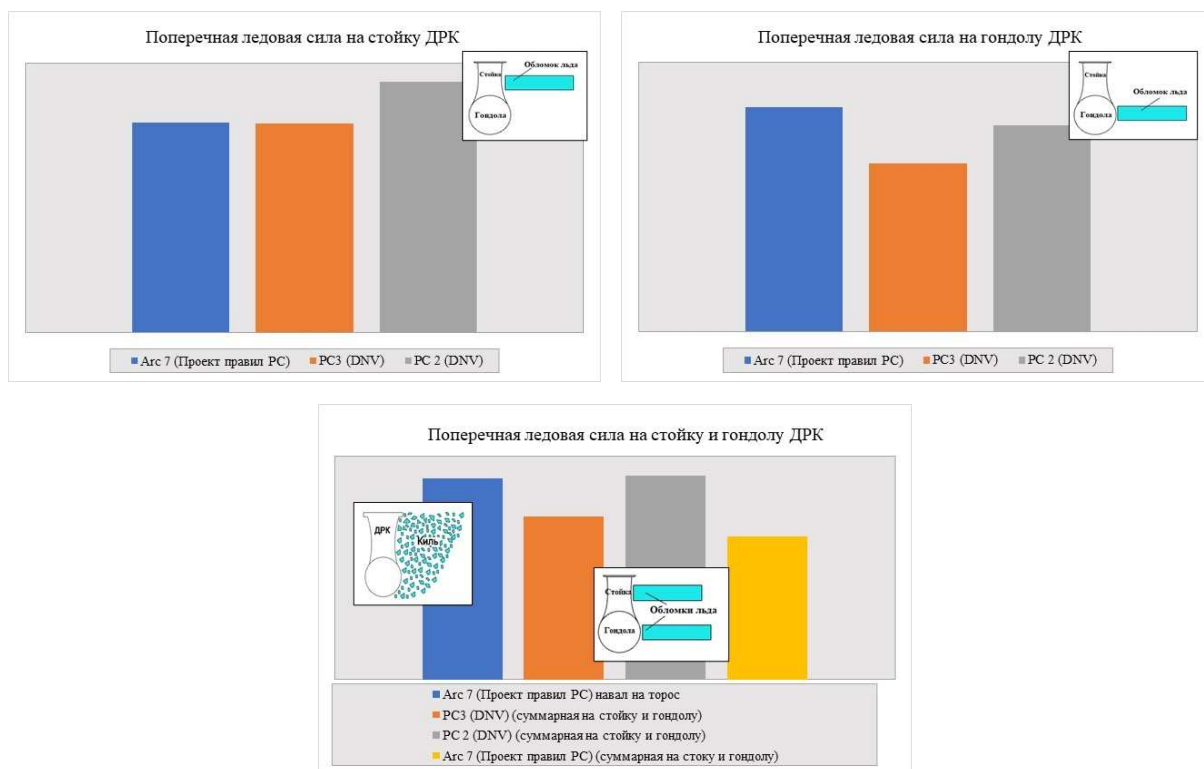
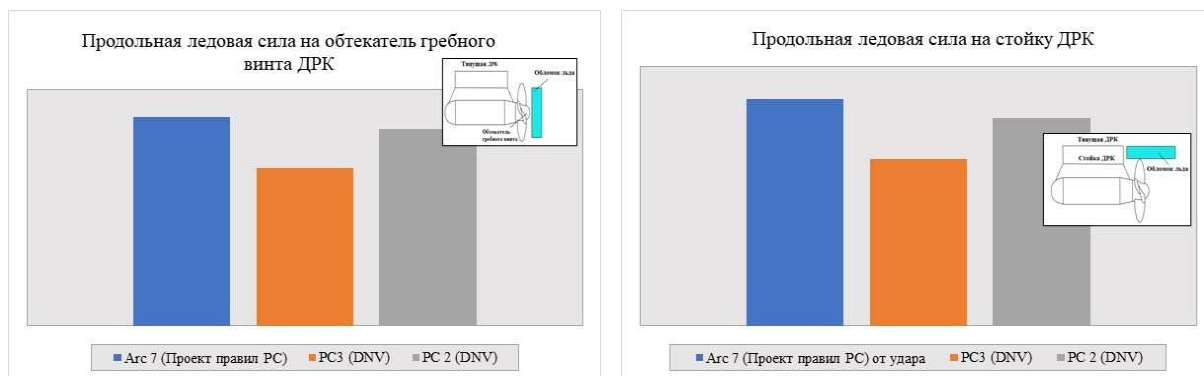


Рис. 16 Продольные ледовые силы на ДРК ледокольного судна класса Arc5

Рис. 17 Поперечные ледовые силы на ДПК ледокольного судна класса **Arc7**Рис. 18 Продольные ледовые силы на ДПК ледокольного судна класса **Arc7**

Анализ показывает, что расчетные значения глобальных ледовых нагрузок на ДПК по проектному нормативному документу достаточно хорошо коррелируются с величинами глобальных ледовых нагрузок по Правилам DNV и TRAFI.

Однако по результатам анализа, см. рис. 15 — 18, необходимо сделать следующие комментарии в части Правил DNV и TRAFI.

1. Суда класса **Arc5** предназначены для эксплуатации в замерзающих неарктических морях, а также на трассах СМП в летне-осеннюю и зимне-весеннюю навигации. Допустимая толщина ровного льда в летне-осеннюю навигацию составляет около ~1,3 м, что превышает соответствующую величину для судов классов **Arc5** и **IA Super** в зимне-весеннюю навигацию (1 м). Последнее обуславливает увеличение глубины киля тороса и нагрузки от навала ДПК на киль тороса для судов класса **Arc5** в сравнении с классом **IA Super**.

2. Правила TRAFI не рассматривают возможность реализации одновременных поперечных ударов обломков льда в гондолу и стойку ДРК, что приводит к уменьшению суммарной поперечной ледовой силы. Напротив, в Правилах DNV-GL сложение максимальных поперечных ледовых сил выполняется без учета редукционного коэффициента, обусловленного неодновременностью реализации максимальных глобальных ледовых сил на гондолу и стойку ДРК.

3. Необходимо отметить, что в отличие от проекта нормативного документа РС методика правил DNV-GL, не учитывает влияние скорости судна на величину глобальной ледовой нагрузки, что может привести к ее занижению или завышению.

Например, характеристики ледовой ходкости крупнотоннажного LNGC "Yamalmax" (тип «Кристоф де Маржери») класса **Arc7** значительно превосходят соответствующие для всех судов класса **Arc7**, эксплуатировавшихся до настоящего времени и эксплуатирующихся сейчас. Ледопроездимость LNGC "Yamalmax" (тип «Кристоф де Маржери») и операционные скорости на режимах заднего хода сопоставимы с соответствующими для ледоколов типа Арктика, проект 1052, и современных ледоколов «Виктор Черномырдин» класса **Icebreaker 8**. Операционные скорости значительно превосходят таковые для ранее спроектированных арктических судов классов **Arc6 — Arc7, PC4 — PC3** (танкеров типа «Михаил Ульянов», контейнеровозов типа «Норильский Никель», на базе которых выполнялась разработка Правил DNV-GL при активном участии специалистов фирмы ABB).

В части ледовых операционных возможностей на режимах заднего хода LNGC "Yamalmax" (тип «Кристоф де Маржери») практически соответствует судам класса **Arc8 (PC2)** и арктическим ледоколам класса **Icebreaker 8**.

Недооценка значений операционных скоростей приводит к занижению расчетных глобальных ледовых нагрузок на ДРК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dobrodeev A., Sazonov K., Andryushin A., Fedoseev S., Gavrilov S. Experimental studies of ice loads on pod propulsors of ice-going support ships. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 24. Sep. "POAC 2017 — Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions", 2017.
2. Palmer A., Croasdale Ken. Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2013.
3. Strub-Klien L., Sudom D. A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges — Cold Regions Science and Technology 82:94–109, October 2012.
4. Сборник нормативно-методических материалов. Книга двадцать пятая. Российский морской регистр судоходства, 2017.
5. Weeks W.F. On sea ice. University of Alaska Press, 2010.
6. Hoyland K.V. Consolidation of first-year sea ice ridge. Journal of Geophysical Research. 2002.
7. Frederking R. Plane strain compressive strength of columnar-Grained and Granular-Snow ice. Journal of Glaciology, Vol. 18, № 80, 1977.
8. Rihter J.A. and Cox G.F.N. Confined compression strength of multi-year pressure ridge sea ice Samples. O Energy Resources Technol, 1986.
9. Ледяные образования морей Западной Арктики — ААНИИ, под общей редакцией д-ра геогр. наук Г.К. Зубакина, 2006.
10. Heinonen J. Constitutive modeling of ice Rubble in First-Year Ridge Keel — VTT Publications 536, ESPOO 2004.
11. Sailing Directions of Ob Bay No. 1116, Headquarters of Navigation and Oceanography. 1993.
12. Andryushin A., Zuev P., Kuteinikov M., Grigoryeva O., Bolshev A., Frolov S. Determination of ice loads acting on bow and stern of modern ice ships and icebreakers. Proceeding of twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 26 — July 1, 2016.
13. Андриюшин А.В., Зув П.С., Кутейников М.А., Григорьева О.А., Большев А.С., Фролов С.А. Ледовые нагрузки на суда, форма корпуса которых отличается от регламентируемых правилами РС — Морской Вестник, специальный выпуск №1 (13) май 2017.
14. Алексеев Ю.Н., Сазонов К.Е., Шахаева Л.М. Оценка составляющей полного ледового сопротивления, зависящей от разрушения льда. Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов, № 32, 1982. с. 69 — 73.
15. Сазонов К.Е. Исследование динамического разрушения ледового покрова — Судостроительная промышленность, Проектирование судов, выпуск 19, 1991.
16. Евенко В.И., Сергеев А.А., Андриюшин А.В., Тарица Г.В., Щербаков И.В., Беляшов В.А. Современные методы развития двигательных комплексов судов ледового плавания. Ледовые нагрузки. Научно-технический сборник РС 32, Санкт-Петербург, 2009.
17. Andryushin A.V., Hänninen S., Heideman T. . Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions — 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 13), Helsinki, Espoo, Finland, June 9 — 10, 2013, pp. 223 — 227.
18. Андриюшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 05.08.01 — Теория корабля и строительная механика // Санкт-Петербург, СПбГМТУ. 2000. 254 с.
19. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика, 1976, Т. X2, Вып. 10.
20. Soinenen H. A propeller-ice contact model. Dissertation for the degree of Doctor of Technology. VTT technical research centre of Finland. Espoo. 1988, p. 116.
21. Daley C.G. Ice Edge Contact-A Brittle Failure Process Model. Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series No. 100, Helsinki 1991, 92 pp.

22. Cabrera I.M. Numerical Modeling of Brash Ice — EMSHIP week presentation, University of Rostoc, Feb. 2017.
23. Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S. Physical properties and comparison of First and Second Year Sea Ridges-Proceedings of Poac-09, Lulea, Sweden 2009.
24. Joensuu A., Riska K., Contact Between Ice and Structure Helsinki University of Technology, Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Report M-88, Otaniemi, 1988.
25. Varsta P. On the mechanics of ice load on ships in level ice in the Baltic Sea, Thesis for degree of Doctor of Technology, Technical Research Centre of Finland, Publications 11, Espoo, Finland. 1983.
26. Daley C., Riska K. Conceptual Framework for an Ice Load Model-National Energy Board.
27. Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б., Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Санкт-Петербург. Российский морской регистр судоходства. Науч.-техн. сб.— 2002. Вып. 25. с. 83 — 100.
28. Край П. Влияние ширины конструкции на проектные ледовые нагрузки. Физика и механика льда, № 30, 1983.
29. Sudom D., Timco G., Sand B., Fransson L. Analysis of First-Year and Old Ice Ridge Characteristics Proceeding of Poac-11, Montreal, Canada 2011.
30. Ice Class Regulations and the Application Thereof. Finnish Transport Safety Agency. TRAFI/494131/03.04.01.00/2016, 2017, 65 p.
31. Ice strengthening of propulsion machinery and hull appendages. Class Guideline.DNVGL CG 0041, DNV GL, 2020, 96 p.
32. Международная Ассоциация Классификационных обществ. Символика Классификации судов. Справочник. Российский морской регистр судоходства, 2008.

REFERENCES

1. Dobrodeev A., Sazonov K., Andryushin A., Fedoseev S., Gavrilov S. Experimental studies of ice loads on pod propulsors of ice-going support ships, Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 24. Сер. "POAC 2017 — Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions", 2017.
2. Palmer A., Croasdale Ken. Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2013.
3. Strub-Klien L., Sudom D. A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges — Cold Regions Science and Technology 82: pp. 94 — 109, October 2012.
4. Collection of normative documents. Book 25, Russian Maritime Register of Shipping, 2017.
5. Weeks W.F. On sea ice. University of Alaska Press, 2010.
6. Hoyland K.V. Consolidation of first-year sea ice ridge. Journal of Geophysical Research. 2002.
7. Frederking R. Plane strain compressive strength of columnar-Grained and Granular-Snow ice. Journal of Glaciology, Vol. 18, No. 80, 1977.
8. Rihter J.A. and Cox G.F.N. Confined compression strength of multi-year pressure ridge sea ice Samples. O Energy Resources Technol, 1986.
9. *Ledyanye obrazovaniya morey Zapadnoy Arktiki* [Ice formations of the western part of the Arctic]. Ed. by Zubakin G.K., DSc, 2006.
10. Heinonen J. Constitutive modeling of ice Rubble in First-Year Ridge Keel — VTT Publications 536, ESPOO 2004.
11. Sailing Directions of Ob Bay No. 1116, Headquarters of Navigation and Oceanography. 1993.
12. Andryushin A., Zuev P., Kuteinikov M., Grigoryeva O., Bolshev A., Frolov S. Determination of ice loads acting on bow and stern of modern ice ships and icebreakers. Proceeding of twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 26 — July 1, 2016.
13. Andryushin A., Zuev P., Kuteinikov M., Grigorjeva O., Bolshev A., Frolov S. *Ledovye nagruzki na suda, forma korpusa kotorykh otlichaetsya ot reglamentiruemykh pravilami RS* [Ice loads on the ships with hull forms differing from the regulated by RS Rules]. Morskoi Vestnik, special edition No.1 (13) May 2017.
14. Alekseev Y.N., Sazonov K.E., Shakhayeva L.M. *Otsenka sostavlyayushey polnogo ledovogo soprotivleniya, zavisyashey ot razrusheniya lda* [Estimation of Total Ice Resistance Component, Which Depends on Ice Crushing]. Problems of Shipbuilding, Ship Design Series, No. 32, 1982. pp. 69 — 73.
15. Sazonov K.E. *Issledovanie dinamicheskogo razrusheniya ledovogo pokrova* [Investigation on ice sheet dynamic crushing]. Sudostroitel'naya Promishlennost, Proektirovanie sudov series. Edition 19, 1991.
16. Evenko V.I., Sergeev A.A., Andryushin A.V., Taritsa G.V., Shcherbakov I.V., Belyashov V.A. *Sovremennyye metody razvitiya dvigatelnykh kompleksov sudov ledovogo plavaniya. Ledovye nagruzki* [The modern methods of ice ships propulsion complexes development. Ice loads]. Research Bulletin of Russian Maritime Register of Shipping No. 32, Saint-Petersburg, 2009.
17. Andryushin A.V., Hänninen S., Heideman T. "Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions — 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 13), Helsinki, Espoo, Finland, June 9 — 10, 2013, pp. 223 — 227.
18. Andryushin A.V. *Teoriya vzaimodeystviya grebnogo vinta so ldom. Obespechenie ekspluatatsionnoy prochnosti elementov propulsivnogo kompleksa sudov ledovogo plavaniya i ledokolov* [Propeller/ice interaction theory. Operational strength assurance of the elements of propulsion complex of ice ships and icebreakers]. Thesis for the doctor of technical science degree for specialization 05.08.01 — Ship theory and structural mechanics. St Petersburg, St. Petersburg State Marine Technical University, 2000. p. 254.
19. Kurdjumov V., Kheisin D. *Gidrodinamicheskaya model udara tverdogo tela o led* [Hydrodynamic model of a solid body impact with ice]. Prikladnaya Mekhanika, Volume XII, No. 10, 1976.
20. Soininen H. A propeller-ice contact model. Dissertation for the degree of Doctor of Technology. VTT technical research centre of Finland. Espoo. 1988, p. 116.
21. Daley C.G. Ice Edge Contact-A Brittle Failure Process Model. Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series No. 100, Helsinki 1991, 92 p.
22. Cabrera I. M. Numerical Modeling of Brash Ice — EMSHIP week presentation, University of Rostoc, Feb. 2017.
23. Strub-Klein L., Barrault S., Goodwin H., Gerland S. Physical properties and comparison of First and Second Year Sea Ridges — Proceedings of Poac-09, Lulea, Sweden 2009.
24. Joensuu A., Riska K. Contact Between Ice and Structure Helsinki University of Technology, Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Report M-88, Otaniemi, 1988.
25. Varsta P. On the mechanics of ice load on ships in level ice in the Baltic Sea, Thesis for degree of Doctor of Technology, Technical Research Centre of Finland, Publications 11, Espoo, Finland. 1983.

26. Daley C., Riska K. Conceptual Framework for an Ice Load Model-National Energy Board.
27. Appolonov E.M, Didkovskii A.V., Kuteinikov M.A., Nesterov A.B. *Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya ledovykh nagruzok* [Improvement of ice loads estimation methodology]. St. Petersburg. Research Bulletin of Russian Maritime Register of Shipping. Volume 25, pp. 83 — 100.
28. Kray P. *Vliyaniye shiriny konstruktssii na proektnye ledovye nagruzki* [Influence of the width of the structure on the design ice loads]. Ice physics and mechanics. No. 30, 1983.
29. Sudom D., Timco G., Sand B., Fransson L. Analysis of First-Year and Old Ice Ridge Characteristics Proceeding of Poac-11, Montreal, Canada 2011.
30. Ice Class Regulations and the Application Thereof. Finnish Transport Safety Agency. TRAFI/494131/03.04.01.00/2016, 2017, 65 p.
31. Ice strengthening of propulsion machinery and hull appendages. Class Guideline.DNVGL CG 0041, DNV GL, 2020, 96 p.
32. International Association of Classification Societies. Symbols of the classification of ships, Directory. Russian Maritime Register of Shipping, 2008. (In Russian)

УДК 629.5.02:624.042.43

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АКТИВНОЙ ПРОТИВОЛЕДОВОЙ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.П. Аносов, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: anosov49@mail.ru

Н.И. Восковщук, канд. техн. наук, профессор, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: nvoskov@mail.ru

Значительная часть месторождений нефти и газа расположена в шельфовых зонах замерзающих морей, и их разработка предполагает использование стационарных буровых и добывающих платформ, которые круглогодично или в течение нескольких месяцев в году нуждаются в противоледовой защите. Значительная часть защитных устройств представлена устройствами пассивной конструктивной защиты. Наиболее эффективные, активные методы защиты предполагают превентивное разрушение ледяного покрова. Описано защищенное патентом устройство для активной противоледовой защиты морских нефтегазовых сооружений. Приведены результаты исследования влияния конструктивных особенностей этого устройства на его эффективность: показано, что оптимальный с точки зрения эффективности устройства угол наклона образующих его конической части составляет приблизительно 50°. Обоснована установка на конической части устройства ребер, служащих для образования надрезов на кромке льда, снижающих сопротивление льда формированию хрупких трещин. Показана возможность замены гладкой конической части устройства ступенчатым конусом.

Ключевые слова: *противоледовая защита буровых платформ, устройства для активной защиты, конструкция устройств для активной защиты, эффективность устройств для активной защиты*

ACTIVE ICE PROTECTION OF OFFSHORE OIL AND GAS FACILITIES

A.P. Anosov, DSc, professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: anosov49@mail.ru

N.I. Voskovschuk, PhD, professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: nvoskov@mail.ru

A significant part of the oil and gas fields are located in the offshore zones of the freezing seas, and their development involves the use of fixed drilling platforms that need ice protection either all year round or for several months of the year. A significant part of the protective devices is represented by passive structural protection. The most effective, active methods of protection involve the preventive destruction of the ice cover. The article describes a patent-protected device for active ice protection of offshore oil and gas facilities, presenting the results of the study of the influence of the design features of the device on its efficiency: It has been shown that the optimal angle of inclination of the conical parts from the point of view of the effectiveness of the device is approximately 50°. The installation of plates on the conical part of the device providing the formation of incisions on the edge of the ice, which reduce the resistance of the ice to the formation of brittle cracks, has been justified. The possibility of replacing the smooth conical part of the device with a stepped cone has also been demonstrated.

Keywords: *anti-ice protection of drilling platforms, devices for active protection, design of devices for active protection, the effectiveness of devices for active protection*

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть месторождений нефти и газа на территории РФ расположена в шельфовых зонах замерзающих морей (северо-восток о. Сахалин и арктическое побережье), и их разработка предполагает использование стационарных буровых и добывающих платформ, которые круглогодично или в течение нескольких месяцев в году нуждаются в противоледовой защите.

Значительная часть защитных устройств представлена устройствами пассивной конструктивной защиты. Используются стационарные бандажи различной формы и конструкции, которые устанавливаются на опорные колонны сооружений в районе переменных ватерлиний, либо делаются ограждающие конструкции вокруг буровой платформы.

При активных методах защиты, предполагающих превентивное разрушение ледяного покрова, лед первоначально взаимодействует со специальными устройствами на защищаемом сооружении, а затем уже вступает в контакт с сооружением [1, 3]. При этом значения нагрузки ото льда на сооружение уменьшаются, и изменяется характер воздействия льда.

В работе [5] в числе прочих рассмотрено разработанное норвежскими специалистами устройство, в котором на колоннах буровой платформы размещены подвижные по вертикали ледакольные бандажи (см. рис. 1).

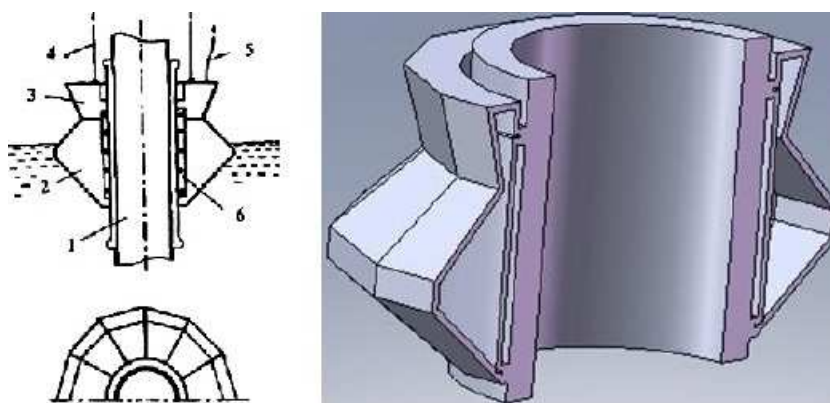


Рис. 1 Схема вертикально перемещающегося бандажа на колонне платформы [5]:
1 — колонна; 2 — балластные отсеки; 3 — отсеки с насосами и нагревателями воды; 4 — подъемные тросы;
5 — силовой кабель; 6 — опорное подшипниковое устройство

Каждый бандаж подвешивается на тросах лебедок, установленных на верхнем строении платформы, и может перемещаться по вертикали. Наружные поверхности бандажа наклонные, так что лед может разрушаться при движении бандажа и вверх, и вниз. Он имеет значительную массу и при опускании вниз разрушает лед силой своей тяжести. Кроме лебедок, обеспечивающих перемещение бандажа, в его нижней части устроены балластные отсеки, заполняемые при необходимости подогретой водой. В нерабочем положении бандажи поднимают к верхнему строению платформы, где они находятся вне воздействия льда и волн.

Описанное устройство обладает рядом недостатков.

1. Прежде всего, это сложность: нормальная эксплуатация устройства обеспечивается рядом дополнительных механизмов и приспособлений, требующих больших энергетических затрат (подъем, подогрев, балластировка).

2. Для разрушения льда под действием силы веса подвижные бандажи должны иметь значительную массу, следствием чего является необходимость в мощных грузоподъемных устройствах.

3. Наличие массивных бандажей играет двоякую роль. Увеличивая массу сооружения, они повышают ее устойчивость на грунте при воздействии ветра и волн. Однако в силу того, что в нерабочем положении бандажи подняты к верхнему строению платформы, повышается положение центра тяжести сооружения, что оказывает отрицательное влияние в рассматриваемом аспекте.

КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

С целью обеспечения разрушения льда подвижным бандажем при минимальных затратах энергии, упрощения обслуживающих устройств и устранения прочих недостатков было разработано и запатентовано [6] устройство для разрушения льда (далее УРЛ), в котором использованы два технических решения, применяемых на подводных лодках.

1. Для погружения и всплытия подводных лодок используются балластные цистерны, представляющие собой замкнутые сверху, но открытые снизу емкости с воздушными клапанами в верхней части.

2. Значительная часть подводных лодок работает в акватории полярных морей. С учетом ледового покрова верхние строения подводных лодок (надстройка и ограждение прочной рубки) снабжены ледовыми усилениями, достаточными для взламывания льда при всплытии лодки на поверхность.

Основным элементом УРЛ является бандаж, который размещен на колонне с возможностью вертикального перемещения (см. рис. 2).

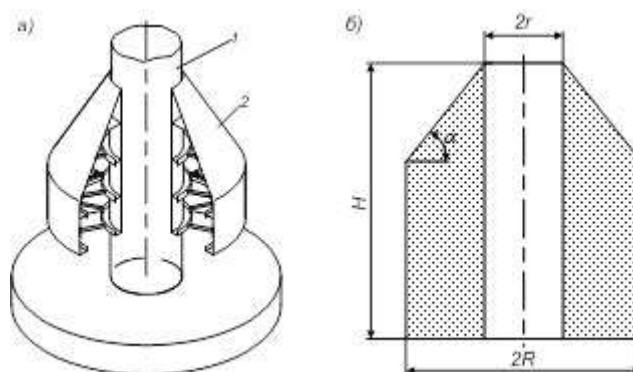


Рис. 2 Конструкция устройства для разрушения льда [6] (а) и его характерные размеры (б):
1 — колонна платформы; 2 — подвижный бандаж

Бандаж представляет собой открытую снизу емкость, ограниченную внутренней цилиндрической оболочкой и соединенной с ней в верхней части внешней оболочкой, представляющей собой сопряженные усеченный конус и цилиндр. Его максимальный водоизмещающий объем за вычетом объема элементов набора определяется зависимостью (см. рис. 2, б)

$$V = \pi(R - r) \times \left[H(R + r) - \frac{(2R + r) \times (R - r)}{3} \operatorname{tg} \alpha \right].$$

Оболочка состоит из обшивки, подкрепленной с внутренней стороны набором. Толщина обшивки и размеры балок набора определяются расчетом из условия обеспечения прочности при восприятии ледовых и гидростатических нагрузок. В верхней части УРЛ снабжено воздушными клапанами. На колонне смонтированы упоры для опирания УРЛ в его нижнем нерабочем положении, а также штуцеры для подачи воздуха. Подача воздуха осуществляется непосредственно от компрессора или из баллонов со сжатым воздухом.

УРЛ работает следующим образом (см. рис. 3). В нерабочем положении (фаза I) оно находится под водой, стоящим на упорах на минимальной глубине, исключающей контакт с ледовым покровом и волновые воздействия. При необходимости разрушения льда вокруг опорной колонны при закрытых воздушных клапанах через штуцеры подается воздух, который заполняет полость УРЛ, вытесняя воду. Когда весовое водоизмещение становится больше веса УРЛ, оно начинает всплывать и упирается верхней частью конической поверхности в ледовый покров (фаза II). При дальнейшем заполнении полости УРЛ воздухом появляется избыточная плавучесть. Когда сила, с которой УРЛ давит на лед, достигает величины, достаточной для его взламывания, начинается процесс разрушения ледового покрова (фаза III). Этот процесс продолжается до тех пор, пока не образуется полынья, соответствующая диаметру цилиндрической части УРЛ (фаза IV). После этого прекращается подача воздуха, открываются воздушные клапаны, полость УРЛ самотеком заполняется водой, вытесняя воздух, и оно погружается в исходное положение, становясь на упоры (фаза V). При необходимости весь процесс повторяется.

Основное преимущество предлагаемого технического решения состоит в том, что процесс разрушения льда вокруг опорной колонны осуществляется при минимальных затратах энергии, обеспечивающих работу воздушного компрессора. При этом не требуется сложное грузоподъемное и иное оборудование. Кроме того, УРЛ обладает относительно небольшой массой и стационарно располагается в нижней части сооружения в подводном положении, не приводя к увеличению положения его центра тяжести по высоте и не подвергаясь волновым воздействиям.

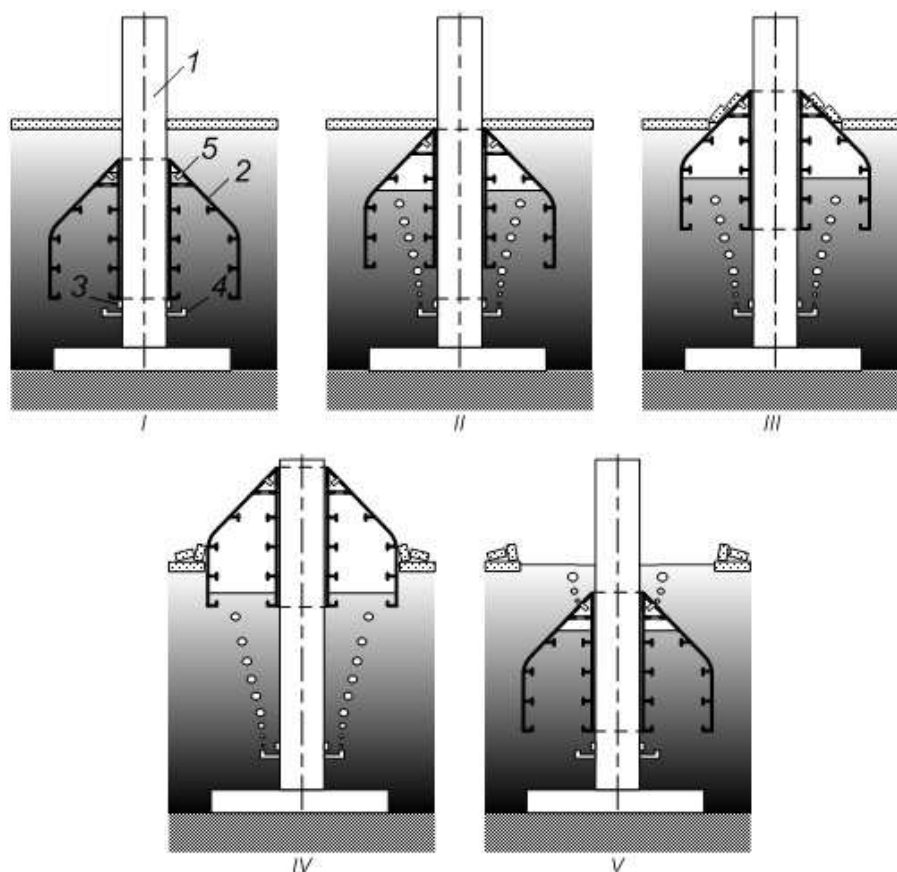


Рис. 3 Принцип действия УРЛ [6]:

1 — колонна платформы; 2 — подвижный бандаж; 3 — упор; 4 — штуцер для подачи воздуха; 5 — воздушный клапан

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УРЛ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЛЬДА

Был выполнен расчетный анализ влияния ряда конструктивных особенностей УРЛ на его эффективность, подробное изложение результатов которого ограничено объемом статьи. Поэтому далее приведены лишь самые общие соображения в этом контексте.

Направления исследования.

Расчетный анализ выполнялся в трех взаимосвязанных направлениях.

1. Исследование процесса всплытия УРЛ с учетом сил, возникающих от его контакта со льдом при взламывании ледяного покрова; определение необходимого водоизмещающего объема и соотношения размеров расчетными методами гидростатики.

2. Исследование прочности корпуса УРЛ при его взаимодействии с разрушаемым ледяным полем в зависимости от его формы и размеров классическими методами строительной механики [4].

3. Исследование процесса разрушения ледяного поля с точки зрения определения разрушающих нагрузок, которые, в свою очередь, являются исходной информацией для первых двух направлений исследования.

Третье направление исследований базируется на механике разрушения и исследовании напряженно-деформированного состояния ледяного поля при усилиях, возникающих в результате взаимодействия с УРЛ. В общем случае задача сводится к расчету бесконечной ледяной пластины с круглым вырезом, удерживаемой на поверхности воды силой плавучести, при внедрении в вырез снизу вверх жесткого конического тела.

Для решения этой задачи применимы аналитические и численные методы анализа. Первые по понятным причинам предпочтительнее. Чтобы воспользоваться готовыми решениями [2], которые относятся к

пластинам конечных размеров, необходимо определить минимальный внешний радиус круговой пластины, дальнейшее увеличение которого с допустимой погрешностью не влияет на напряженное состояние в районе выреза.

При предварительном анализе моделирование ледяной пластины выполнялось в программном комплексе SolidWorks. На рис. 4 в цветовой интерпретации показано распределение напряжений в круговой пластине в районе круглого выреза. Видно, что радиус области «возмущения», соответствующий минимально допустимому радиусу пластины конечного размера, находится в пределах 10 — 12 радиусов выреза.

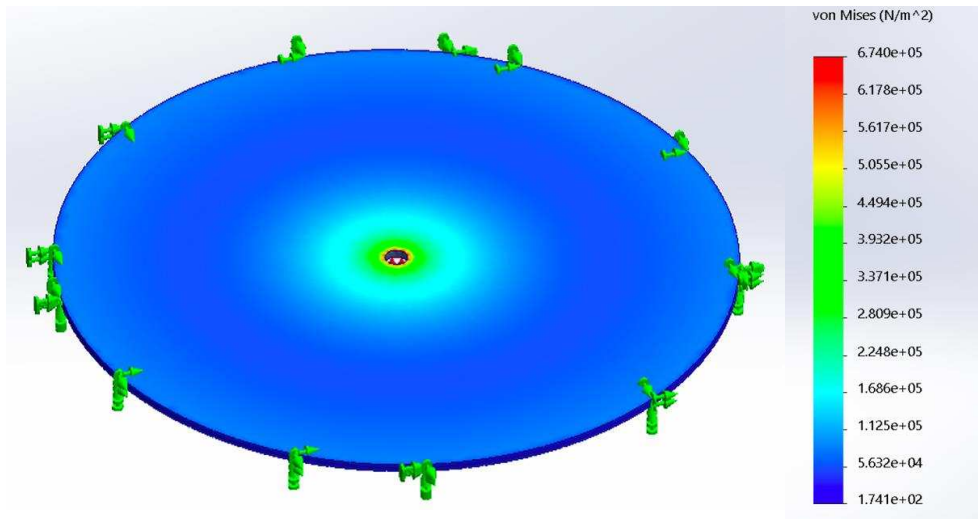


Рис. 4 Напряженное состояние круговой пластины с круглым вырезом при действии поперечной распределенной нагрузки на контуре выреза

Очевидно, что размер области «возмущения» зависит от относительной толщины пластины. Полученный график этой зависимости показан на рис. 5.

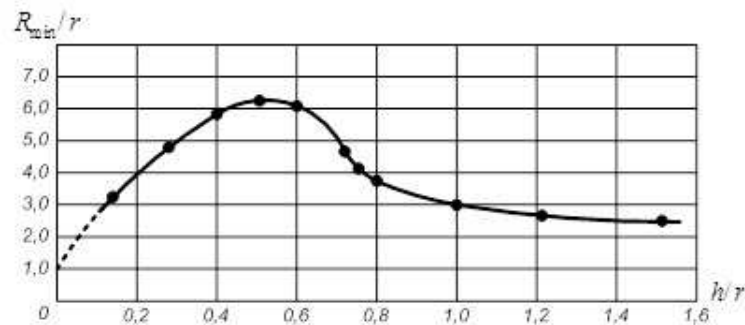


Рис. 5 Зависимость минимального радиуса пластины конечного размера от относительной толщины льда при разрушающей нагрузке:
 $R_{\min}$ — минимального радиуса пластины; h — толщина льда; r — радиус выреза

Можно констатировать, что часть кривой, соответствующая $h/(r > 0,2)$, при реальных размерах колонн платформ представляет чисто теоретический интерес. Действительно, при диаметре колонны 10 м соотношение, например, $h/(r = 0,4)$ соответствует толщине льда 2 м, что находится за пределом возможностей рассматриваемого УРЛ. Реальным размерам УРЛ соответствует участок кривой в диапазоне приблизительно $(0 < h)/(r < 0,3)$. Исходя из этого, минимально допустимый радиус расчетной пластины конечного размера должен быть не менее пяти радиусов выреза, т.е. $R_{\min}/(r \geq 5)$.

Однако при этом следует иметь в виду, что по мере внедрения конической части УРЛ в ледяное поле и ломке льда радиус выреза будет дискретно увеличиваться от радиуса сечения колонны до радиуса сечения цилиндрической части УРЛ. В связи с этим необходимо либо, сохраняя принятое соотношение наружного и

внутреннего радиуса рассчитываемой пластины, последовательно увеличивать наружный радиус, либо принять для всех этапов расчета его максимальную величину, равную пяти радиусам сечения цилиндрической части УРЛ.

При переходе от бесконечной пластины с вырезом к кольцевой пластине конечного размера, последнюю из условия непрерывности ледяного поля при расчетах следует считать жестко заделанной на внешнем контуре.

Проведенный анализ подтвердил возможность использования расчетных зависимостей для круглых пластин с вырезом, приведенных в [2].

Влияние угла наклона образующих конической части на усилия взаимодействия УРЛ со льдом

Картина разрушения ледяного поля имеет вид, показанный на рис. 6, а. Процесс взлома льда проходит в два этапа: на первом образуются радиальные трещины, которые делят ледяное поле на сегменты, представляющие собой консольные балки. Когда величина изгибающего момента у основания сегментов, определяемая длиной радиальных трещин, достигает предельной величины, возникают окружные трещины (начало второго этапа), сегменты отламываются у основания и образуется полынья, по форме близкая к круговой с диаметром, большим чем диаметр начального отверстия. При дальнейшем всплытии УРЛ процесс повторяется.

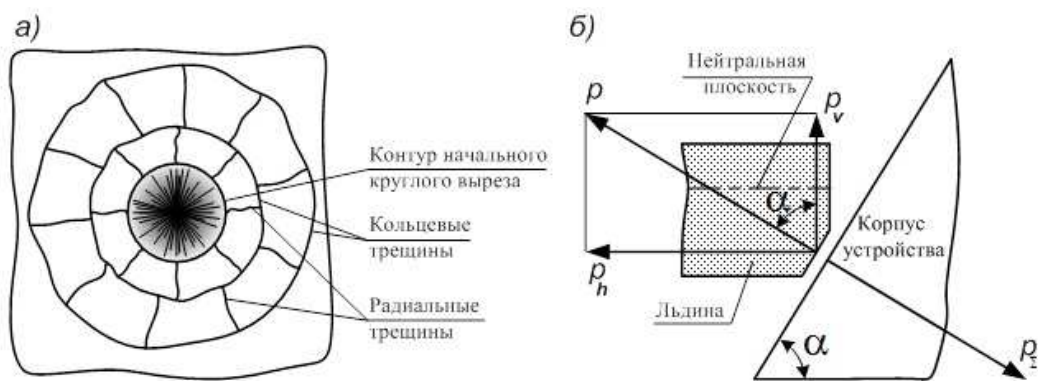


Рис. 6 Схема разрушения ледяного поля (а) и усилия взаимодействия конической части УРЛ со льдом (б)

Очевидно, что величина и соотношение усилий, возникающих при контакте конической поверхности УРЛ с кромкой выреза (см. рис. 6, б) зависит от угла α . Оптимальным является такой угол α , при котором разрушение льда происходит при минимальной силе взаимодействия p , которая, в свою очередь, является расчетной для корпуса УРЛ. Контактная распределенная по кромке выреза нагрузка делится на горизонтальную p_h (сжимающую) и вертикальную p_v (изгибающую) составляющие. Ясно, что при $\alpha=0$ сила $p_v=p$, а $p_h=0$, в то время как, при $\alpha \rightarrow 90^\circ$ сила $p_v \rightarrow 0$, а p_h возрастает до силы смятия льда.

В круговых сечениях образовавшихся сегментов ледяного поля возникает сложная комбинация напряжений (см. рис. 7), сочетание которых зависит от угла α и влияет на разрушающую способность УРЛ.

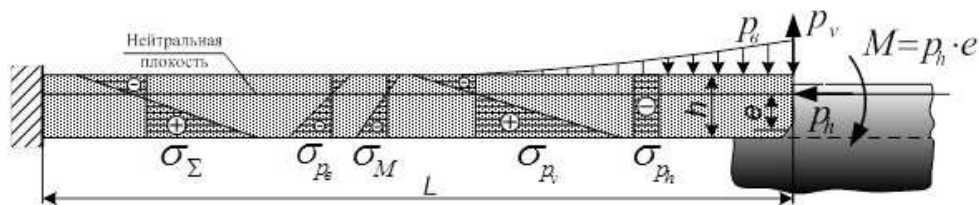


Рис. 7 Напряжения в кольцевых сечениях сегмента между двумя радиальными трещинами

Распределенная нагрузка p_v возникает от того, что при изгибе сегмента часть веса льда оказывается не уравновешенной силой поддержания воды.

При разрушении льда, как хрупкого материала, основная роль отводится растягивающим нормальным напряжениям. В данном случае это напряжения σ_{p_v} от изгиба сегмента силой p_v , а остальные напряжения — σ_{p_h} , σ_M и σ_{p_e} — с точки зрения разрушения льда играют отрицательную роль. Наиболее существенным из них является напряжение σ_{p_h} от сжатия сегмента силой p_h , которая при угле $\alpha \rightarrow 90^\circ$ резко возрастает и на определенном этапе может привести к тому, что суммарные напряжения в сечении сегмента окажутся сжимающими по всей толщине льда, т.е. разрушение льда станет возможно только за счет смятия. На рис. 8 приведены зависимости разрушающей лед нагрузки на корпус УРЛ в момент разрушения льда от угла α .

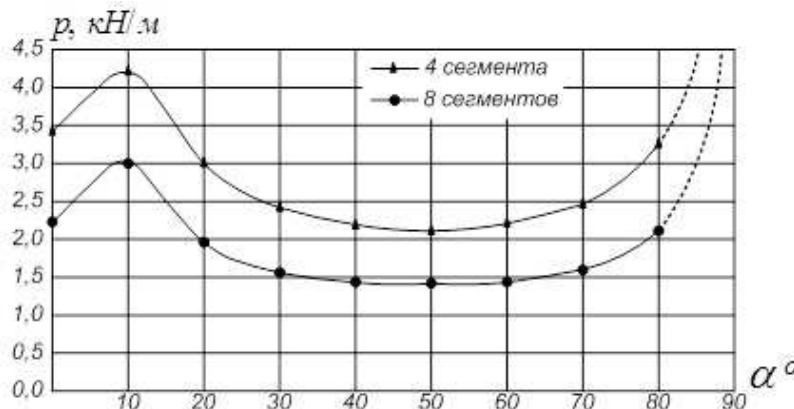


Рис. 8 Зависимость разрушающей лед нагрузки от угла α (см. рис 6, б) при радиусе отверстия в ледяном поле $r=1$ м и толщине льда $h=0,2$ м

Графики вне зависимости от числа радиальных трещин имеют минимум при угле наклона образующих конической части УРЛ $\alpha \approx 50^\circ$, который можно считать оптимальным, хотя сила p почти меняется при $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$.

Влияние внешнего оребрения конической части УРЛ

Параметром льда, который характеризует его трещиностойкость, является критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} (МПа $\sqrt{м}$), характеризующий напряжение, необходимое для роста трещины известного размера.

Лед обладает относительно низкой трещиностойкостью по сравнению с другими материалами (около 0,2 МПа $\sqrt{м}$). Для определения K_{Ic} в литературе [7] описаны испытания на изгиб образцов с надрезом. Надрезы делались в поперечном направлении на верхней, нижней и боковых поверхностях образцов.

Наименьшим значениям K_{Ic} соответствуют изгибаемые образцы с надрезами на их растянутой стороне. При внедрении конической части УРЛ в круглый вырез в ледяном покрове льдина выгибается вверх (см. рис. 9). При этом лед в районе выреза, оказывается, растянут окружными напряжениями. Наличие концентраторов напряжений в виде надрезов резко снижает нагрузку, соответствующую моменту появления радиальных трещин.

Для создания надрезов на кромке выреза во льду на конической поверхности УРЛ вдоль ее образующих могут быть установлены ребра с острой или пилообразной верхней кромкой (см. рис. 10).

Оптимальное количество ребер может быть определено из следующих соображений. При отсутствии оребрения число радиальных трещин, зависящее от соотношения диаметра выреза к толщине льда и от угла α , определяется минимумом работы внешних сил, затраченной на их образование. Поэтому число ребер должно соответствовать числу самопроизвольно появляющихся трещин при отсутствии ребер.

Процесс разрушения льда происходит поэтапно и является дискретным. Поэтому число дополнительных ребер должно определяться из этих же соображений при каждом следующем диаметре выреза.

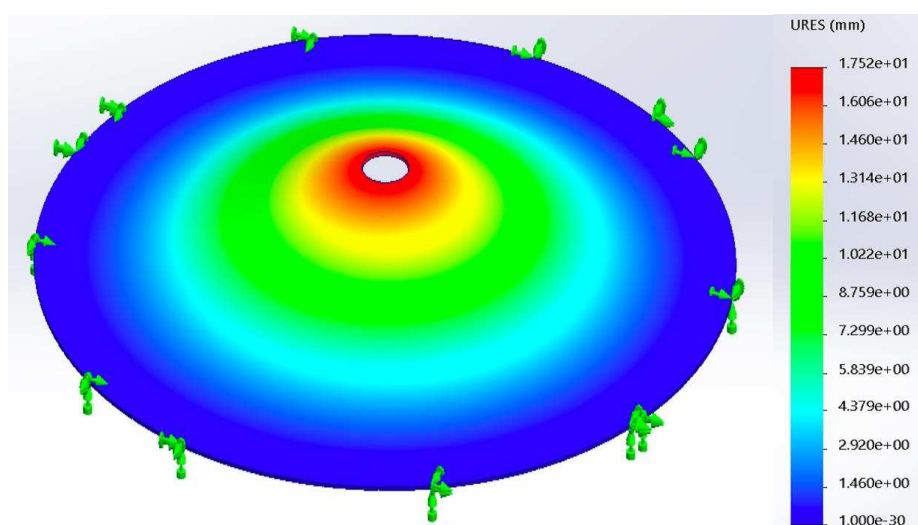


Рис. 9 Деформации ледяного поля

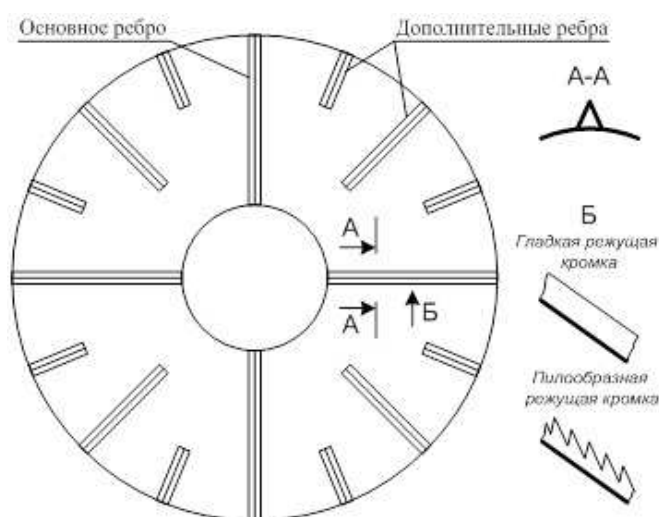


Рис. 10 Установка ребер на поверхности конической части УРЛ

Замена гладкого конуса ступенчатым

Если лед на кромке выреза опирается на горизонтальную поверхность ($\alpha=0$), то сила $p_v=p$, а $p_h=0$. С другой стороны, если исключить коническую часть УРЛ и выполнить его в виде цилиндра с плоской крышей, то необходимая для разрушения льда нагрузка резко возрастет и для ее создания потребуется очень большой запас плавучести, что приведет к увеличению размеров УРЛ. Решением этой проблемы может быть замена гладкого конуса ступенчатым (см. рис. 11).

Принцип действия данного варианта УРЛ очевиден из рисунка и не требует дополнительных пояснений. На рис. 12 приведены зависящие разрушающей нагрузки от толщины льда на обоих этапах процесса разрушения.

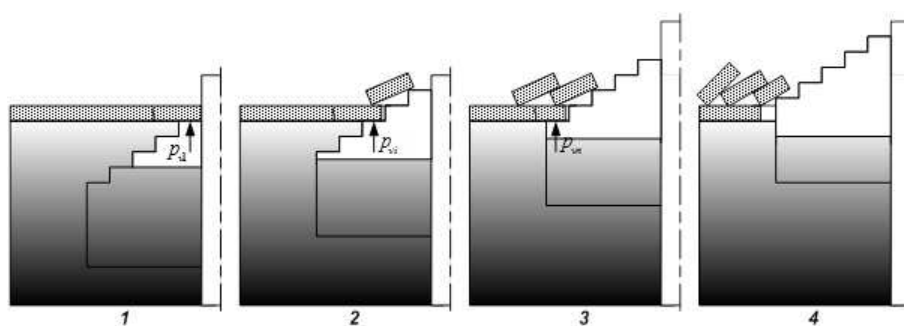


Рис. 11 Схема УРЛ со ступенчатой конической частью и принцип его действия

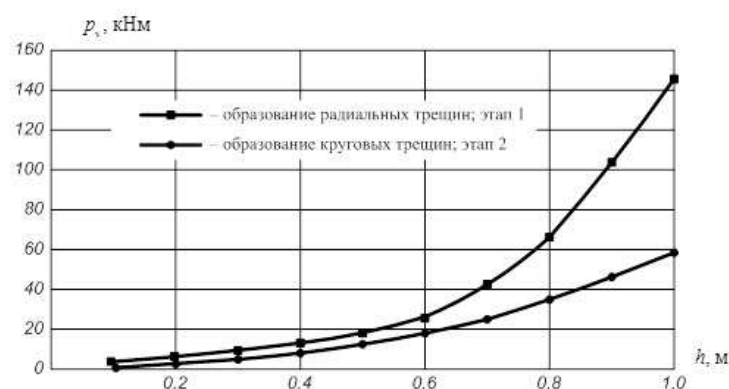


Рис. 12 Зависимость разрушающей нагрузки от толщины льда

Тот факт, что нагрузки, необходимые для развития радиальных трещин (этап 1), больше нагрузок, необходимых для образования круговых трещин (этап 2), означает, что процесс перехода этапа 1 в этап 2 будет происходить спонтанно: как только длины радиальных трещин обеспечат длины сегментов льдины между ними, которым соответствует предельный изгибающий момент, сегменты отломятся у основания. При этом УРЛ всплывет до опирания на край новой полыньи. При дальнейшей продувке балласта процесс разрушения будет повторяться вплоть до выхода из полыньи цилиндрической части УРЛ.

Выбор оптимальной ширины ступеней требует дополнительного исследования. Очевидно, что с ростом ширины увеличивается разрушающая нагрузка и соответственно расчетная нагрузка, действующая на корпус УРЛ. При слишком малой ширине ступени может происходить скалывание кромки льда, без реализации оговоренной выше схемы разрушения льда (см. рис. 6, а).

Как и в УРЛ с гладкой конической поверхностью, для снижения разрушающей нагрузки возможно использование оребрения ступеней для создания в льдине концентраторов напряжений в виде надрезов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описано устройство для активной ледовой защиты морских нефтегазовых сооружений. Приведены некоторые результаты исследования влияния конструктивных особенностей УРЛ на его эффективность.

1. Оптимальный с точки зрения эффективности УРЛ угол наклона образующих его конической части составляет приблизительно 50° .

2. Обоснована установка на конической поверхности УРЛ ребер, служащих для образования надрезов на кромке льда, снижающих критический коэффициент интенсивности напряжений, т.е. сопротивляемость льда образованию хрупких трещин.

3. Показана и обоснована возможность замены гладкой конической части УРЛ ступенчатым конусом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ю.Н. и др. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа/Ю.Н. Алексеев, В.П. Афанасьев, О.Е. Литонов, М.Н. Мансуров, В.В. Панов, П.А. Трусков. — СПб.: Гидрометиздат, 2001.
2. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. 2-е изд., перераб. и доп. Будівельник Киев, 1970.
3. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа/под ред. О.Е. Литонова и В.В. Панова. — СПб. Гидрометиздат, 2001.
4. Сивере Н.Л., Жесткое К.Г. Расчетное проектирование конструкций корпуса подводной лодки: учеб. пособие / СПбГМТУ; — СПб., 2009. 179 с.
5. Тарасов В.П., Иушин П.С. Примеры активной ледовой защиты морских нефтегазовых сооружений и новые разработки с использованием мягких надувных оболочек для разрушения льда. — (<https://cyberleninka.ru/.../primery-aktivnoy-ledovoy-zaschity-morskih-neftegazovyh->).
6. Устройство для защиты гидротехнических сооружений от воздействия льда/Патент на полезную модель №186054// А.П. Аносов, Н.И. Восковщук. — БИ № 36, 27.12.2018.
7. Karulina M. Theoretical and experimental investigations of level ice interaction with four-legged structures/M. Karulina, K. Shkhinek, G. Thomas; Proc. 21st Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic cond., POAC 11, 2011.

REFERENCES

1. Alekseyev Y.N. et al. *Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniya morskikh sooruzheny* [Ice Engineering Aspects of Offshore Oil&Gas Fields Exploration]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001.
2. Weinberg, D.V., Weinberg, E.D. *Raschet plastin* [Calculation of plates]. 2nd ed., reprint. and add. Budivelnik Kiev, 1970.
3. *Ledotekhnicheskiye aspekty osvoeniya morskikh mestorozhdeny nefty i gaza* [Ice Engineering Aspects of Offshore Oil&Gas Fields Exploration] ed. O.E. Litonov & V.V. Panov, St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 2001.
4. Syvir N.L., Hard K.G. *Raschetnoye proektirovaniye konstruksiy korpusa podvodnoy lodki: ucheb.posobie* [Design structural design of the hull of the submarine: proc. Manual] / SPbGMTU; St. Petersburg, 2009.
5. Tarasov V.P., Yushin P.S. *Primery aktivnoy ledovoy zaschity morskikh neftegazovykh sooruzheny I novye razrabotki s ispolzovaniem myagkikh naduvnykh obolochek dlya razruscheniya lda* [Examples of active protection of offshore oil & gas structures using soft pneumatic inflatable capsules in devices for ice booming] — (<https://cyberleninka.ru/.../primery-aktivnoy-ledovoy-zaschity-morskih-neftegazovyh->).
6. *Ustroystvo dlya zaschity gidrotekhnicheskikh sooruzheny ot vozdeystviya lda* [Device for protecting hydraulic structures from the impact of ice]/Patent for utility model No. 186054/ / A.P. Anosov, N.I. Voskovchuk. BI No. 36, 27.12.2018.
7. Karulina M. Theoretical and experimental investigations of level ice interaction with four-legged structures/M. Karulina, K. Shkhinek, G. Thomas; Proc. 21st Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic cond., POAC 11, 2011.

**ОБОЗРЕНИЕ: РС ПРЕДОСТАВЛЯЕТ ПРОЕКТАНТУ ИНСТРУМЕНТ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) представляет новый программный комплекс для проверки расчета прочности корпусных конструкций на соответствие Правилам РС.

⊕DYSSEY дает пользователю возможность смоделировать конструкции корпуса с необходимой степенью детализации и произвести расчеты для проверки выполнения требований к общей и местной прочности, устойчивости, ледовым усилениям, а также проверки требований для специализированных типов судов (например, наливные, навалочные, газовозы).

Новый программный комплекс РС поможет проектантам оптимизировать трудозатраты в процессе расчетов и сократить число ошибок на стадии подготовки технической документации для представления в Регистр, а также снизить количество вопросов по применению и трактовке Правил, возникающих у проектантов. Предоставление модели, выполненной с помощью программного комплекса ⊕DYSSEY, в составе комплекта проектной документации сведет процесс рассмотрения ее расчетной части к проверке соответствия модели фактическим характеристикам судна.

Конкурентное преимущество программного комплекса ⊕DYSSEY заключается в возможности выполнения расчета ледовых усилений (наружная обшивка, основной и рамный набор, листовые конструкции, включая автоматическое определение районов ледовых усилений с сопутствующим расчетом ледовых нагрузок) для ледовых классов Регистра, включая требования к судам двойного действия.

Комплекс ⊕DYSSEY находится на стадии промышленного тестирования, при этом проекты, реализованные с использованием ПО на данном этапе, будут приниматься РС к рассмотрению.

Подать заявку на дистрибутив можно на официальном сайте РС Лицензия на использование предоставляется юридическим лицам на срок 6 месяцев.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 621.643.053

ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ УРОВНЕЙ ДЕФЕКТНОСТИ СТАЛЬНЫХ ТРУБ И СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А.С. Авдонкин, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: avdonkin.as@rs-class.org

С.В. Балагура, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: balagura.sv@rs-class.org

С.П. Марков, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: markov_s_p@mail.ru

На основании анализа существующих отечественных и зарубежных методов расчета прочности и долговечности труб с дефектами в статье представлена часть результатов НИР для оценки степени опасности находящихся в эксплуатации морских подводных трубопроводов (МПТ) с коррозионной потерей металла и трещиноподобными дефектами с учетом их геометрических параметров и внешних воздействий. Оценка допустимости потери металла вследствие поверхностной коррозии труб согласно нормативным документам проведена по минимальному давлению разрушения трубы при утонении стенки на части длины. Оценка допустимых размеров трещин и трещиноподобных дефектов труб основана на диаграмме разрушения — FAD (Failure Assessment Diagram) и двухпараметрическом критерии, сочетающем условия чисто хрупкого и чисто вязкого разрушения. В результате расчетных сравнений рекомендованы подходы, позволяющие наилучшим образом прогнозировать критичность выявленных дефектов в процессе эксплуатации МПТ. Показана целесообразность учета вероятности негативных последствий аварий подводного трубопровода, масштаб которых определяется классом опасности МПТ. Результаты компьютерных расчетов представлены графически в виде диаграммы допустимой потери металла и диаграммы оценки разрушений при наличии трещиноподобного дефекта, которые для практических целей преобразовываются в зависимости допустимой глубины дефекта от его длины.

Ключевые слова: дефекты металла труб, скорость коррозионного износа, коэффициент интенсивности напряжений, разрушающее давление морских подводных трубопроводов, коэффициент запаса, двухпараметрические критерии разрушения, диаграмма оценки разрушения (FAD)

ASSESSMENT OF PERMISSIBLE DEFECTS FOR STEEL PIPES AND WELD SEAMS DURING THE OPERATION OF OFFSHORE SUBSEA PIPELINES

A.S. Avdonkin, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: avdonkin.as@rs-class.org

S.V. Balagura, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: balagura.sv@rs-class.org

S.P. Markov, PhD, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: markov_s_p@mail.ru

Based on the analysis of existing Russian and foreign methods for calculating the strength and durability of pipes with defects, the article presents a part of the R&D results for assessment of the degree of danger of operating offshore subsea pipelines with corrosion loss of metal and crack-like defects, taking into account their geometric parameters and external loading. The assessment of permissible metal loss due to surface corrosion of pipes has been carried out in accordance with the minimum failure pressure in the pipe in compliance with regulatory documents when the wall is thinned on a part of the length. The assessment of the permissible sizes of cracks and crack-like defects in pipes is based on the FAD (Failure Assessment Diagram) and the two-parameter criterion that combines the conditions of purely brittle and purely ductile fracture. On the basis of computational comparisons, approaches have been recommended enabling the most effective prediction of the criticality of the detected defects during the operation of the pipeline. The expediency of taking into account the probability of negative consequences of accidents of a subsea pipeline, the scale of which is determined by the pipeline hazard class, has been shown. The results of computer calculations have been graphically presented in the form of diagrams of the permissible loss of metal and diagrams for failure assessment in the presence of a crack-like defect, which for practical purposes are converted to functional dependence on the permissible depth of the defect on its length.

Keywords: pipe metal defects, corrosion wear rate, stress intensity factor, failure of offshore subsea pipelines, safety factor, two-parameter fracture criteria, failure assessment diagram (FAD)

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением сроков эксплуатации морских подводных трубопроводов (МПТ) транспортировки нефти и газа возрастает актуальность вопросов выявления и определения уровней дефектности металла труб МПТ и сварных швов для оценки их технического состояния и своевременного применения ремонтных технологий, позволяющих продлить ресурс эксплуатируемых МПТ, обеспечить их длительную работоспособность в эксплуатационных условиях.

Сложность адекватной оценки степени опасности дефектов труб МПТ на сегодняшний день связана с наличием нескольких подходов и расчетных методик, учитывающих специфику эксплуатации МПТ. Однозначное решение вышеупомянутой задачи осложнено отсутствием единообразия в нормативно-технических документах, регламентирующих порядок оценки технического состояния труб с дефектами, в методиках оценки прочности и долговечности труб с дефектами, а также сложностью применяемого в них математического аппарата.

В статье на основе анализа мировых расчетных методик и существующих нормативных документов отечественных организаций, эксплуатирующих МПТ, определены критерии предельного состояния трубопроводов, с помощью которых можно оперативно производить оценочные расчеты на прочность и долговечность труб и сварных швов МПТ, дефекты в которых развились в процессе эксплуатации. Таким образом, научно обоснованная оценка и прогноз технического состояния труб с дефектами позволяют осуществлять планирование ремонтных работ на линейной части МПТ.

Статья подготовлена на основании результатов выполненной Санкт-Петербургским морским техническим университетом НИР, инициированной Российским морским регистром судоходства для разработки рекомендаций и дополнений в Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов (Правила МПТ) и Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов (Руководство МПТ).

В процессе эксплуатации морских подводных трубопроводов (МПТ) с течением времени происходит снижение их эксплуатационной надежности, что связано с возникновением и развитием дефектов различных видов: дефектов стенки трубы, сварных швов, геометрической формы трубы. Для поддержания работоспособности МТ требуется адекватно оценивать опасность дефектов и определять сроки и способы их устранения. К факторам, благоприятствующим образованию и развитию дефектов в процессе эксплуатации МТ, относят: коррозионно-активные среды (окружающая трубопровод вода или грунт, в который заглублен МПТ на дне, а также транспортируемый продукт), цикличность давления трубопровода, наличие блуждающих токов, тип и срок эксплуатации антикоррозионного покрытия, внешние нагрузки и воздействия.

1. АНАЛИЗ ДОПУСТИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ КОРРОЗИИ ТРУБ МПТ

В качестве основных факторов, способствующих возникновению и развитию коррозионных и коррозионно-механических процессов, следует рассматривать деградацию свойств защитных покрытий и снижение с течением времени защитных возможностей систем электрохимической защиты, сопровождающиеся ухудшением их служебных характеристик, а также механическое разрушение бетонного покрытия труб и антикоррозионной защиты.

Оценку допустимости потери металла вследствие поверхностной коррозии труб в нормативных документах рекомендуют проводить по минимальному давлению разрушения трубы при утонении стенки на части длины. На основе многочисленных расчетов методом конечных элементов и полномасштабных экспериментов до разрушения стенки трубы получено уравнение для допускаемого минимального давления в трубе с одиночным коррозионным дефектом прямоугольной формы, ориентированным вдоль трубы [3],[8].

$$p = (2t\sigma_m)/(f_c(D-t)) \times ((1 - (h/t))/((1 - 1/Q(h/t))), \quad (1)$$

где f_c — коэффициент запаса, определяющий уровень допустимых размеров дефекта по отношению к разрушающему давлению, принимают $f_c = 1,25 - 1,5$;

t — начальная толщина трубы, мм;

σ_m — предел прочности стальной трубы, МПа;

D — наружный диаметр трубы, мм;

h — глубина коррозионного износа, мм;

Q — поправка Фолиаса, учитывающая максимальную протяженность повреждения вдоль трубы:

$$Q = \sqrt{1 + 0,31(L/\sqrt{D \cdot t})^2}, \quad (2)$$

p — безопасное рабочее давление в трубопроводе, МПа.

После преобразований уравнения (1) получаем следующее выражение для расчетной допустимой относительной глубины дефекта $[h/t]$ при заданной относительной протяженности дефекта $L/\sqrt{Dt}$:

$$(h/t) = \frac{Q(G_m - 1)}{G_m - Q}, \quad G_m = \frac{f_c p (D - t)}{2t\sigma_m}, \quad (3)$$

где все обозначения соответствуют формулам (1) и (2).

Представленная зависимость (3) рекомендована в ряде нормативных документах, иногда в модифицированном виде ([2] — [4], [7], [8]) и представляет так называемый детерминированный подход по оценке опасности коррозионного износа с позиций обеспечения прочности, с однозначно заданными размерами дефектов, нагрузками, воздействиями и характеристиками механических свойств металла труб. В реальных условиях всегда имеют место погрешность измерений размеров коррозионного дефекта при внутритрубной диагностике, а также случайные вариации и статистические рассеяния расчетных переменных, нарушающих однозначность оценок опасности дефектов.

В работе [5] рассматривается подход определения допустимых размеров дефектов с учетом вероятности R_f негативных последствий аварий подводного трубопровода, масштаб которых определяется классом опасности. Количественные экономические и экологические оценки ущербов не рассматриваются. В настоящее время накоплен большой объем статистических данных об авариях подводных трубопроводов. По статистическим данным основными причинами отказов подводных трубопроводов являются: механические повреждения (зацепления якорями и травами, падения тяжелых предметов); коррозия и процессы старения; строительные дефекты и дефекты металла труб.

В работе [5] сделан обзор аварий МПТ с частотой и последствиями из возникновения, на основе которых можно задать классы опасности (см. табл. 1) с учетом риска аварий, определяемых вероятностью R_f .

Таблица 1

Классы опасности разрушения подводных трубопроводов

Класс опасности	I (низкий)	II (средний)	III (высокий)	IV (очень высокий)
Класс отказа	Пренебрежимый	Некритический	Критический	Катастрофический
Масштаб потерь	Пренебрежимые экологические и экономические последствия. Ремонт трубопровода может быть отложен до планового останова	Кратковременное локальное нарушение состояния экологической среды и/или незначительные материальные потери. Внеплановый останов и ремонт трубопровода	Кратковременный ущерб окружающей среде и/или существенный экономический ущерб. Внеплановый останов и ремонт трубопровода	Масштабный длительный ущерб окружающей среде и большой экономический ущерб. Длительный останов и ремонт трубопровода
Вероятность $[R_f]$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}

В этом случае дополнительным введением коэффициента безопасности γ_d , учитывающего отмеченные выше случайные вариации размеров дефектов, и коэффициента γ_m , зависящего от класса опасности, точности диагностирования и уровня достоверности, получаем следующее выражение для расчетной допустимой относительной глубины дефекта $[h/t]$ при заданной относительной протяженности дефекта $L/\sqrt{Dt}$

$$(h/t)^* = \frac{Q(S_m - 1)}{\gamma_d(S_m - Q)}, \quad S_m = \frac{p(D - t)}{2t\sigma_m\gamma_m}, \quad (4)$$

где $(h/t)^* = (h/t) + \varepsilon_d S[h/t]$;

$S[h/t]$ — среднеквадратичное отклонение измеренного отношения (h/t) ;

ε_d — фактор величины квантиля для глубины коррозии, соответствующий вероятности R_f ;

γ_m — частичный коэффициент безопасности, зависящий от класса безопасности, относительного или абсолютного метода диагностирования, точности диагностирования и уровня достоверности и принимается в соответствии с [4], [5]. К относительному измерению относится метод MFL (магнитный поток рассеивания), к абсолютному — метод УТ (ультразвуковой);

γ_d — частичный коэффициент безопасности для глубины коррозии, зависит от точности измерения коррозионного слоя и толщины стенки МПТ и принимается в соответствии с [4], [5].

Все другие обозначения соответствуют формуле (1).

Для дальнейшего численного анализа заслуживает внимание зависимость в работе [5], полученная в развитие [4] с учетом положений работы [6]

$$[h/t] = \frac{1}{\gamma_d} \frac{R_b - 0,75(\gamma_R p D)/t}{1,1R_b - ((\gamma_R p D)/(2t))/M}, \quad (5)$$

где $R_b = \min\{\sigma_e; \sigma_m/1,15\}$;

σ_e — минимальный предел текучести;

σ_m — минимальный предел прочности;

$M = \sqrt{1 + 0,8(L/\sqrt{Dt})^2}$ — параметр Фолиаса, учитывающий изменение жесткости стенки трубы в зоне дефекта при его параболической аппроксимации;

γ_R — коэффициент безопасности, который допускается принимать при отсутствии статистических данных по табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов безопасности γ_R

Класс опасности	I	II	III	IV
$\gamma_R R$	1,04	1,15	1,26	1,31

В соответствии с Руководством МПТ [2] максимальная величина единичного коррозионного износа h должна удовлетворять условию

$$h = \min\{0,5t; Wt\},$$

где W определяется по формуле

$$W = \frac{0,9\sigma_Y - p(D/2t - 1)}{0,9\sigma_Y - p/Q(D/2t - 1)}, \quad (6)$$

Q определяется по формуле (2);

σ_Y — предел текучести металла трубы, МПа;

t — толщина стенки трубы, мм.

Все другие обозначения соответствуют формуле (1).

Сравнительный численный анализ результатов допустимых уровней дефектности при поверхностной коррозии выполнен по формулам (3) — (6), соответствующих указаниям документов [2] — [5] и [8]. Расчеты по разработанной программе в Visual Studio Express 2013 Desktop Windows представлены для МПТ транспортировки газа и нефти из сталей X65 и X52 в табл. 3. В расчетах принято положение о недопустимости в любом случае дефектов глубиной более 80 % толщины стенки трубы.

Таблица 3

Исходные данные, принятые в расчетах

Сталь	Внешний диаметр D , мм	Толщина стенки t , мм	Предел текучести σ_Y , МПа	Предел прочности σ_m , МПа	Рабочее давление p , МПа
X52	559	15,9	430	530	7,6
X65	711	25,4	500	608	15,4

В соответствии с детерминированным подходом формулы (3) и (6) задают зависимости глубины потери металла от длины пораженного коррозией участка, не принимая во внимание фактор риска и разброс измерений. Формулы (4) и (5) учитывают как класс опасности, так и точность измерения.

На рис. 1 представлены линии предельных размеров коррозионных дефектов в МПТ из стали X65 (см. табл. 3) в виде зависимости относительной глубины h/t от относительной длины $L/\sqrt{D \cdot t}$, полученные по формулам (4), (3) и (2). Точки, соответствующие реально измеренным дефектам, и располагающиеся выше линий зависимости h/t от $L/\sqrt{D \cdot t}$ свидетельствуют о недопустимости дефектов определенных размеров.

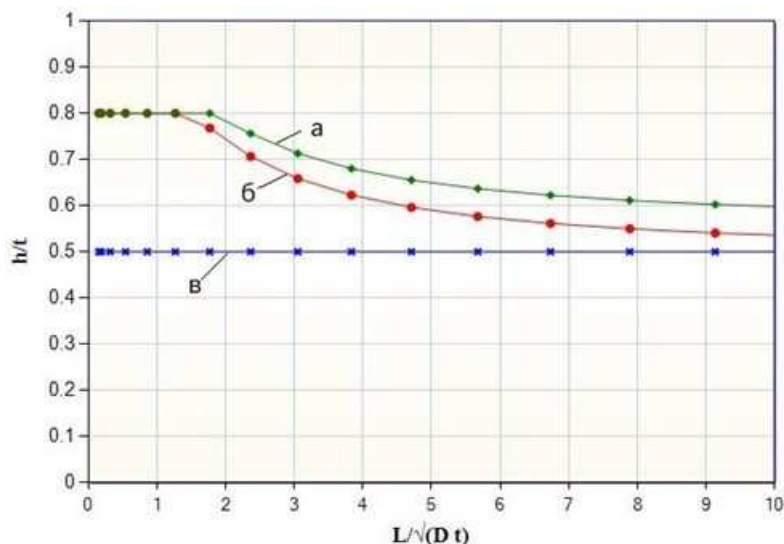


Рис. 1 Диаграмма допустимой потери металла:

a — по формуле (4) DNVGL [4] для класса опасности 4 и среднеквадратическом отклонении $S[h/t] = 0$;

b — по формуле (3) BS [3] и ГОСТ [8] с коэффициентами запаса по разрушающему давлению $f_c = 1,5$;

$в$ — по формуле (6) PC [2]

Предлагаемая оценка РС в действующем Руководстве МПТ (линия «в») не допускает глубину коррозии более чем на половину толщины стенки в данном случае, как для коротких дефектов, так и для дефектов очень большой длины. При этом по сравнению с рекомендованной практикой DNV [4] и руководством британского института стандартов [3], как и межгосударственного стандарта по системам газоснабжения [8], методика РС дает наименьшую оценку по глубине металла для трех представленных на рисунке методик.

Расчеты показали, что результаты по формуле (4) не только зависят от класса опасности, но и в значительной степени реагируют на точность измерения, которая определяется среднеквадратичным отклонением $S[h/t]$ измеренного отношения (h/t) . По величине $S[h/t]$ вычисляются коэффициенты безопасности γ_m и γ_d [4], [5]. Это влияние показано на рис. 2, где для среднего класса опасности 2 изображены кривые при варьировании среднеквадратичного отклонения $S[h/t]$. На диаграмме представлены средние значения (h/t) , вычисляемые по формуле

$$(h/t) = (h/t)^* - \varepsilon_d \cdot S[h/t]. \quad (7)$$

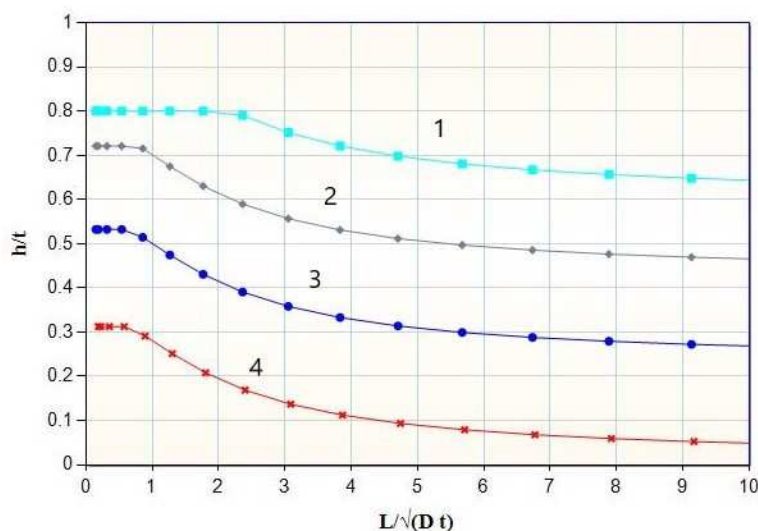


Рис. 2 Диаграмма допустимой потери металла по формуле (4) для класса опасности 2 (см. табл.1) и различных среднеквадратических отклонений:
1 — $S[h/t]=0,0$; 2 — $S[h/t]=0,05$; 3 — $S[h/t]=0,10$; 4 — $S[h/t]=0,15$

Следует подчеркнуть, что выбранное среднеквадратичное отклонение $S[h/t]=0,15$ соответствует достаточно приблизительной точности измерения, достигающей до 20 % толщины при относительном измерении. Влияние погрешности измерения в формуле (7) и соответственно вычисляемый коэффициент γ_d [4], [5] объясняют существенные различия в результатах на рис. 2.

Наиболее консервативные результаты дает формула (5). На рис. 3 представлена диаграмма допустимой потери металла МПТ из стали Х65 для всех 4-х классов опасности согласно формуле (5). Причем, расчеты показали приемлемую разницу результатов при различных погрешностях измерений.

На основе получаемых диаграмм при постоянной скорости коррозии можно оценить расчетный срок безопасной эксплуатации МПТ (ресурс) до планового ремонта. Остаточный ресурс МПТ по критерию поверхностной коррозии зависит от скорости роста коррозионных дефектов вглубь металла стенки трубы V_{corr}^h и скорости распространения коррозионных повреждений по поверхности металла трубы в продольном направлении V_{corr}^L . По опытным данным скорость роста коррозии в длину может превышать скорость роста в глубину в 20 — 100 раз. Если скорость коррозии основана на предыдущих данных контроля, то эта оценка может быть использована для одинаковых и подобных условий эксплуатации.

Средняя скорость коррозии V_{corr}^h , мм/год, может определяться по статистическим данным внутритрубной диагностики в разные моменты времени.

На основе анализа опытных данных рассматривают три прогнозируемых значения постоянной скорости коррозии в случаях различных нарушений изоляции труб: малая скорость коррозии $V_{corr}^h=0,1$ мм/год, средняя скорость коррозии $V_{corr}^h=0,3$ мм/год, высокая скорость коррозии $V_{corr}^h=0,5$ мм/год.

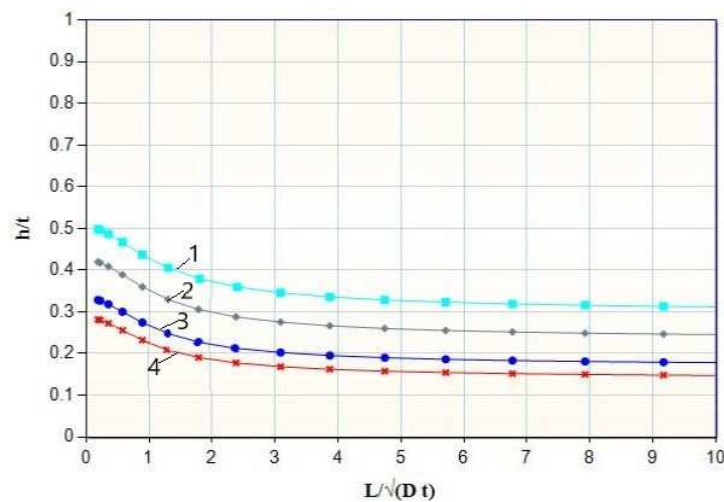


Рис. 3 Диаграмма допустимой потери металла по формуле (5) для классов опасности, указанных цифрами 1, 2, 3, 4 (см. табл. 1) и среднев квадратическом отклонении $S[h/t]=0$

На рис. 4 для МПТ из стали X52 (см. табл. 3) графически показано в абсолютных размерах при постоянной скорости коррозии влияние методики оценки уровня дефектности по глубине h на интервал времени, в течение которого сохранится работоспособное состояние МПТ.

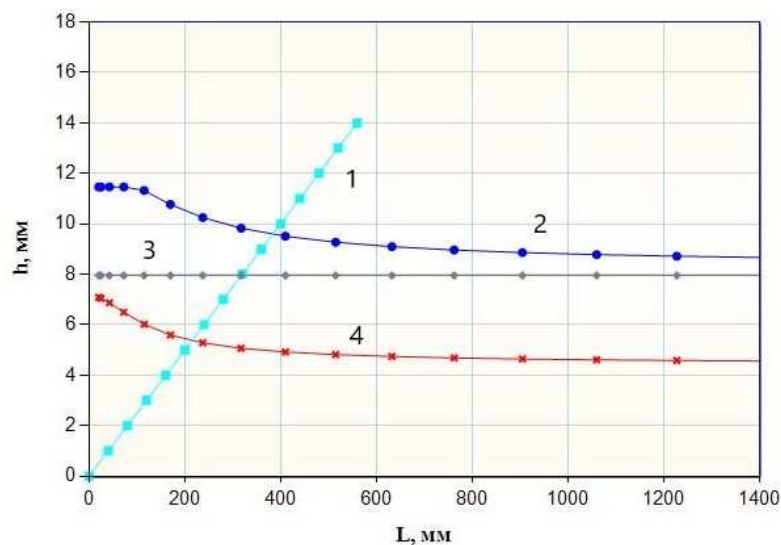


Рис. 4 Графическая интерпретация результатов расчетов роста дефектов до достижения ими предельных размеров для стали X52:
1 — рост дефекта при соотношении скоростей коррозии $V_{corr}^L = 40V_{corr}^h$; 2 — формула (4) для класса опасности 2 (см. табл. 1) и среднев квадратическом отклонении $S[h/t]=0,05$;
3 — формула (6); 4 — формула (5) с данными аналогично формуле (4)

Например, при высокой средней скорости коррозии $V_{corr}^h = 0,50$ мм/год получаем при рабочем давлении наименьший интервал исправного состояния $\tau = h/(V_{corr}^h) = 5/0,5 = 10$ лет при малых длинах дефектов, а при поверхностной коррозии вдоль трубы длиной порядка 1,4 м работоспособное состояние сохранится не менее 9 лет, т.к. асимптотически красная линия 4 выходит на размер не ниже $h = 4,5$ мм. Этот результат получен при среднем втором классе опасности и среднев квадратическом отклонении $S[h/t] = 0,05$, что составляет погрешность ориентировочно от 0,5 мм до 0,8 мм в зависимости от метода измерений. По действующему положению РС вышеуказанный срок получается 15,9 лет согласно линии 3 на рис. 4.

Таким образом, наиболее приемлемые результаты получены по формуле (5) с учетом вероятности возникновения негативных последствий. На рис. 5 представлены кривые предельных уровней дефектов при низком, среднем и высоком классе опасности при точном измерении. При этом чем больше погрешность измерений, тем расчетные кривые допустимых размеров располагаться ниже по шкале h .

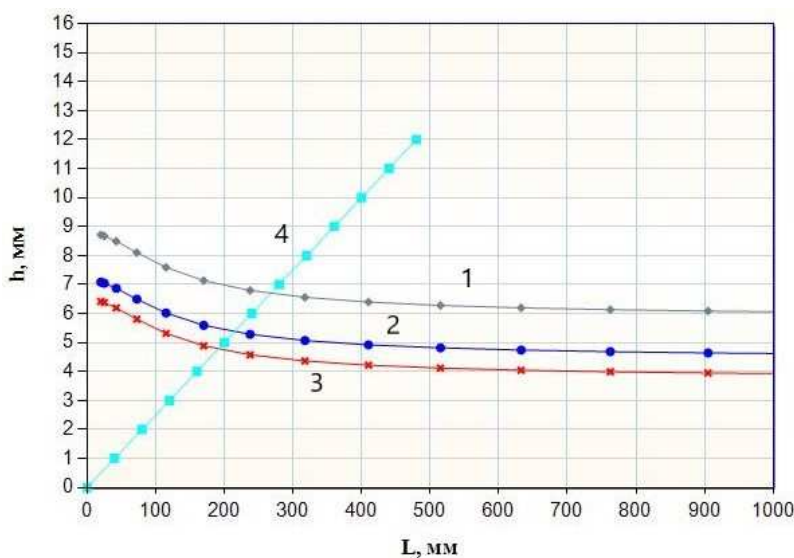


Рис. 5 Графическая интерпретация результатов расчета роста дефектов для стали X52 до достижения ими предельных размеров для классов опасности, указанных цифрами 1, 2, 3 (см. табл. 1), при среднеквадратическом отклонении $S[h/t]=0$.

Прямая 4 соответствует соотношению скоростей подрастания дефекта $V_{corr}^L = 40V_{corr}^h$

По кривым на рис. 5 можно выполнить градацию обнаруженных дефектов по степени их опасности. Дефект считается допустимым, если точка, определяющая размер дефекта, располагается ниже кривой предельных значений на рис. 5 с учетом вероятности масштаба потерь. Если эта точка пересекает или находится выше кривой предельных размеров, то дефект считают недопустимым. Дефекты, находящиеся в зоне вероятностей разрушения $10^{-4} < R_f(h) \leq 10^{-3}$ по соответствующим кривым, считаются опасными и подлежат ремонту в плановом порядке. При этом выполняется оценка срока безопасной эксплуатации при определенной скорости коррозии. Дефекты, находящиеся в зоне вероятностей разрушения $10^{-3} < R_f(h) \leq 10^{-2}$ по соответствующим кривым, считаются опасными и подлежат срочному ремонту. Дефекты, находящиеся в зоне вероятности разрушения $R_f(h) \geq 10^{-2}$, относятся к недопустимым и подлежат немедленному ремонту.

2. ОЦЕНКА ДОПУСТИМОСТИ ТРЕЩИН И ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МПТ

За последние несколько десятилетий большой интерес для оценки равновесия трещин в хрупко-вязком состоянии вызывают двухпараметрические критерии, сочетающие условия чисто хрупкого и чисто вязкого разрушения. Большое количество книг, статей, диссертаций на эту тему, а также широкое применение в нормативных документах в различных вариантах структурной связи между критериями показывают возможность реальной оценки допустимости дефекта в эксплуатации.

Инженерная оценка опасности дефекта, обнаруженная в период эксплуатации МПТ, применима для плоских дефектов, подобных трещинам. К ним можно отнести также непровары и отсутствие глубины провара, подрезы, корневые подрезы, наплавы, риски и задиры, расслоение металла. К объемным дефектам относятся такие, как пористость, неметаллические включения, локальная коррозия по площади, дефекты «канавочного типа» и др. В большинстве случаев рассмотрение объемных дефектов в виде плоских дефектов признано консервативным и, во многих случаях, целесообразно.

Оценка допустимых размеров трещин и трещиноподобных дефектов труб основана на диаграмме разрушения — FAD (Failure Assessment Diagram) [3], [5], [9], [10], [12], [13], [14]. Горизонтальная ось FAD (L_r) — отношение прикладываемой нагрузки или напряжений к максимальной нагрузке или напряжениям, при которых происходит пластическое разрушение

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_f,$$

где σ_f — напряжения пластического течения равные среднему значению предела текучести и пределу прочности с максимальной величиной $1,2 \sigma_y$, где σ_y — предел текучести;
 σ_{ref} — напряжения в трубе с дефектом для оценки разрушения в локальном или нетто сечении для различных типов дефектов и конструкций. Формулы для определения σ_{ref} и L_r приведены в [3], [9], [10], [12], [13], [14], [16].

Вертикальная ось FAD (K_r) — отношение коэффициента интенсивности напряжений K_I для рассматриваемого дефекта и растягивающих напряжений перпендикулярно трещине к максимальному параметру трещиностойкости K_{mat} , вызывающего разрушения, измеряемых в тех же единицах:

$$K_r = K_I / K_{mat}.$$

В настоящее время имеет место большое количество источников литературы, где представлены методики и формулы для определения K_I при различном расположении трещин и условий нагрузки применительно к МПТ [3], [9], [10], [12], [13], [14], [16].

Величину K_{mat} можно найти одним из следующих способов:

Способ 1. Измерить вязкость разрушения KIC при линейно-упругом деформировании в условиях плоской деформации, тогда $K_{mat} = K_{IC}$.

Способ 2. использовать корреляцию данных по испытаниям работы удара (ударной вязкости) на V-образных образцах типа Шарпи (Charpy).

Для верхнего шельфа т.е. при вязком разрушении выше порога хладноломкости:

$$K_{mat} = \sqrt{(E(0,53 \cdot KV^{1,28}) \cdot (0,2^{0,133} \cdot KV^{0,256})) / (1000(1 - \nu^2))}, \quad (8)$$

где KV — нижняя граница работы удара на V-образных образцах типа Шарпи при температуре эксплуатации в Дж;
 ν — коэффициент Пуассона;
 E — модуль нормальной упругости, МПа.

Способ 3. Преобразовать J-интеграл, используя следующее уравнение:

$$K_{mat}^2 = \frac{E \cdot J_{max}}{1 - \nu^2},$$

где E — модуль нормальной упругости;
 ν — коэффициент Пуассона,
 J_{max} — параметр трещиностойкости, равный J_C (см. 5.5.3.4 Правил МПТ [1]).

Саму кривую в координатах (L_r , K_r) необходимо обрезать для предупреждения локального коллапса в точке $L_r = L_r^{max}$, где

$$L_r^{max} = (\sigma_y + \sigma_u) / (2\sigma_y).$$

С целью отсекающей кривой FAD использовать средние значения свойств предпочтительнее, чем минимальные. Таким образом, приближенно принят во внимание эффект упрочнения материала.

Если полученная точка, определяемая подсчитанными (L_r , K_r) находятся внутри области FAD, ограниченной осями и линией оценки, дефект приемлем.

Принимая во внимание, что все действующие МПТ, как показывает практика, при укладке оценивались на допускаемые дефекты по уровню 3 классификации [3], экспертная оценка допустимости дефектов при эксплуатации должна проводиться также на уровне 3. При этом следует иметь в виду, что такая оценка наименее консервативна и максимально использует свойства стали, обладающей высокой пластичностью и вязкостью разрушения.

Рекомендуемые кривые в FAD, принятые в BS 7910 [3] и API 579-1 [16] отличаются от аналогичных кривых в SINTAP[9] и R6 [12]. Ниже представлены формулы из этих документов для сталей, не имеющих площадки текучести в кривой деформирования «напряжения — деформация».

BS 7910 [3] и API 579-1 [16]

$$K_r = \begin{cases} (1 - 0,14L_r^2)\{0,3 + 0,7\exp(-0,65L_r^6)\}, & L_r \leq L_r^{\max} \\ 0, & L_r > L_r^{\max} \end{cases}; \quad (9)$$

SINTAP[9] и R6[12]

$$K_r = \begin{cases} (0,3 + 0,7\exp(-\mu L_r^6))/\sqrt{(1 + 0,5L_r^2)}, & L_r \leq 1 \\ K_r(L_r = 1)L_r^{(N-1)/2N}, & 1 < L_r < L_r^{\max} \end{cases}, \quad (10)$$

где $\mu = \min(0,001E/\sigma_Y; 0,6)$;
 $N = 0,3[1 - \sigma_Y/\sigma_m]$;
 σ_Y — предел текучести;
 σ_m — предел прочности металла трубы.

Кривые в соответствии с формулами (9) и (10) изображены на рис. 6. Принимая во внимание, что кривая 2 расположена ниже кривой 1, то применение именно кривой 2 приводит к чуть более консервативным оценкам. В последнее время именно кривую 2 чаще рекомендуют для FAD.

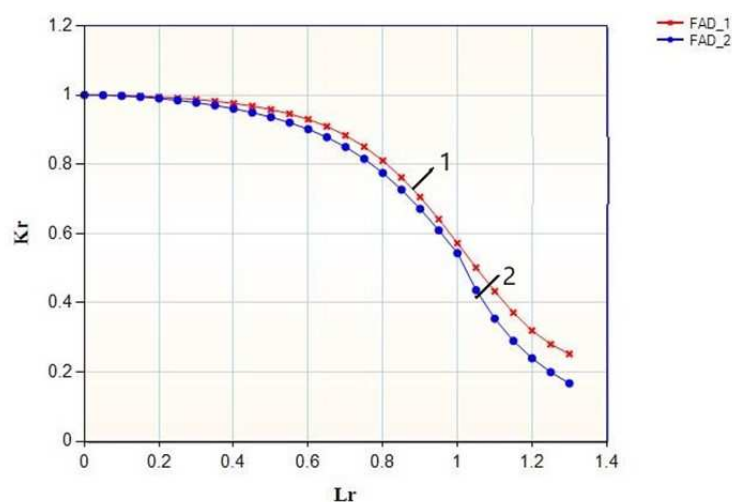


Рис. 6 Кривые диаграммы оценки разрушения FAD согласно: 1 — BS 7910 [3] и API 579-1 [16]; 2 — SINTAP [9] и R6 [12]

В работе [5] для оценки опасности трещиноподобных дефектов предлагается также ввести классы опасности в FAD согласно табл. 1. Учет риска разрушения выполняется введением коэффициентов запаса по трещиностойкости и по нагрузке:

$$K_r = (f(L_r))/\gamma_K, \quad L_r = (L_r^{\max})/\gamma_L.$$

Коэффициенты запасов γ_K и γ_L принимаются по табл. 2 и табл. 3 [5], с учетом обеспечения заданных вероятностей разрушения $[R_f]$.

Таблица 4

Значения коэффициента запаса γ_K

Класс безопасности	I	II	III	IV
γ_K	1,41	1,73	2,23	3,16

Таблица 5

Значения коэффициента запаса γ_L

Класс безопасности	I	II	III	IV
γ_L	1,5	1,8	2,25	3,0

Расчитанные диаграммы разрушения с учетом риска разрушения представлены на рис. 7.

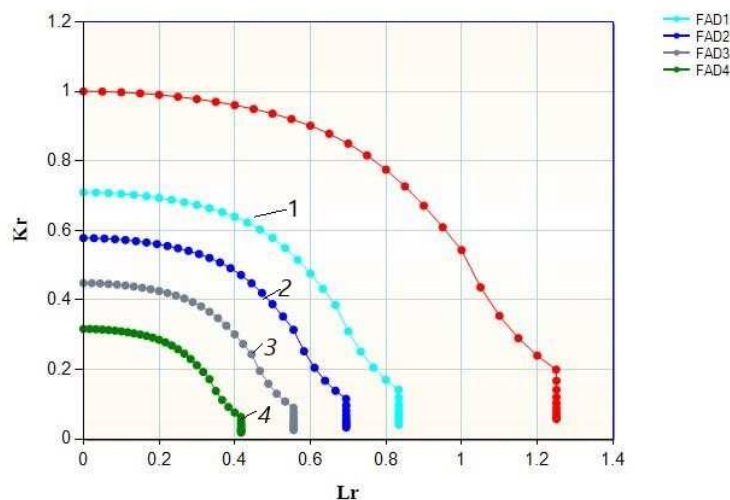


Рис. 7 Вид диаграмм оценки допустимости дефекта с учетом рисков разрушений:
1 — 10^{-2} ; 2 — 10^{-3} ; 3 — 10^{-4} ; 4 — 10^{-5}

Следует особо подчеркнуть, что применение FAD с учетом классов опасности возможно только в случае, если изучение дефектов при сварке кольцевых швов МПТ исходно основывалось на диаграммах аналогичных рис. 7 для конкретной стали.

Принимая во внимание, что опасность дефекта определяется положением расчетной точки, задаваемой координатами (K_I , L_r) на диаграмме, кривые с заданным классом опасности внутри кривой FAD заведомо дают допустимые дефекты меньших размеров.

Для снижения числа возможных ремонтов кольцевых швов во время укладки и сокращения сроков работ допускаются дефекты согласно инженерной оценке их критичности, основанной на подробном изучении механических свойств металла труб. На действующих МПТ перед укладкой МПТ был проведен комплекс экспериментальных исследований на образцах из трубной стали, а для оценки допустимости дефекта использовалась красная кривая на рис. 7 (без номера).

В связи с достаточно большим разбросом механических свойств стали X65 на рис. 8 и 9 показаны для сравнения минимальная и максимальная диаграммы деформирования металла. В дальнейшем следует применять минимальную кривую деформирования.

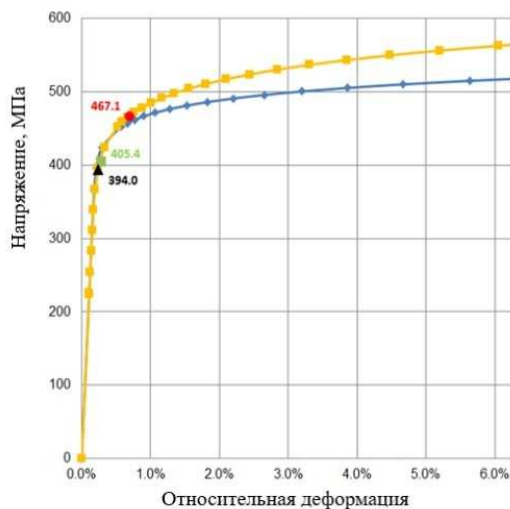


Рис. 8 Опытная минимальная кривая деформирования и истинная кривая деформирования стали X65 с указанием точек напряжений при укладке, испытанием давлением и рабочем давлении (цвет точек соответствует рис. 10)

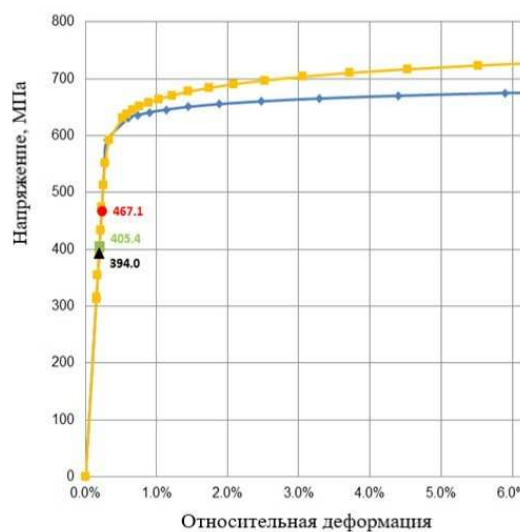


Рис. 9 Опытная максимальная кривая деформирования стали X65 и истинная кривая деформирования с указанием точек напряжений при укладке, испытанием давлением и рабочем давлении (цвет точек соответствует рис. 10)

Экспериментальные данные показали превосходство механических свойств металла шва по сравнению с основным металлом. Поэтому механические характеристики металла сварного шва принимались равными характеристикам основного материала МПТ.

В качестве примера для МПТ диаметром $D=711$ мм и толщиной стенки $t=25.4$ мм из стали X65 рассчитаны абсолютные размеры высоты и длины допустимых дефектов на основе диаграммы FAD, определенной на основе экспериментальных данных. Причем в безопасную сторону в качестве исходных данных принималась меньшая толщина 24,4 мм с учетом допуска на толщину труб, учитывалась возможная несоосность стыковки труб 2,5 мм, которая вызывает дополнительные изгибные напряжения кольцевого шва. Также учитываются остаточные сварочные напряжения равные пределу текучести с учетом их релаксации согласно [3]. Такое представление на рис. 10 для трех случаев нагрузки задает допустимый уровень абсолютного размера дефектности и удобно для практического использования.

Расчет выполняется методом итераций. Задается высота дефекта и подбирается его длина, при которой максимально допустим размер дефекта по диаграмме FAD. В любом варианте не допускается длина дефекта более 1,3 длины окружности трубы. Видно, что при испытаниях МПТ допустимые размеры дефектов должны быть меньше, чем при эксплуатации МПТ.

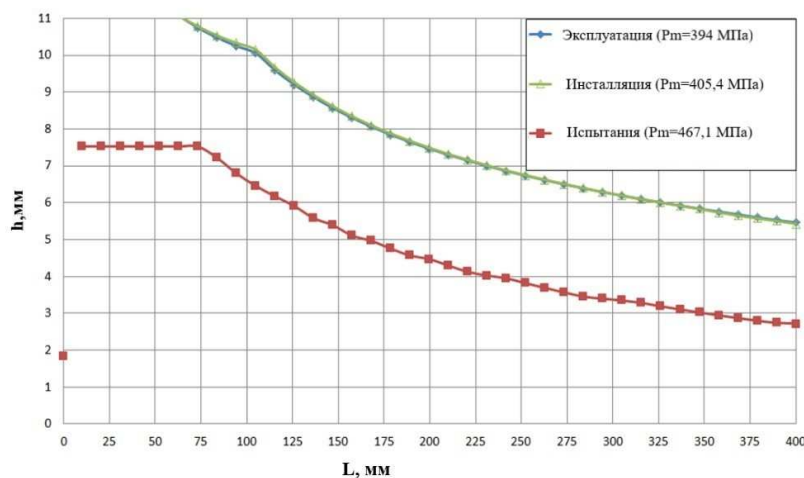


Рис. 10 Показатели критичности дефектов, принимающие во внимание минимальную кривую деформирования и нагрузки при укладке (мембранные напряжения $P_m=405,4$ и изгибные напряжения $P_b=39,0$ МПа), испытательном ($P_m=467,1$ МПа и $P_b=27,0$ МПа) и рабочем давлении ($P_m=394,0$ МПа и $P_b=41,4$ МПа))

На рис. 11 показано влияние толщины стенки на критичность размеров дефектов. Наиболее безопасную кривую получаем при толщине 22,5 мм, т.е. при вычитании 3 мм от номинальной толщины стенки трубы, предусмотренных на коррозию. Именно эту кривую следует использовать для оценок трещиноподобных дефектов при эксплуатации для кольцевых дефектов. В этом случае предполагается отсутствие существенной деградации свойств металла и используются данные о механических характеристиках конструкционных материалов труб, полученных на момент поставки изделий и строительства МПТ без учета изменения этих характеристик в процессе эксплуатации.

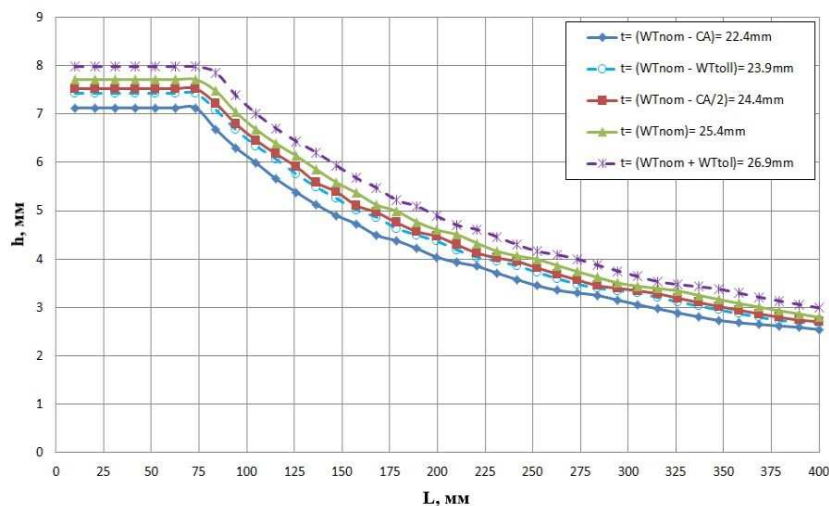


Рис. 11 Влияние толщины стенки трубы на показатели критичности дефектов

Для продольных дефектов в основном металле следует провести аналогичные расчеты, т.к. изменяются коэффициент интенсивности напряжений в силу другого расположения трещины, увеличиваются в два раза действующие внешние мембранные напряжения, но отсутствуют остаточные сварочные напряжения, поэтому получаемая величина внешнего воздействия будет ниже. Для продольных сварных (заводских) швов вдоль трубы в зоне остаточных пластических деформаций укорочения при обычной операции экспандирования сварных труб с продольным швом остаточные сварочные напряжения в значительной степени снимаются за счет вытягивания металла и принимаются равными нулю.

ВЫВОДЫ

Анализ двух видов разрушений для оценки критичности дефектов в результате поверхностной коррозии и наличия трещиноподобных дефектов для обеспечения безопасной эксплуатации МПТ на основе нескольких действующих методик позволил предложить подходы с целью их реализации в Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов. Показана целесообразность оценки допустимых размеров дефектов с учетом вероятности негативных последствий аварий подводного трубопровода, масштаб которых определяется классом опасности, начиная со стадии проектирования МПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов. Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, 2020. 274 с.
2. Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов. Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, 2017. 87 с.
3. BS 7910. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. British Standards Institution, 2007. 297 p.
4. DNVGL-RP-F101-2017 Corroded Pipelines, DNVGL AS, 2017 — 123 p.
5. Lepikhin A., Leschenko V., Makhutov N. Defects Assessment in Subsea Pipelines by Risk Criteria. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94851>.
6. ASME B31G-1991 Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. 56 p.
7. Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных трубопроводов. ОАО «Газпром». 2006. 100 с.
8. ГОСТ 34027-2016. Магистральная трубопроводная транспортировка газа. Механическая безопасность. Назначение срока безопасной эксплуатации линейной части магистрального газопровода. М.: Стандартинформ, 2017. 77 с.
9. SINTAP: structural integrity assessment procedure. Final report. EU-project BE 95. Brussels: Brite Euram Programme, 1999. 1462 с.
10. Procedure for Safety Assessment of Components with Defects — Handbook. Edition 5. Kiwa InspectaTechnology AB, Stockholm, 2018. 217 p.
11. Offshore standard DNV OS-F-101. Submarine pipeline systems. Det Norske Veritas, October 2010. 238 p.
12. Assessment of the integrity of structures containing defects, British Energy Generation report R6, Rev. 4, British Energy Generation Limited (BEG): Gloucester, 2001. 114 p.
13. Методические рекомендации. МР-02-95. Правила составления расчетных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами, М.: ЦНИИТМАШ, 1995. 52 с.
14. СТО Газпром 2-2.4-715-2013. Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов. Газпром ВНИИГАЗ, М.: Газпром экспо, 2012. 391 с.
15. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций, Л.: Судостроение, 1974. 286 с.
16. Fitness-For-Service. API 579-1/ASME FFS-1, June, 2016. 865 p.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines. ID 2-020301-006. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2020. 274 p. (In Russian)
2. Guidelines on Technical Supervision during Construction and Operation of Subsea Pipelines. ID 2-030301-002 Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg. 2017. 87 p. (In Russian)
3. BS 7910. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. British Standards Institution. 2007. 297 p.
4. DNVGL-RP-F101-2017 Corroded Pipelines. DNVGL AS. 2017 — 123 p.
5. Lepikhin A., Leschenko V., Makhutov N. Defects Assessment in Subsea Pipelines by Risk Criteria. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94851>.
6. ASME B31G 1991 Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. 56 p.
7. *Instruktsiya po otsenke defektov trub i soedinitelnykh detaley pri remonte i diagnostirovaniy magistralnykh truboprovodov* [Instructions on assessment of pipes and joints defects during repair and diagnostics of main pipelines]. JSC "Gazprom". 2006. 100 p.
8. GOST 34027-2016. *Magistralnaya truboprovodnaya transportirovka gaza. Mekhanicheskaya bezopasnost. Naznachenie sroka bezopasnoy ekspluatatsii lineynoy chasti magistralnogo gazoprovoda* [Gas supply system. Gas main pipeline transportation. Mechanical safety. Assigning of safe operation life for linear part of gas main pipeline] M.: Standartinform. 2017. 77 p.
9. SINTAP: structural integrity assessment procedure. Final report. EU-project BE 95. Brussels: Brite Euram Programme. 1999. 1462 p.
10. Procedure for Safety Assessment of Components with Defects — Handbook. Edition 5. Kiwa InspectaTechnology AB. Stockholm. 2018. 217 p.
11. Offshore standard DNV OS-F-101. Submarine pipeline systems. Det Norske Veritas. October 2010. 238 p.
12. Assessment of the integrity of structures containing defects. British Energy Generation report R6. Rev. 4. British Energy Generation Limited (BEG): Gloucester. 2001. 114 p.
13. *Metodicheskiye rekomendatsii. MR-02-95. Pravila sostavleniya raschetnykh skhem i opredeleniye parametrov nagruzhennosti elementov konstruktsiy s vyyavlennymi defektami* [Methodical recommendations. MR-02-95. Regulations for drawing up design schemes and definition of loading parameters of structural elements with revealed defects] M.: TsNIITMASH. 1995. 52 p.
14. СТО Газпром 2-2.4-715-2013. *Metodika otsenki rabotosposobnosti koltsevykh svarnykh soyedineniy magistralnykh gazoprovodov* [Methodology of assessment of operability of ring welds of main pipelines] Gazprom VNIIGAZ. M.: Gazprom ekspoz. 2012. 391 p.
15. Kuzminov S.A. *Svarochnyye deformatsii sudovykh korpusnykh konstruksiy* [Weld deformations of ship hull structures] L.: Sudostroyeniye. 1974. 286 p.
16. Fitness-For-Service. API 579-1/ASME FFS-1. June. 2016, 865 p.

УДК 629.5.035-233.1-233.21-036

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СУДОВЫХ ДЕЙДУДНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Ю.С. Болховитин, Акционерное общество «Центр технологии судостроения и судоремонта» (АО «ЦТСС»), Санкт-Петербург, e-mail: inbox@sstc.spb.ru

А.С. Гришин, АО «ЦТСС», Санкт-Петербург

А.Ю. Межевитинов, канд. техн. наук, АО «ЦТСС», Санкт-Петербург

В.К. Ханухов, НТФ «Судотехнология», АО «ЦТСС», Санкт-Петербург

В настоящее время в области судостроения используется ряд новых конструктивных элементов и изделий, содержащих новые антифрикционные синтетические материалы. В статье проведен анализ применяемых материалов, их достоинства и недостатки, приведены физико-механические свойства материалов. Рассмотрены материалы, разработанные российскими и зарубежными компаниями, приведено сравнение скорости изнашивания российских и зарубежных синтетических материалов. Рассмотрены особенности применения бинарных поверхностей в узлах трения, то есть поверхностей, образованных двумя разными материалами. Приведены конструктивные схемы применения бинарных поверхностей в подшипниках скольжения. Приведены факторы, определяющие условия безопасной эксплуатации подшипников валопроводов. Статья подготовлена на основе научно-исследовательской работы, выполненной по заказу РС.

Ключевые слова: антифрикционные материалы, судовые дейдудные подшипники, синтетические материалы, судостроение, судоремонт

APPLICATION OF NEW SYNTHETIC MATERIALS IN SHIP STERN BEARINGS

Yu.S. Bolkhovitin, JSC "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center" (JSC "SSTC"), St. Petersburg, e-mail: inbox@sstc.spb.ru

A.S. Grishin, JSC "SSTC", St. Petersburg

A.Yu. Mezhevitinov, JSC "SSTC", St. Petersburg

V.K. Hanukhov, RTC "Sudotechnologiya", JSC "SSTC", St. Petersburg

The article provides the analysis of new anti-friction synthetic materials used in new structural elements currently applied in shipbuilding. Benefits and drawbacks of applying these materials have been covered, their physical and mechanical properties have also been discussed. The article covers the materials produced both by Russian companies and companies abroad, drawing the comparison between their respective anti-friction redundancy. The article provides the peculiarities of binary surface (a surface formed with two different materials) application with expected friction. Structural arrangement of binary surfaces have been given for plain bearings. In addition, the article lists factors that could influence the safe application of new materials in ship stern bearings. The article is based on the research work commissioned and financed by RS.

Keywords: antifriction materials, shipboard stern bearings, synthetic materials, shipbuilding, ship repair

ВВЕДЕНИЕ

Спецификой морской техники является такая работа ряда механизмов и устройств, при которой привод механизма находится внутри корпуса корабля, а исполнительная часть — за бортом. При этом часть узлов трения (УТ) механизма должны работать в воде или на границе раздела сред «вода — воздух». Примером этого служат судовые валопроводы, рулевые устройства, поворотные насадки, активные успокоители качки.

Оптимальным решением задачи является водопроницаемый УТ, использующий воду в качестве смазывающего-охлаждающего агента.

Ключевым элементом такого УТ является антифрикционный материал, требования к которому можно сформировать на основе ретроспективного анализа развития УТ морской техники.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специфически морскими узлами трения являются дейдвудные подшипники корабельных валопроводов. Они же являются одними из наиболее крупных узлов трения морской техники. В них, вместе с прочими опорными и упорным подшипниками валопровода теряется до 5 % мощности главного двигателя. Для их изготовления расходуется значительное количество коррозионностойких и антифрикционных материалов. Схема движительного комплекса приведена на рис. 1.

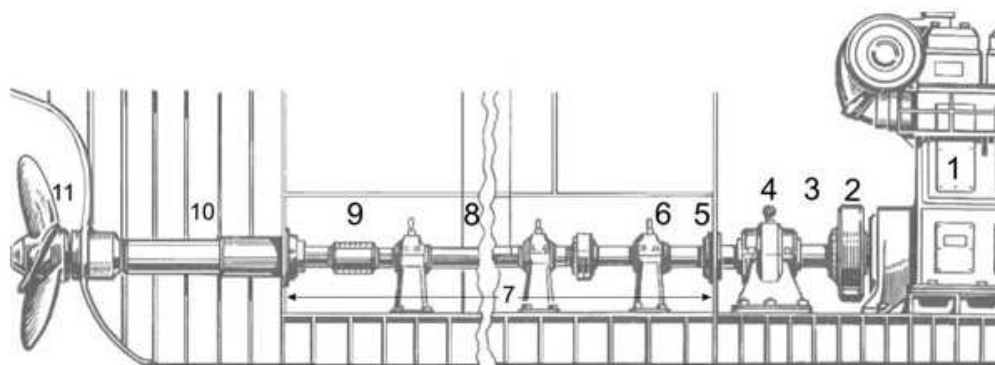


Рис. 1 Общая схема движительного комплекса судов:

1 — главный двигатель; 2 — маховик; 3 — упорный вал; 4 — упорный подшипник; 5 — переборочный сальник;
6 — опорный подшипник; 7 — коридор гребного вала; 8 — промежуточный валопровод; 9 — полумуфта;
10 — дейдвудное устройство; 11 — гребной винт

Первым по времени применения антифрикционным материалом для изготовления судовых узлов трения с водяной смазкой (вкладышей дейдвудных подшипников и т. д.) был природный материал **бакаут–древесина** гваякового дерева, произрастающего в тропиках. Бакаут является природным композиционным биополимером со специфической структурой, в которой нити высокомолекулярной целлюлозы, объединенные водородными связями в пространственную структуру, армируют лигнин.

Высокие антифрикционные свойства бакаута при трении в воде объясняются содержанием в ядровой части кражей гваяковой смолы в количестве до 26 %. В капиллярах древесины содержатся большое количество смолоподобных веществ. Плотность гваяковой смолы от 1200 до 1500 кг/м³, температура плавления 80 °С. Удаление ее из древесины приводит к возрастанию коэффициента трения примерно в 40 раз.

Бакаутная смола содержит до 70 % гваяковой смоляной кислоты, а также органические вещества гваякол, гуммин, ванилин, эфирные масла. Древесина содержит также сапонин и другие вещества. Некоторые из них образуют в воде коллоидные пенные растворы, подобные мылу. Поведение бакаута при трении в воде обусловлено именно содержанием смолы и сапонины, поскольку на поверхности образуется водная эмульсия, действующая как естественная смазка.

Таким образом, древесина бакаутного дерева, обладающего высокой твердостью и износостойкостью, имеет уникальное сочетание свойств, оптимальных для использования в подшипниковых узлах. Высокое содержание в древесине гваяковой смолы, вызывающей эффект самосмазывания, поддерживает низкий коэффициент трения при смазывании водой.

Согласно действующей документации, сдаточными характеристиками бакаута, обуславливающими возможность его применения для изготовления вкладышей судовых подшипников, являются плотность и твердость, измеренная по методу Янка. Основные свойства этого материала приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства бакаута

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1200
Предел прочности при сжатии, МПа	70,0
Твердость по Янка, МПа	140,0
Набухание, %	практически нет
вдоль	
перпендикулярно волокнам	0,2
Коэффициент трения по бронзе при смазке морской водой	0,009
Допустимая удельная нагрузка, МПа	0,25

Конструктивное исполнение узлов трения, разработанное для набора вкладышей из бакаута, до настоящего времени сохранилось практически неизменным и приведено на рис. 2. Последнее время объем применения бакаута сильно упал в связи с истощением его мировых запасов, сложностью приобретения, а также снижением качества поставляемого материала. В то же время, учитывая уникальные свойства бакаута, он де-факто является как бы модельным образцом для новых антифрикционных материалов, предназначенных для использования во вкладышах подшипников.

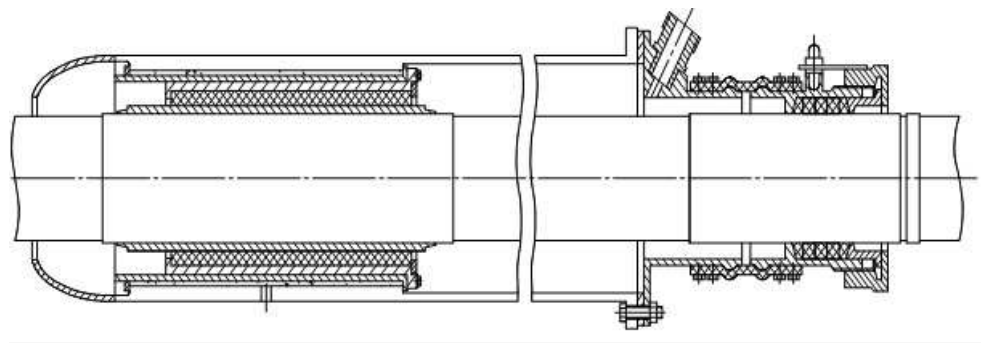


Рис. 2 Конструктивное исполнение узла трения в дейдвуде

Кроме узлов трения на водяной смазке с набором вкладышей из бакаута в качестве дейдвудных подшипников иногда используют закрытые узлы жидкостного трения, в которых парами трения являются **сталь (бронза) и баббит**, а смазывающим агентом — **жидкие нефтяные масла**.

В связи с тем, что полная герметичность таких узлов трения недостижима, ежедневная утечка масла с каждого узла не бывает менее 7 л, что, учитывая объемы мирового судоходства, вызывает растущее загрязнение моря. Однако полного вытеснения УТ на масляной смазке пока не произошло.

Поэтому вполне естественно, что основным преимуществом УТ на водяной смазке является их экологичность: в окружающую среду попадают только продукты износа антифрикционного материала. В УТ с водяной смазкой используются исключительно неметаллические антифрикционные материалы, различные как по способам получения, так и по своим физико-механическим свойствам.

Попытки придать обычной недефицитной древесине типа березы некоторые свойства бакаута привели к созданию материала лигнита. Отечественным аналогом этого материала является древесно-слоистый пластик ДСП-А по ГОСТ 13913. Свойства ДСП-А приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства древесно-слоистого пластика марки ДСП-А

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1300
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа:	176
Твердость, МПа	196
Водопоглощение, %, не более	18
Набухание, %, не более	20
Коэффициент трения по бронзе при смазке морской водой	0,005 — 0,008
Допустимая удельная нагрузка, МПа	0,25

Кроме бакаута и материалов на основе древесины в качестве антифрикционных материалов для вкладышей подшипников дейдвудных устройств на водяной смазке наиболее применяемыми являются армированные пластмассы типа текстолит, материалы на основе резино-металлических пластин (Резина 8075, Резина 8130, Резина 1626 и др.), полиамида (Капролон В, Полиамид 68 и др.); полиуретанов (Тордон XL, Тордон SXL и др.), фенилона наполненного рубленой углеродной тканью (Графелон 20М), прессованный углепластик на основе эпоксидного (Углепластик УГЭТ) или фенолформальдегидного (Углепластик ФУТ) связующих материалов, а также фторопласт, наполненный коллоидным графитовым порошком (Анита-40).

Текстолиты производятся в разных странах под различными фирменными названиями: «Туфнол» (Великобритания), «Ламинекс» (США) и т.д. В России выпускается текстолит марки ПТК-С. Текстолиты превосходит бакаут по основным физико-механическим характеристикам (см. табл. 3) и их стабильности. Опыт эксплуатации крупнотоннажных судов коммерческого флота свидетельствует о том, что при правильно выполненном значении водяного зазора, достаточной прокачке забортной водой и обеспечении приработки дейдвудные подшипники с набором из текстолитовых вкладышей имеют долговечность, превышающую долговечность подшипников из бакаута.

Таблица 3

Физико-механические свойства текстолита марки ПТК-С

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1300 — 1400
Предел прочности при сжатии, МПа:	
параллельно слоям	147
перпендикулярно слоям	245
Водопоглощение, %, не более	0,75
Коэффициент трения по бронзе при смазке морской водой	0,003 — 0,008
Допустимая удельная нагрузка, МПа	0,3

Недостаток текстолита состоит в том, что пребывание в воде сопровождается его набуханием.

Исследования показали, что увеличение линейных размеров деталей из текстолита, погруженных в воду, является процессом, который затухает весьма медленно. Так, стабилизация толщины стандартных образцов (50 × 50 × 25) мм происходит примерно за два года испытаний. При этом величина набухания достигает 2,5 % от первоначальной толщины. В наборе УТ этот процесс развивается значительно медленнее и к концу указанного двухлетнего периода продолжается со скоростью 0,3 % в год. На интенсивно эксплуатируемых УТ процесс набухания текстолита протекает параллельно с процессом изнашивания. Поэтому опасного снижения величины водяного зазора не происходит.

С началом использования в подшипниках текстолитов из углетканей (ФУТ, УГЭТ) вопросы с набуханием набора и заклиниванием валов в подшипниках стали не актуальны.

Для **резины** (см. табл. 4) наиболее существенным преимуществом перед другими материалами, применяемыми в УТ, является практическое отсутствие набухания в воде и стойкость к абразивному изнашиванию. К настоящему времени накоплен большой положительный опыт применения резинометаллических подшипников и подшипников с резинометаллическими вкладышами.

Таблица 4

Физико-механические свойства резины

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1300 — 1400
Предел прочности на разрыв, МПа	10
Водопоглощение	—
Коэффициент трения по бронзе при смазке морской водой	0,004 — 0,007
Допустимая удельная нагрузка, МПа	0,25

Недостатком резины является ограниченный гарантийный срок ее хранения. Кроме того, при длительном неподвижном контакте вала и вкладыша существенно возрастает адгезия между резиной и металлом, что может приводить к повреждению рабочего слоя вкладыша. Поэтому существует необходимость периодического проворачивания вала, когда изделие не эксплуатируется.

Изотропным и термореактивным материалом для УТ является **капролон**. Недостатком капролона является его сравнительно высокая степень набухания и заметное снижение износостойкости в случае эксплуатации при повышенной температуре воды (около 30 °С). Основные свойства капролона приведены в табл. 5.

Таблица 5

Физико-механические свойства капролона

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1150 — 1160
Предел прочности при сжатии, МПа	100
Твердость, МПа	140
Коэффициент трения по бронзе	0,003 — 0,008
Допустимая удельная нагрузка, МПа	0,5

Из антифрикционных материалов, выпускаемых зарубежными фирмами, следует отметить материалы фирм "Railko Ltd" (Великобритания) и "Thomson Gordon Ltd" (Канада).

Материал "Railko" выпускается в нескольких модификациях. В качестве связующего используется фенолформальдегидная смола, армирующим материалом служит асбест (модификация WA) или асбест с графитом (модификация AL). Использование асбестового наполнителя, который считается канцерогеном, делает подобные материалы малопривлекательными как в производстве, так и в применении. Предел прочности при сжатии материала "Railko-WA" составляет 110 МПа (параллельно слоям) и 125 МПа (перпендикулярно слоям). Его набухание в воде составляет 1 %.

Материал канадской фирмы "Thomson Gordon Ltd" носит торговое название "THORDON", относится к группе эластомеров и по многим свойствам подобен полиуретановой резине. Применяется во многих странах и, подобно резине, имеет высокое сопротивление абразивному изнашиванию. В воде материал набухает. Величина объемного набухания составляет 1,3 %. Свойства приведены в табл. 6.

Таблица 6

Физико-механические свойства материала «Тордон»

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1210
Предел прочности при сжатии, МПа	90
Твердость, по Шору D	73
Коэффициент трения по бронзе	0,05
Допустимая удельная нагрузка, МПа	0,5

Типовым конструктивным решением подшипника из материала "THORDON" является монолитная втулка с продольными пазами для прохода воды в зону трения, а для больших диаметров — втулка из двух половин.

Широко применяются в морской технике резиновые и резинометаллические подшипники фирмы "Johnson" (Нидерланды), которые также представляют собой втулки либо монолитные, либо наборные из планок.

Анализ полимерных композитов, применяемых в отечественном судостроении в качестве материалов узлов трения, показывает, что среди антифрикционных термопластов, смазывающихся водой, наибольшее распространение получили такие материалы, как ПТФЭ, ароматические и алифатические полиамиды, модифицированные наполнителями в виде графита, металлических порошков, углеродных волокон [1].

Выбор типа металлоорганических наполнителей для модификации полимерного связующего обусловлен обеспечением достижения требуемых высоких физико-механических и триботехнических характеристик композита и ограничен небольшим кругом в соответствии с имеющимися представлениями об их антифрикционных и противоизносных свойствах [2].

Оценка перспективных и наиболее применяемых на данный момент антифрикционных синтетических материалов, используемых в подшипниках, производится по следующим параметрам:

- разрушающее напряжение при сжатии по ГОСТ 4651, ISO 604;
- разрушающее напряжение при изгибе по ГОСТ 4648, ISO 178;
- разрушающее напряжение при растяжении по ГОСТ 32656, ГОСТ Р 56785, ISO 527, ASTM D3039/D3039M-08;
- твердость по ГОСТ 4670, ГОСТ Р 56761, ISO 2039-1, ASTM D2583-13a;
- водопоглощение согласно ГОСТ 4650, ГОСТ Р 56762, ISO 62, ASTM D5229/D5229 M 12;
- коэффициент трения по ГОСТ 11629;
- плотность согласно ГОСТ 15139, ISO 1183-1, ASTM D792.

Сравнение скорости изнашивания российских и зарубежных синтетических материалов приведено на рис. 3.

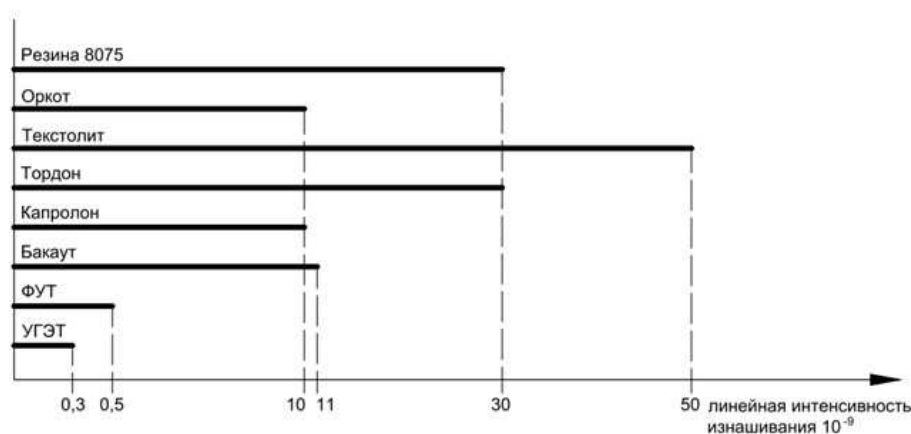


Рис. 3 График интенсивности изнашивания синтетических материалов

Из проведенных исследований и анализа видно, что антифрикционные материалы обладают высокими физико-механическими показателями и могут использоваться в качестве втулок, вкладышей или их комбинаций в подшипниках скольжения в зависимости от требуемых свойств.

БИНАРНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Возможность добиться требуемых оптимальных технических свойств подшипника достигается комбинированием различных антифрикционных материалов в узлах трения. Наиболее перспективным является создание из данных материалов **бинарных поверхностей** в узлах трения, то есть поверхностей трения, образованных двумя разными материалами, один из которых представляет силовую часть вкладыша, другой — твердосмазочную его часть.

В процессе эксплуатации обе составляющие находятся во фрикционном контакте с контртелом (валом). Твердые элементы поверхности воспринимают основную рабочую нагрузку. Материал более мягких вставок узла скольжения подшипника в процессе трения переносится в зону контакта с металлом, где образует поверхностные антифрикционные слои, снижающие трение, износ и предотвращающие схватывание.

Таким образом, действие фторопластовых протекторов как систем смазки, встроенных в структуру материала, обеспечивает образование на контактирующих поверхностях разделительной антифрикционной пленки, являющейся результатом физических преобразований материала протектора под влиянием факторов трения.

Проведенные стендовые испытания бинарных опор различных диаметров подтвердили наличие пленки графитофторопласта на поверхности углепластика и металлического вала. Образование пластичной легкоподвижной пленки на поверхности контакта обеспечивает выполнение правила положительного градиента сдвиговых сопротивлений и резкое снижение коэффициента трения. М.Б. Рубиным [1] разработана теория бинарных опор скольжения. Связь между процессами изнашивания компонентов бинарной поверхности определяет изнашивание поверхности в целом и описывается системой уравнений, в которую включены уравнения равновесия сил, совместной деформации компонентов, изнашивания каждого из компонентов и их совместного изнашивания.

Возможны различные варианты геометрических форм и расположения вкладышей из синтетических материалов.

На примере бинарного сочетания материалов вкладышей из прессованного углепластика на основе фенолформальдегидного связующего и фторопласта, наполненного коллоидным графитовым порошком (Ф40Г40) с разным соотношением по площади поверхности трения подшипника, рассмотрим наиболее износостойкие схемы набора вкладышей.

Наиболее перспективными схемами расположения вкладышей в подшипнике являются [3]:

- соотношение материалов из прессованного углепластика на основе фенолформальдегидного связующего (ФУТ) и фторопласта, наполненного коллоидным графитовым порошком (Анита-40) в рабочей зоне 50/50 %;
- чередование по окружности вкладышей из материалов ФУТ и Анита-40 с параллельной ориентацией слоев относительно оси вращения вала (см. рис. 4);
- чередование по окружности вкладышей из материалов ФУТ и Анита-40 (в рабочей зоне подшипника чередование вкладышей выполнено по длине и окружности (см. рис. 5), ориентация слоев материала ФУТ перпендикулярна оси вращения вала).

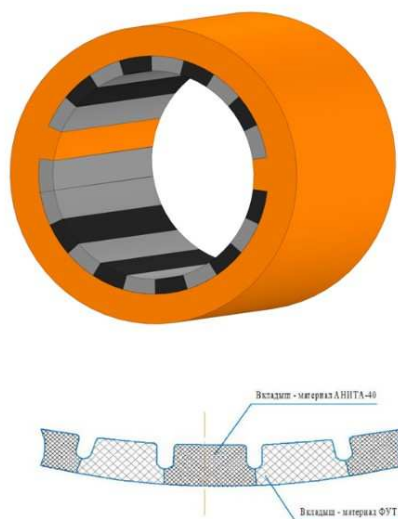


Рис. 4 Подшипник с чередованием по окружности вкладышей из материалов ФУТ и Анита-40 с параллельной ориентацией слоев относительно оси вращения вала

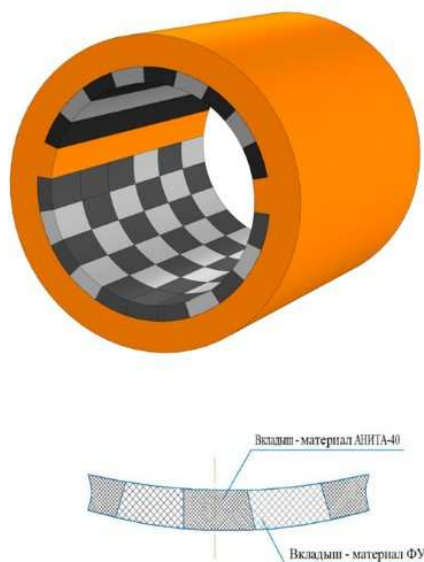


Рис. 5 Подшипник с чередованием по окружности вкладышей из материалов ФУТ и Анита-40 (в рабочей зоне подшипника чередование вкладышей выполнено по длине и окружности, ориентация слоев материала ФУТ перпендикулярна оси вращения вала)

Проведенные исследования показали возможность и перспективность использования в конструктивных элементах систем и механизмов судна, содержащих скользящие и имеющие область трения поверхности, новых высокоэффективных антифрикционных синтетических материалов.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Строительство современных судов выдвигает повышенные требования, в том числе и к судовым дейдвудным устройствам, а значит и к антифрикционным синтетическим материалам, которые используются в данных подшипниках.

К современным судам предъявляются все более высокие требования к длительности эксплуатации до первого технического обслуживания судна, а тем более к межремонтным срокам и, следовательно, повышаются требования к подшипникам в целом и к антифрикционным синтетическим материалам в частности.

Основными факторами, определяющими условия эксплуатации подшипников валопроводов, являются:

- нагрузки от массы гребного винта и элементов валопровода;
- усилия, обусловленные неуравновешенностью вращающихся частей;
- гидродинамические моменты, передаваемые от гребного винта;
- осевое перемещение от влияния упора, создаваемого гребным винтом;
- изгибающие моменты, появляющиеся в результате разцентровки валопровода;
- деформации корпуса судна;
- износ;
- трение;
- воздействие воды или масла;
- воздействие температуры.

Разработка и применение в судостроении новых износостойких синтетических материалов с высокими физико-механическими свойствами, устойчивыми к продолжительной эксплуатации в агрессивной среде, создают новые перспективы в области совершенствования технологии кораблестроения и должны учитываться во всех нормативных документах, разрешающих эксплуатацию судов, созданных по новым технологиям с использованием новых материалов.

В настоящее время в области кораблестроения используется много новых конструктивных элементов и изделий, содержащих синтетические материалы. Появляется необходимость проведения анализа имеющихся требований к антифрикционным синтетическим материалам и, возможно, дополнение Правил РС новыми требованиями, способными увеличить долговечность и износостойкость применяемых во вкладышах подшипников материалов.

Применение этих материалов в конструктивных элементах судна должно быть одобрено РС, а порядок их освидетельствования отражен в нормативно-технической документации органа государственного технического надзора в области морского судостроения и мореплавания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведен анализ современных материалов судовых подшипников скольжения. Результаты анализа могут быть использованы при совершенствовании требований Российского морского регистра судоходства.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, выполненной по заказу РС, на тему «Разработка требований правил Российского морского регистра судоходства к судовым дейдвудным подшипникам из синтетических материалов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубин М.Б., Бахарева В.Е. Подшипники в судовой технике: Справочник. — Л.: Судостроение, 1987 — 344 с.
2. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. — Киев: «Техника», 1985.
3. Степанов Б.П. Создание углепластиковых подшипников судовых валопроводов. Вопросы материаловедения. № 3(35) 2003, ISSN 0132 — 4535.

REFERENCES

1. Rubin M.B., Bakhareva V.E. *Podshipniki v sudovoy tekhnike: Spravochnik* [Bearings in shipboard equipment: reference book] — L.: Sudostroenie., 1987, p. 344.
2. Sirenko G.A. *Antifriktsionnye karboplastiki* [Antifriction carbon fiber-reinforced plastics]. — Kiev: "Tekhnika", 1985.
3. Stepanov B.P. *Sozdanіe ugleplastikovykh podshipnikov sudovykh valoprovodov. Voprosy materialovedeniya* [Construction of bearings made of carbon fiber-reinforced plastics for shipboard shaft line. Material science]. Issue No.3 (35) 2003, ISSN 0132 — 4535.

ОБОЗРЕНИЕ: РС РАЗРАБОТАЛ ТРЕБОВАНИЯ К ВАЛАМ ИЗ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПКМ)

Соответствующий циркуляр № 313-67-1664ц к Правилам классификации и постройки морских судов размещен в открытом доступе в разделе «Онлайн информация — Циркулярные письма» на официальном сайте РС. Документ вступает в силу с 1 января 2022 года.

В ходе разработки новых требований Регистра были проанализированы НИР и другие документы, касающиеся проектирования, методов расчета прочности, технологии изготовления и контроля качества применения полимерных композиционных материалов для судовых валов.

Несмотря на увеличенный по сравнению со стальными валами диаметр и более высокую стоимость, производство валов из ПКМ имеет хорошие перспективы и востребовано на рынке. Среди преимуществ такого оборудования по сравнению с валами из стали можно отметить более высокие характеристики удельной жесткости, удельной прочности. В противоположность им стальные конструкции из-за значительного веса (на 25 — 80 % выше, чем у валов из ПКМ) и возможности возникновения низкочастотного поперечного резонанса выполняются укороченными и соединяются между собой муфтами, чтобы исключить возникновение колебаний вала в диапазоне максимальных оборотов двигателя и последующего разрушения.

Инновационные композитные материалы в настоящее время все активнее используются в судостроительном производстве: допускаются при изготовлении конструкций, деталей оборудования судов и морских сооружений.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.5.011; 662.6/.7:661.721/722

АНАЛИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАНОЛА И ЭТАНОЛА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА НА СУДАХ

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

О.Н. Леонова, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: LeonovaON@cniimf.ru

А.С. Реуцкий, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: ReutskyAS@cniimf.ru

В статье приводятся основные результаты научно-исследовательской работы по разработке научно-технического задела по применению метанола и этанола в качестве судового топлива для поршневых и газотурбинных двигателей. Выполнен ретроспективный анализ практики проектирования и эксплуатации грузопассажирского паромов и судов типа химовоз-продуктовоз, использующих метанол в качестве топлива. Выполнена оценка факторов, затрудняющих или ограничивающих применение спиртов в качестве топлива. Проведен анализ существующих нормативных документов по использованию метанола и этанола в качестве топлива. Результатом работы являются разработанные требования нового раздела части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС, включающих в себя общие положения, требования к конструкции судна и конструкции емкостей для хранения топлива, требования к потребителям топлива на судне, требования к топливной системе, противопожарной защите, защите членов экипажа, находящихся на судне, а также электрическому оборудованию, вентиляции помещений, управлению и автоматике судна.

Ключевые слова: газ как топливо; этанол; метанол

METHANOL AND ETHANOL AS SHIP FUEL: ANALYSIS OF APPLICATION EXPERIENCE

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

O.N. Leonova, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: LeonovaON@cniimf.ru

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

The article discusses the main results of the R&D work aimed at laying the scientific basis for the application of methanol and ethanol as ship fuel for piston and gas turbine type engines. Retrospectively, design and operational aspects of ships using alcohols as fuel (such as cargo and passenger ferry and chemical product tanker) have been reviewed. Existing normative documents have also been reviewed for the requirements for the application of methanol and ethanol as fuel. New draft RS requirements have been proposed. The draft requirements cover the general application issues, ship structures and fuel containments, fire safety and crew safety, electrical equipment, ventilation, ship operation and automatics.

Keywords: gas as fuel, methanol, ethanol

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время международные требования по ограничению содержания углекислого газа, оксидов серы и азота, попадающих в атмосферу в результате сжигания топлива в судовых энергоустановках, определяют вектор поиска новых технических решений в этой области.

В тех акваториях, где установлены особые районы контроля выбросов серы (*SECA — Sulphur Emission Control Areas*), судовладельцы сталкиваются с необходимостью модернизировать имеющиеся у них суда таким образом, чтобы последние удовлетворяли экологическим нормам. Наряду с применением видов низкосернистого нефтяного топлива или дооборудованием судовой системы выпуска отработанных газов специальными катализаторами (скрубберами), одним из перспективных способов снижения содержания вредных веществ в выхлопных газах судовых энергетических установок является использование альтернативных видов топлива: сжиженного природного газа, метанола и этанола.

Продукты горения упомянутых альтернативных видов топлива отличаются экологичностью, однако использование сжиженного природного газа в качестве топлива сопряжено с проблемами в области его хранения и использования. По этой причине в исследовании рассматриваются технические и организационные вопросы внедрения на судах систем использования в качестве топлива метанола и этанола, обеспечивающих снижение выбросов вредных веществ в отработавших газах судовых двигателей и уменьшение вреда, наносимого окружающей среде.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАНОЛА И ЭТАНОЛА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

За рубежом активно проводятся исследования по практической реализации систем применения метанола и этанола в качестве альтернативного топлива для судовых двигателей. В докладе для Европейского агентства по безопасности на море (EMSA) [1] сообщается о результатах использования спиртовых видов топлива на судах. По результатам этих исследований метанол определен как перспективный вид топлива для дизельных двигателей.

На начало 2021 года в мире насчитывалось 25 судов, использующих метанол в качестве топлива (см. рис. 1) [2], что составляет только 0,4 % от общего числа судов, использующих различные технологии для сокращения объема вредных выбросов (скрубберы, СПГ/КПГ, водород, аккумуляторные батареи).



Рис. 1 Структура наличия судов, использующих различные технологии для сокращения объема вредных выбросов [1]

Технические проблемы, возникающие при использовании метанола в качестве топлива для судовых двигателей, относятся к числу решаемых на современном уровне развития науки и техники, что подтверждается обширной зарубежной практикой [4 — 6].

В 2011 году в рамках проекта *SPIRETH* была начата разработка и тестирование методики по переоборудованию двигателя *Wärtsila-Sulzer* модели 8Z40S, которое было продолжено в рамках проекта переоборудования парома *Stena Germanica*. В 2012 году компания *MAN Diesel&Turbo* приняла решение о расширении линейки двигателей, использующих топливо с низкой температурой вспышки. Результатом разработки стала серия двигателей *ME-LGI*. Таким образом, первым судном, использующим метанол в качестве топлива, стал грузопассажирский паром *Stena Germanica* (рис. 2). Судно было построено в 2001 году на верфи *Navantia Carenas Puerto Real* в Испании.



Рис. 2 Грузопассажирский паром *Stena Germanica* [2]

В 2015 году на верфи *Remontova Shipyard* (г. Гданьск, Польша) компанией *Wartsila* совместно с компанией *Stena Teknik* энергетическая установка судна была переоборудована для работы на метаноле. Установленное топливное оборудование позволило использовать 4 среднеоборотных двигателя *Wartsila-Sulzer* модели 8ZAL40S в двухтопливном режиме. На созданной энергетической установке впервые были выполнены практические исследования по применению метанола в качестве моторного топлива. В результате этих исследований была подтверждена возможность работы двигателей в условиях реальной эксплуатации, впервые выявлены преимущества и недостатки использования метанола, проверены технические решения и обоснованность их использования. По результатам замеров при работе главных двигателей судна *Stena Germanica* на метаноле выбросы оксида серы (SO_x) уменьшились на 99 %, оксида азота (NO_x) — на 60 %, двуоксида углерода (CO_2) — на 25 % и твердых частиц — на 95 %.

В период между 2016 и 2018 годом в Южной Корее и Японии были спущены на воду три серии судов типа химовоз-продуктовоз, которые изначально проектировались для работы главных двигателей на метаноле. Головные суда этих серий *Lindanger*, *Taranaki Sun* и *Mari Couva*. Основные характеристики этих судов, а также грузопассажирского парома *Stena Germanica* представлены в табл. 1 [8].

Опыт проектирования и эксплуатации построенных судов позволил пополнить базу знаний об использовании метанола в качестве судового топлива, а также определить способы переоборудования судов, работающих на традиционном нефтяном топливе.

В качестве главных двигателей на всех построенных судах были выбраны двигатели производства фирмы *MAN B&W* вновь разработанной серии *ME-LGIM* (*Liquid Gas Injection Methanol*), работающие как на метаноле, так и мазуте (*HFO*), судовом дизельном топливе (*MDO*) или на морском газойле (*MGO*).

Аппаратное насыщение и вспомогательные системы двухтопливных двигателей серии *ME-LGI* отличаются от их предшественников из серии *ME-GI*, использующих в качестве топлива метан. Это обусловлено физико-химическими характеристиками метанола. Проведенные судовые и лабораторные испытания [4] судовых двигателей, работающих на метаноле, показали, что характеристики двигателей и

Таблица 1

Основные характеристики судов, использующих в качестве топлива метанол

Характеристики	Название судна			
	<i>Stena Germanica</i>	<i>Lindanger</i>	<i>Taranaki Sun</i>	<i>Mari Couva</i>
Тип судна	Грузопассажирский паром	Химовоз-продуктовоз	Химовоз-продуктовоз	Химовоз-продуктовоз
Год постройки (переоборудования)	2001 (2015)	2016	2016	2019
Дедвейт, т	10670	49999	49994	49765
Валовая вместимость	51837	30945	30561	29987
Грузовместимость, м ³	—	50660	52620	49162
Классификационное общество	LR	DNV	NKN	DNV
Длина, м	241,3	186,1	186,0	183,1
Ширина, м	28,7	32,2	32,2	32,2
Осадка, м	6,3	12,86	12,74	13,32
Высота борта, м	9,0	19,1	19,0	19,1
Тип ГД	СОД	МОД	МОД	МОД
Марка ГД	<i>Sulzer-Wartsila 8ZAL40S</i>	<i>MAN B&W 6G50ME-B9-LGIM</i>	<i>MAN B&W 7S50ME-B9-LGIM</i>	<i>MAN B&W 6G50ME-B9-LGIM</i>
Мощность ГД, кВт	4 × 6000	10320	8470	7180
Число и тип двигателей	2 × ВРШ	2 × ВФШ	1 × ВФШ	1 × ВФШ
Эксплуатационная скорость, уз	22,0	14,6	15,2	12,0

параметры их работы являются приемлемыми и незначительно отличаются от аналогичных данных при работе двигателей на традиционных видах топлива. Была доказана правильность заложенных технических решений и возможность их реализации в условиях судовой эксплуатации.

Несмотря на общие положительные тенденции применения метанола в судовых энергетических установках, необходимо отметить, что ограниченный опыт эксплуатации двигателей и недостаточное количество публикаций в открытой печати с качественными оценками выполненных конструктивных изменений двигателей и их параметров при эксплуатации, не позволяет дать однозначное заключение о технико-экономической составляющей их эксплуатации.

В результате анализа полученной в ходе испытаний информации [4], стало возможным обозначить некоторые достоинства и недостатки метанола и этанола по отношению к традиционным видам судового топлива.

Значение теплоты сгорания дизельного топлива превышает аналогичную величину метанола на 40 — 50 %. При этом теплопроизводительность топливовоздушных смесей на основе спирта или нефтяного топлива отличаются незначительно. Данное обстоятельство объясняется высоким значением теплоты испарения метанола, что при сгорании смеси приводит к лучшему наполнению цилиндров и снижению теплонапряженности двигателя. В результате рост мощности двигателя и крутящего момента повышается на 10 — 15%.

Метиловый и этиловый спирты имеют значение температуры кипения ниже значения температуры кипения традиционных видов судового топлива, при любой температуре окружающей среды они остаются жидкими, а при распылении превращаются в пар. Также метанол и этанол характеризуются низкой температурой вспышки. Этот параметр является показателем пожарной опасности, хотя его наличия недостаточно для оценки возможности возгорания. У спиртов температура вспышки составляет 12 — 13 °С, что ниже температуры окружающей среды при нормальных условиях эксплуатации на судне. Таким образом, для предотвращения пожара, требуется создание защитной атмосферы и исключения источников возгорания.

Температура самовоспламенения метанола и этанола выше, чем у традиционного нефтяного топлива, но ниже, чем у сжиженного природного газа. Плотность спиртов ниже плотности традиционного судового топлива, что пагубно сказывается на размещении топливных цистерн на судне из-за вынужденного увеличения их вместимости. Плотность паров метанола близка к плотности воздуха, а плотность паров этанола в 1,6 раза тяжелее воздуха, что ставит под сомнение целесообразность применения этанола в качестве судового топлива из-за опасности его утечки и скопления в судовых помещениях. Область предельной концентрации паров, при которой возможен взрыв, у метанола больше, чем у этанола и судовых топлив — сжиженного природного газа и традиционных нефтяных топлив.

Низкое значение испаряемости метанола в совокупности с относительно высокой температурой самовоспламенения (440 — 464 °С), приводит к затрудненному пуску и смене режима работы двигателей, работающих по циклу Отто. При сжатии воздушного заряда воздуха в цилиндре ДВС температура в конце процесса сжатия является недостаточной для самовоспламенения горючей смеси воздуха с метанолом после

его подачи в цилиндр двигателя, поэтому для воспламенения горючей смеси воздух-метанол в ДВС, работающих по циклу Отто, необходим внешний источник зажигания.

Вопрос замены дизельного топлива на спиртовое топливо сводится к необходимости внесения конструктивных и технологических изменений в топливную систему для обеспечения соответствия метанола требованиям, предъявляемым к моторному топливу и компенсации изменений его состава и свойств. В настоящее время используются разнообразные способы применения метанола в качестве топлива для двигателей, работающих по циклу Дизеля или Тринклера — Сабатэ: использование растворов и эмульсий спиртов в дизельном топливе, использование системы отдельного или прямого впрыска спирта и дизельного топлива, конвертация двигателя для его работы по циклу Отто, впрыскивание метанола с присадкой, повышающей его цетановое число.

Также необходимо отметить, что улучшения эксплуатационных характеристик судовых двигателей при работе на метаноле можно добиться путем применения специальных присадок к топливу и маслам, улучшающих технико-экономические параметры двухтопливных поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Теоретически спиртовые топлива могут применяться во всех типах судовых газотурбинных двигателей (далее — ГТД). Проведение исследований и испытаний по применению метилового и этилового спирта в качестве топлива для судовых ГТД пока не проводилось. Это связано, прежде всего, с небольшим количеством коммерческих судов, оборудованных ГТД. Кроме того, для фирм, разрабатывающих и выпускающих ГТД, в принципе нет каких-либо серьезных проблем в обеспечении применения метанола и этанола в ГТД. Имеются сведения [7] о проведении испытаний по использованию метанола в качестве топлива на стационарных газотурбинных установках и электростанциях. Для этого не потребовалось значительного изменения систем, при этом уменьшился объем обслуживания и чистки оборудования, а также сократились выбросы вредных веществ в атмосферу.

Таким образом, при использовании метанола в качестве топлива можно отметить его преимущества: экологическая чистота (применительно к углекислому газу, оксидам серы и азота в выхлопных газах), неизменно жидкое агрегатное состояние и отсутствие необходимости специальной топливоподготовки.

Помимо преимуществ использования метанола в качестве топлива, следует отметить и его недостатки как моторного топлива, а также продукта производства и потребления:

- производство метанола не является экологически чистым процессом, что само по себе нивелирует положительный экологический эффект от его применения в судовых энергоустановках;
- энергетическая плотность в 0,5 раза меньше аналогичного показателя нефтяного топлива;
- представляет собой агрессивную коррозионную среду, в частности растворяет алюминий и разрушает пластмассы;
- является гидрофильным веществом, что отрицательно сказывается на эксплуатации топливных систем;
- легко воспламеняющаяся жидкость и, в случае протечек, не улетучивается;
- является системным ядом.

При использовании метанола и этанола также следует учитывать факторы, которые оказывают влияние на облик судна, использующего их в качестве топлива. Возникает необходимость размещения на судне дополнительных емкостей, дублирования топливных систем и станций бункеровки.

При использовании спиртов в качестве топлива следует учитывать опасности, которые могут возникать при работе с ними. К таким опасностям относятся:

- пожароопасность: вещества характеризуются низкой температурой вспышки, возникает необходимость в создании защитной атмосферы в рабочей зоне;
- взрывоопасность: большая концентрация паров в воздухе рабочей зоны, у метанола и этанола она больше, чем у СПГ и традиционных сортов нефтяного топлива;
- влияние на здоровье человека: метанол является системным ядом и оказывает пагубное воздействие на нервную систему человека.

Для снижения риска возникновения пожаров и отравления персонала при использовании метанола и этанола следует соблюдать технику безопасности, а экипаж должен иметь средства индивидуальной защиты. В рекомендациях [12] по безопасному обращению с метанолом указывается, что при выборе подходящих материалов, при использовании метанола, необходимо учитывать такие факторы, как тип оборудования (например, насос, двигатель, трубопровод, резервуар для хранения), условия процесса, предполагаемая программа проверки и технического обслуживания, условия эксплуатации, расход, температура и прочее. Все это должно быть принято во внимание при разработке и эксплуатации судовых энергоустановок, использующих спирты в качестве топлива.

НОРМАТИВНАЯ БАЗА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАНОЛА И ЭТАНОЛА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Анализ свойств и характеристик спиртов показал, что их использование усложнено не только проблемами технического характера, но и организационными проблемами, связанными с применением существующей нормативной базы использования метанола и этанола в качестве топлива на судах.

Международным стандартом, регламентирующим подход к конструкции судов, использующих метанол/этанол в качестве топлива, является Международный кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ) [9].

Одновременно со строительством судов, использующих метанол и этанол в качестве топлива, ведется разработка отдельных требований классификационных обществ к таким судам. В настоящее время разработаны требования *DNV* [6], *Lloyds Register* [10], *China Classification Society* [11]. Среди них следует отдельно упомянуть Правила *DNV* [6], где в части 6 «Дополнительные знаки класса» в главе 2 «Пропульсивные установки, производство электроэнергии и вспомогательные установки» содержится раздел 6 «Энергетические установки, использующие топливо с низкой температурой вспышки». В этом разделе сформулированы требования к судам, имеющим в символе класса обозначение **LFL FUELLED**, то есть судам, использующим в качестве топлива вещества с низкой температурой вспышки. Требования [9] не содержат единого раздела предъявляющего требования к конструкции судов, использующих топливо с низкой температурой вспышки, содержание этого раздела включено в другие разделы в виде отдельных положений. В требованиях [9] присутствует раздел по учету технико-эксплуатационных особенностей трех типов судов: танкеры-химовозы, пассажирские суда и суда обеспечения для работы на шельфе.

Международная морская организация (ИМО) также ведет разработку требований к судам, использующим метанол и этанол в качестве топлива. На шестой сессии Подкомитета ССС ИМО от 12.09.2019 утвержден проект циркуляра под названием «Временные руководящие принципы обеспечения безопасности судов, использующих метиловый и этиловый спирт в качестве топлива» [12]. В проекте циркуляра [12] и в требованиях *DNV* [6] содержатся те же разделы, что и в Кодексе МГТ [9] и «Требованиях к судам, оборудованным для использования газа или топлива с низкой температурой вспышки» Российского морского регистра судоходства (РС) [13]. В документах ИМО и *DNV* представлены требования, предъявляемые к конструкциям емкостей для хранения топлива (*EXT*), потребителям топлива (метанола/этанола) на судне, топливной системе, противопожарной защите, вентиляции помещений и другие требования.

В результате проведенной научно-исследовательской работы были разработаны специальные требования к судам, использующим в качестве топлива метанол и этанол или другие виды топлива с низкой температурой вспышки. Эти требования нашли отражение в виде нового раздела части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС. В этот раздел вошли как общие положения, включающие область применения, определения и дополнительные символы класса, так и требования, касающиеся конструкции судна, конструкции топливных емкостей для метанола и этанола, потребителей топлива на судах, топливной системы, противопожарной защиты, систем вентиляции, инертизации, контроля, управления и автоматики, а также электрического оборудования и защиты экипажа.

ВЫВОДЫ

Конечной целью проведенного исследования являлся анализ научно-технического задела в части использования спиртов в качестве топлива, а также разработка требований к судовым двигателям, которые могут работать на метаноле и этаноле и разработка требований Правил Российского морского регистра судоходства, которые будут применяться к таким типам судов.

В ходе исследования был выполнен обзор существующих судов, использующих метанол в качестве топлива, выполнен анализ опасностей, связанных с применением спиртов, изучены физико-химические свойства данных веществ, проведен анализ их применения. Метиловые и этиловые спиртовые виды топлива обладают хорошим потенциалом и альтернативой для сокращения, как выбросов, так и углеродного следа судовых операций метанола и этанола в стандартных судовых двигателях различного типа (двухтактных и четырехтактных) и газотурбинных двигателях. Также выявлены факторы, которые затрудняют и ограничивают применение метанола и этанола в качестве топлива.

Практическим результатом выполненного исследования выступают разработанные требования нового раздела части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС, включающие в себя общие положения, требования к конструкции судна и конструкции емкостей для хранения топлива, требования к потребителям топлива на судне (типы двигателей, их работа и эксплуатация), требования к топливной системе, противопожарной защите, защите членов экипажа, находящихся на судне, а также электрическому оборудованию, вентиляции помещений, управлению и автоматике судна.

Статья написана по результатам научно-исследовательской работы «Разработка требований по применению на судах в качестве топлива метанола и этанола», выполненной по заказу Российского морского регистра судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping, EMSA, 2015. — 183 p.
2. Alternative fuels insight. URL: <https://afi.dnvgl.com/>
3. Официальный сайт Stena Line BV. URL: <https://www.stenaline.nl/en-GB-nl/ships/stena-germanica/>.
4. Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series, MAN Diesel & Turbo.
5. Methanol as a Marine Fuel Report 2015, Methanol Institute, FCBI Energy.
6. DNV GL Section 6 "Low flashpoint liquid fueled engines — LFL fueled", 2019, 169 — 200 pp.
7. Савицкий В.Д., Терновоя Л.В. Применение метанола в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, Проблемы машиностроения, 2010, Т. 13, № 6.
8. База данных мирового флота Sea-web (TM) Ships. URL: <https://maritime.ihs.com/>
9. Международный Кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ). MSC.391(95), 2015. — 149 с.
10. Lloyd's Register. Rules for the Classification of Methanol Fueled Ships. 2019. 32 p.
11. China Classification Society. Guidelines for Ships Using Alternative Fuels. 2017. 44 p.
12. IMO. Interim Guidelines for the Safety of Ships using methyl/ethyl Alcohol as Fuel. 2019.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна, 2020. Дата обновления 30.09.2020.

REFERENCES

1. Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping, EMSA, 2015. — 183 p.
2. Alternative fuels insight. URL: <https://afi.dnvgl.com/>
3. Stena Line BV Official Website. URL: <https://www.stenaline.nl/en-GB-nl/ships/stena-germanica/>
4. Using Methanol Fuel in the MAN B&W ME-LGI Series, MAN Diesel & Turbo.
5. Methanol as a Marine Fuel Report 2015, Methanol Institute, FCBI Energy.
6. DNV GL Section 6 "Low flashpoint liquid fueled engines — LFL fueled", 2019, 169 — 200 pp.
7. Savicky V.D., Ternovaya L.V. *Primenenie metanola v kachestve topliva dlja dvigatelej vnutrennego sgoraniya* [Application of methanol for internal combustion engines] *Problemy mashinostroeniya* [Problems of Machinery Building], 2010, vol. 13, No. 6.
8. Sea-web (TM) Ships. URL: <https://maritime.ihs.com/>
9. International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). MSC.391(95), 2015. — 149 p.
10. Lloyd's Register. Rules for the Classification of Methanol Fueled Ships. 2019. 32 p.
11. China Classification Society. Guidelines for Ships Using Alternative Fuels. 2017. 44 p.
12. IMO. Interim Guidelines for the Safety of Ships using methyl/ethyl Alcohol as Fuel. 2019.
13. Rules for 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, 2020. Date 30.09.2020 (In Russian)

УДК 51-7:621.431

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

А.И. Епихин, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», Новороссийск, e-mail: bsmbeton@mail.ru

Е.В. Хекерт, доктор технических наук, ФГБОУ «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», Новороссийск, e-mail: zur_mga@nsma.ru

Статья посвящена рассмотрению особенностей перспективных способов оптимизации систем управления СЭУ на базе нечеткой логики и фрактального анализа. С целью конструирования эффективного управленческого контура СЭУ предложено использовать синергетические мехатронные системы на основе интеллектуальных технологий с принципиально новыми качествами, которые позволяют более эффективно решать задачи управления путем фрактального анализа временных рядов для повышения адекватности прогнозирования за счет углубленного анализа причин, вызывающих кризисные ситуации. Практические аспекты проведения фрактального анализа проанализированы на примере двухтактного двигателя с наддувом и охлаждением воздуха.

Ключевые слова: фрактальный анализ, СЭУ, управление, нечеткая логика, временные ряды, тренд, показатель Херста

PROMISING METHODS FOR OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEMS FOR SHIP POWER PLANTS BASED ON FUZZY LOGIC AND FRACTAL ANALYSIS

A.I. Epikhin, PhD, assistant professor, State Maritime University named Admiral F.F. Ushakov, Novorossiysk, e-mail: bsmbeton@mail.ru

E.V. Khekert, DSc, assistant professor, State Maritime University named Admiral F.F. Ushakov, Novorossiysk, e-mail: zur_mga@nsma.ru

The article considers the specifics of modern approaches to the construction of optimal control systems for ship power plants based on fuzzy logic and fractal analysis. In order to design an effective management contour of the ship power plant, it has been proposed to use synergetic mechatronic systems based on intelligent technologies. Those are based on fundamentally new properties that make more effective solution of management problems possible with the help of fractal analysis of time series to improve the adequacy of forecasting by in-depth analysis of the causes for crises. Practical aspects of fractal analysis have been analyzed using of a two-stroke engine, supercharged and air-cooled, as an example.

Keywords: fractal analysis, ship power plants, control, fuzzy logic, time series, trend, Hurst index

ВВЕДЕНИЕ

Проблема управления динамическими объектами в условиях неопределенности, то есть задача построения вариативных систем управления, является одной из центральных в современной теории и практике, решению которой посвящены работы Josiney A Souza, Keighobadi Jafar, Shi Wenrui, Dong Hairong, Shi Jiasheng, Н.Г. Павлова, Ж.У. Севинов, А.В. Мищенко, А.В. Пилюгина.

В тоже время анализ научных трудов по теме исследования показал, что существующие методы и приемы управления СЭУ на практике сталкиваются с определенными трудностями. Например, математические модели прогнозирования устойчивости работы главных машин при малой частоте вращения должны учитывать априорную информацию, характеризующую давление рабочего цикла и впрыска, степень сжатия, пропульсивный КПД, полезный упор движителя, которые трудно поддаются математическому описанию.

Все это обуславливает необходимость разработки новых подходов и механизмов, которые способны воспроизводить и прогнозировать сложные зависимости, сопровождающиеся нечеткими формализованными задачами.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей перспективных способов оптимизации систем управления СЭУ на базе нечеткой логики и фрактального анализа.

1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проектирование и разработка перспективных систем управления современными судовыми энергетическими установками (СЭУ) является сложной задачей, включающей в себя исследования и проектные работы по нескольким направлениям: механика, гидродинамика, управление и энергетика. Такие характеристики СЭУ как габариты (механика) определяются во многом параметрами источников и преобразователей энергии (энергетика) и влияют на процессы движения в водной среде (гидродинамика). Система управления СЭУ должна учитывать влияние окружающей среды (сопротивление движению судна, метеобстановка, упор гребного винта) и, насколько это возможно, предусматривать реакцию системы на изменение воздействий внутреннего и внешнего характера.

Актуализируются данные вопросы в контексте действия ряда международных требований и ограничений. Например, согласно резолюции Комитета по защите окружающей среды (Marine Environment Protection Committee) ИМО МЕРС.213 (63) для каждого судна обязательным является разработка и применение плана управления его энергетической эффективностью. Также в соответствии с положениями выше упомянутой резолюции к техническим и эксплуатационным мерам по снижению выбросов парниковых газов отнесены разработка и использование судовых планов энергетической эффективности (SEEMP) для всех типов судов, как новых, так и существующих, с предварительной разработкой эксплуатационного критерия энергетической эффективности судна *EEDI* [1].

При этом следует отметить, что СЭУ вследствие своих специфических технологических особенностей, является одним из ярких примеров систем с распределенными параметрами, которые работают в динамических режимах. Процессы, происходящие в СЭУ, описываются системами уравнений в частных производных. В свою очередь, математические модели для управления СЭУ характеризуются значительным объемом необходимой для их описания информации, высоким порядком и большим количеством параметров, а также нелинейностью критериев оптимизации и ограничений.

1.1 Описание методов исследования

Управление СЭУ требует использования специальных информационных технологий для создания или совершенствования управляющих систем, на основе интеллектуальных технологий, таких как нечеткая логика. Последние достижения науки и техники свидетельствует о том, что в рамках интеллектуальных разработок для управления сложными динамическими системами по типу СЭУ в качестве эффективного инструментария целесообразно использовать фрактальную размерность, а не стандартные отклонения, характеризующие изменчивость случайных явлений, которая логично интегрирована в модели на основе нечеткой логики. Исходя из того, что процесс принятия решения относительно управления сложными динамическими системами характеризуется значительной степенью неопределенности и волатильности, целесообразным является применение различных классов фракталов и относительно нового подхода, фрактального анализа, что подтверждает важность и перспективность выбранной темы статьи.

Известно, что работа СЭУ является нестационарным стохастически-хаотическим процессом, который развивается во времени [2]. Соответственно в контур управления СЭУ поступают различные данные в виде ансамбля временных рядов: $x(t) = \{x_j(t)\}, j = 1, 2, \dots, n; t \in T$, где T — время наблюдения.

Поскольку основные характеристики СЭУ меняются во времени, прогнозирование таких временных рядов связано с определенными трудностями, поэтому некоторые ученые предлагают использовать адаптивные системы управления СЭУ.

Адаптивные системы управления в сравнении с традиционными подходами используют дополнительный контур самонастройки, что обуславливает их несомненное преимущество. При этом ключевой недостаток адаптивных систем управления заключен в том, что они не во всех случаях позволяют реализовать робастное управление. Также следует отметить, что в большинстве своем алгоритмы адаптации разрабатываются при отсутствии неконтролируемых возмущений и соответственно не предоставляют возможности устанавливать характеристики объекта в процессе идентификации. Кроме того, эти алгоритмы достаточно сложны в реализации и работоспособны только тогда, когда отсутствуют случайно возникающие возмущения и выполняется гипотеза о квазистационарности объекта управления на протяжении всего периода настройки регулятора [3].

В связи с этим, целесообразно для управления СЭУ использовать интеллектуальные системы управления на базе нечеткой логики, которые позволяют конструировать синергетические мехатронные системы с принципиально новыми качествами. Синергический эффект SE управления в рамках таких систем представляет собой совокупность эффектов, полученных в результате их объединения и синхронизации во времени и пространстве, и достигается он только в случае принадлежности к системно-синергетическому объединению этих эффектов:

$$SE = Ef_{EMK} \cap Ef_{HE} \cap Ef_{IT} \cap Ef_{CAK},$$

где Ef_{EMK} — эффект от внедрения электромеханических инструментов управления;
 Ef_{HE} — эффект от использования передовой микропроцессорной техники и силовой электроники;
 Ef_{CAK} — эффект от применения современных ИКТ-технологий и внедрения в контур управления автоматизированных систем;
 Ef_{IT} — эффект от включения в систему управления интеллектуальных технологий.

1.2. Изложение основных данных

Рассмотрим на практическом примере особенности построения и функционирования интеллектуальной системы управления СЭУ, основу которой составляет нечеткая логика, а методологическим аппаратом решения поставленных задач является фрактальный анализ, позволяющий определить уровни персистентности хаотических информационных потоков в системе управления.

В качестве экспериментальной установки для моделирования будем использовать двухтактный двигатель с наддувом и охлаждением воздуха.

В процессе построения модели необходимо решить следующие задачи:

- объединить совокупность методов фрактального анализа временных рядов в единую методологию;
- проанализировать фрактальную размерность и показатель Херста на основе реализации процедуры последовательного R/S -анализа;
- оценить автокорреляционное влияние предыдущих значений динамических рядов на следующие значения и определить будущие тенденции;
- определить пространственные размерности достигнутых динамических процессов.

Рассмотрим трендовые характеристики следующих временных рядов $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$, где $A(t)$ — среднее эффективное давление, $B(t)$ — удельный индикаторный расход топлива, $C(t)$ — количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, $D(t)$ — количество отработавших газов.

Дискретизация временных рядов проведена с шагом $\Delta t = 0,84$ с., который определен на основе теоремы Шеннона — Котельникова.

Для обработки полученных данных использовались программы и приложения, разработанные в среде программного продукта MatLab. Для поиска математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения рассчитывались стандартные функции в виде: $M = \text{mean}(T)$ — математическое ожидание; $S = \text{std}(T)$ — среднее отклонение; $Ds = (S)^2$ — дисперсия.

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки массивов исследуемых временных рядов, характеризующих работу двигателя

Исследуемый индикатор	Математическое ожидание	Дисперсия	Среднеквадратическое отклонение
$A(t)$	115,403	7,332	2,840
$B(t)$	157,334	57,646	7,951
$C(t)$	258,061	6,511	2,665
$D(t)$	0,602	0,125	0,372

На следующем этапе для исследуемых временных рядов было найдено значение показателя Херста H . В процессе определения фрактальной размерности D , пространственной размерности n динамического процесса управления двигателем, а также меры корреляции C использовались следующие формулы:

$$D = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\log N(d)}{\log(1/d)},$$

$$N(d) \approx 1/d^D, \text{ когда } d \rightarrow 0: N \cdot d^D = 1 \text{ и } C = 2^{2H-1} - 1.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов показателей хаотичности временных рядов

Исследуемый временной ряд	Показатель Херста H	Фрактальная размерность D	Пространственная размерность n	Мера корреляции C
$A(t)$	0,711	1,489	2	0,246
$B(t)$	0,955	1,245	2	0,733
$C(t)$	0,833	1,367	2	0,471
$D(t)$	0,816	1,384	2	0,439

Как видно из табл. 2, показатель Херста H для всех сигналов больше 0,5. Таким образом, временные ряды имеют определенную хаотичность, но динамика данных сигналов не изменится и будет развиваться в том же направлении, что и в прошлом. Это позволяет с учетом особенностей процесса работы двухтактного двигателя решать задачи прогнозирования и раннего выявления возможных изменений в условиях функционирования СЭУ с помощью вычисления показателя Херста H в реальном времени.

О хаотичности процесса работы двигателя свидетельствует и тот факт, что фрактальная размерность D для всех исследуемых параметров не является целым числом. Однако поскольку $D \in [1,0; 2,0]$ и $D < 1,55$, то такой хаос является управляемым. Значение пространственной размерности $n=2$ указывает на количество факторов, участвующих в данном динамическом процессе.

Преимуществом полученных результатов исследования уровней персистентности параметров и показателей процесса работы двигателя является то, что это позволяет определить фрактальную и пространственную размерность каждого временного ряда. Показатель Херста дает возможность установить такое важное свойство для процесса управления двигателем как трендовость. Этот индикатор является универсальным и применим для любых временных рядов, даже с неизвестными делениями.

Особое значение при исследовании фрактальных процессов имеет выявление и устранение краткосрочной зависимости, характерной для авторегрессионных процессов. Линейная зависимость увеличивает значение показателя Херста и демонстрирует эффект долгосрочной памяти. Для устранения краткосрочной зависимости необходимо значение временного ряда процесса $S(t)$ регрессировать как зависимую переменную относительно $S(t-1)$. Далее найти линейную зависимость между ними и провести R/S -анализ остатка $X(t) = S(t) - [(a + bS(t-1))]$. Если исходный ряд имел долгосрочную память, то зависимость сохраняется, в то время как краткосрочная зависимость устраняется.

2. АНАЛИЗЫ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проанализируем для режимов работы двигателя авторегрессионные $AR(1)$ -разности на определенном временном промежутке. Эти разности используются для устранения или сведения к минимуму линейной зависимости. Линейная зависимость может сместить показатель Херста и придать ему значимости (когда нет долгосрочных трендов), то есть вызвать ошибку первого рода. При использовании авторегрессионных $AR(1)$ -разностей смещение будет сведено к минимуму. Такой процесс называют предварительным отбеливанием или удалением трендов [4]. В случае R/S -анализа удаление трендов устранит серийную корреляцию.

Процедура нахождения первой разности равноценна изъятию авторегрессионной зависимости и линейного тренда. Это часто дает возможность получить стационарный в широком смысле, ряд, который исследован на стационарность по критериям серий, инверсий и т.д.

Поведение во времени R/S -траектории, представленной на рис. 1, свидетельствует о хаотическом поведении временного ряда (среднее эффективное давление), что соответствует белому шуму, которому свойственна частая смена тренда работы двигателя.

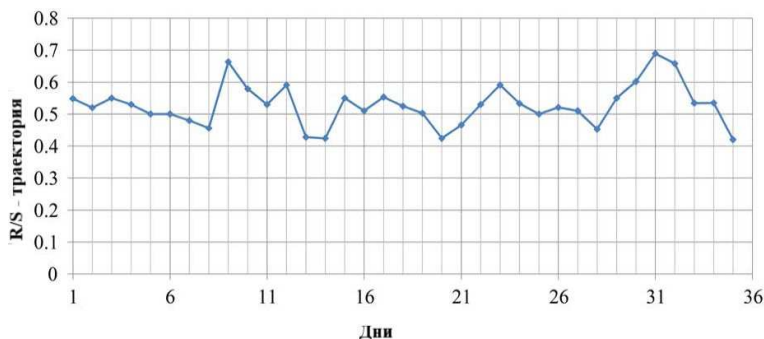


Рис. 1 Результат R/S -анализа графика работы двигателя (среднее эффективное давление)

Результаты R/S -анализа графиков работы двигателя и определение показателя Херста повышают эффективность прогноза и управления СЭУ в период обнаруженного хаотического поведения временного ряда [5]. Это в свою очередь требует особого подхода и внимания к обеспечению оптимального и стабильного теплового состояния деталей и узлов двигателя, своевременной продувки и очистки цилиндров от отработавших газов.

ВЫВОДЫ

Актуальность исследования заключается в том, что, используя выявленные свойства фрактала относительно ретроспективной информации о работе СЭУ, с помощью нечеткой логики можно определить периоды нестабильного состояния системы для адекватного прогноза безотказности ее работы и эффективного управления в будущем.

Таким образом, подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы. Традиционные методы прогнозирования поведения СЭУ на практике сталкиваются с определенными трудностями, когда обнаруживается хаотическое поведение временного ряда, поскольку математические модели процесса должны учитывать многочисленные факторы, влияющие на его динамику. Интеллектуальные системы управления на базе нечеткой логики, которые позволяют конструировать синергетические мехатронные системы с принципиально новыми качествами позволяют более эффективно решать задачи управления путем фрактального анализа временных рядов, который способствует повышению адекватности прогнозирования за счет углубленного анализа причин, вызывающих кризисные ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khimich V.L. et al. The method of diagnosing objects of the ship power plant of inland navigation vessels // Journal of physics. Conference series. 2019. Volume 1177; pp. 14 — 21.
2. Ходунков В.П. Тепловые и технологические задачи проектирования и эксплуатации судовых энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 2. с. 150 — 155.
3. Shi J. Robust stabilisation for a class of stochastic T–S fuzzy descriptor systems via dynamic sliding-mode control // IET control theory & applications. 2020. Volume 14: Number 10; pp. 1346 — 1357.
4. Lin L., Lin W., Huang S. Group object detection and tracking by combining RPCA and fractal analysis // Soft computing. 2018. Vol 22; Number 1; pp. 231 — 242.
5. Казиахмедов Т.Б. Фрактальный анализ и решение задач для выявления особенностей временных рядов при диагностике систем // Вестник НВГУ № 3/2015. ФГБОУ ВО "Нижевартовский государственный университет", Нижневартовск. 2015. с. 20 — 26.

REFERENCES

1. Khimich V.L. et al. The method of diagnosing objects of the ship power plant of inland navigation vessels // Journal of physics. Conference series. 2019. Volume 1177; pp. 14 — 21.
2. Hodunkov V.P. *Teplovye i tekhnologicheskie zadachi proektirovaniya i ekspluatatsii sudovyh energeticheskikh ustanovok* [Heat and technological issues of designing and operating ship power plants] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Priborostroenie. 2019. T. 62. No. 2. P. 150-155. (In Russian)
3. Shi J. Robust stabilisation for a class of stochastic T–S fuzzy descriptor systems via dynamic sliding-mode control // IET control theory & applications. 2020. Volume 14: Number 10; pp. 1346 — 1357.
4. Lin L., Lin W., Huang S. Group object detection and tracking by combining RPCA and fractal analysis // Soft computing. 2018. Vol 22; Number 1; pp. 231 — 242.
5. Kaziahmedov T.B. *Fraktalny analiz i reshenie zadach dlya vyjavleniya osobennostej vremennyh ryadov pri diagnostike sistem* [Fractal analysis and task solution to determine time series properties during system diagnostics] // Vestnik NVGU № 3/2015. FGBOU VO "Nizhnevartovskiy gosudarstvennyy universitet", Nizhnevartovsk. 2015. pp. 20 — 26.



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 629.123:621.31

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА СУДАХ С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ

А.В. Григорьев, канд. техн. наук, АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург,
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

С.М. Малышев, АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург

А.Ю. Васильев, АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург

В последние годы в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) находят все более широкое применение полупроводниковые преобразователи электроэнергии (ППЭ). ППЭ применяются в судовых системах электродвижения (СЭД), частотно-регулируемом электроприводе, вентильных генераторных агрегатах. Применение ППЭ приводит к снижению качества электроэнергии в судовой сети, в частности повышению коэффициента гармонических составляющих напряжения. Правилами Российского морского регистра судоходства (РС) регламентируются максимально допустимые искажения в судовой сети, что необходимо для правильного функционирования судового электрооборудования. Для повышения качества электроэнергии используют различные решения, в том числе находят применение фильтро-компенсирующие устройства, трехобмоточные трансформаторы, электромашинные преобразователи. В статье проводится анализ схемотехнических решений СЭЭС и СЭД, позволяющих уменьшить коэффициент гармонических составляющих напряжения в судовой сети.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь электроэнергии, система электродвижения, качество электроэнергии, коэффициент гармонических составляющих напряжения

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SHIP ELECTRICAL EQUIPMENT ON SHIPS WITH ELECTRIC PROPULSION

A.V. Grigoryev, PhD, JSC "NPC "Electrodvizhenie sudov", St. Petersburg, e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

S.M. Malyshev, JSC "NPC "Electrodvigenie sudov", St. Petersburg

A.Yu. Vasilyev, JSC "NPC "Electrodvigenie sudov", St. Petersburg

In recent years, semiconductor power converters have been increasingly used in ship's electric power systems. Semiconductor power converters are used in ship's electric propulsion systems, frequency-controlled electric drive, valve-type generator sets. The use of semiconductor power converters leads to a decrease in the quality of electricity in the ship's network, in particular, the increase of voltage harmonic components distortion. The Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RS) regulate the maximum permissible distortion in the ship's mains, which is necessary for the proper functioning of ship electrical equipment. Various solutions are applied to improve the quality of electrical power supply, including filter-compensating devices, three-winding transformers, electric machine converters. The article analyzes the circuit design solutions of ship's electric power systems and ship's electric propulsion systems allowing to reduce the voltage harmonic components distortion in the ship mains.

Keywords: semiconductor converter of electric power, electric propulsion system, quality of electric power, voltage harmonic components distortion

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) находят все более широкое применение полупроводниковые преобразователи электроэнергии (ППЭ). ППЭ применяются в судовых системах электродвижения (СЭД), в составе валогенераторных установках (ВГУ), частотно-регулируемом электроприводе, вентильных генераторных агрегатах. Применение ППЭ приводит к снижению качества электроэнергии в судовой сети, в частности, повышается коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения (K_u). Правилами Российского морского регистра судоходства (РС) регламентируются максимальные искажения в судовой сети, что необходимо для правильного функционирования судового электрооборудования.

Для повышения качества электроэнергии в судовой сети необходимо использовать дополнительные фильтро-компенсирующие устройства или закладывать необходимые схемотехнические решения СЭЭС с СЭД на стадии проектирования.

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Наиболее широкое применение ППЭ нашли в судовом регулируемом электроприводе и, прежде всего, в СЭД. В СЭД первого поколения для питания гребных электродвигателей (ГЭД) постоянного тока использовались генераторы постоянного тока. Регулирование частоты вращения ГЭД производилось по принципу «генератор-двигатель».

Для питания общесудовых приемников электроэнергии использовалась вспомогательная судовая электростанция (СЭС) переменного тока. Искажений электроэнергии в судовой сети переменного тока в таких системах практически не происходило (см. рис. 1).

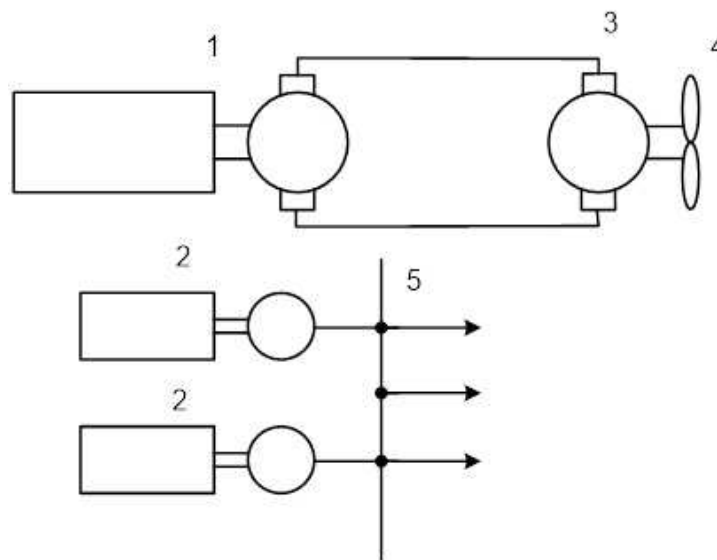


Рис. 1 Структурная схема СЭЭС с СЭД постоянного тока и вспомогательной СЭС переменного тока:

1 — главный дизель-генератор; 2 — вспомогательный дизель-генератор;

3 — ГЭД; 4 — гребной винт; 5 — ГРЩ

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ ДВОЙНОГО РОДА ТОКА

С развитием полупроводниковой техники для питания ГЭД постоянного тока стали применять неуправляемые выпрямители (НВ). В качестве главных генераторов используются синхронные генераторы переменного тока с электромагнитным возбуждением. Регулирование напряжения, подводимого к ГЭД постоянного тока, производилось за счет генераторов переменного тока. В связи с этим на судне, как и в предыдущем случае, использовалась вспомогательная СЭС переменного тока для питания общесудовых систем. СЭЭС с СЭД двойного рода тока и вспомогательной СЭС переменного тока представлена на рис. 2.

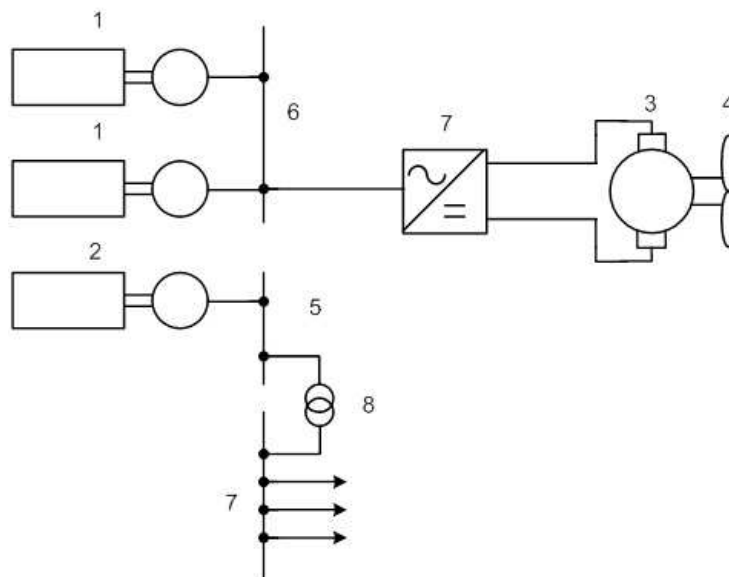


Рис. 2 Структурная схема СЭЭС с СЭД двойного рода тока и вспомогательной СЭС переменного тока:

1 — главный дизель-генератор; 2 — вспомогательный дизель-генератор;
3 — ГЭД; 4 — гребной винт; 5 — ГРЦ; 6 — ЩЭД; 7 — НВ

На шинах щита электродвижения (ЩЭД) в СЭЭС данного типа, величина напряжения изменялась в широком диапазоне, а коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения (K_u) значительно превосходил допустимую Правилами РС величину. На ГРЦ вспомогательной СЭС переменного тока K_u находится в допустимых РС пределах. Существенным недостатком данных СЭЭС являлось наличие двух СЭС, что существенно повышало стоимость и снижало массогабаритные показатели электроэнергетической установки.

После появления управляемых выпрямителей (УВ), построенных на однооперационных тиристорах, появилась возможность создания единых СЭЭС, в которых главные генераторы питают как гребные электрические установки (ГЭУ) двойного рода тока, так и общесудовые приемники электроэнергии. УВ в данных СЭЭС напрямую подключаются на шины ЩЭД, а ГРЦ, в связи с высоким значением K_u , получает питание от ЩЭД через электромашинные преобразователи.

Единая СЭЭС с СЭД двойного рода тока и вспомогательной СЭС переменного тока представлена на рис. 3.

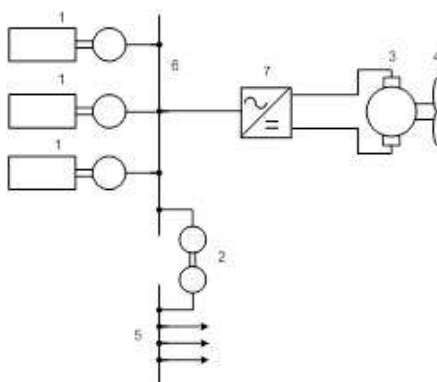


Рис. 3 Структурная схема единой СЭЭС с СЭД двойного рода тока с УВ:
 1 — главный дизель-генератор; 2 — электромашинный преобразователь; 3 — ГЭД;
 4 — гребной винт; 5 — ГРЩ; 6 — ЩЭД; 7 — УВ

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

С появлением полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ) в судостроение стали применяться системы электродвижения переменного тока. В СЭД переменного тока первого поколения для питания синхронных ГЭД переменного тока применялись ППЧ с непосредственной связью, построенные на однооперационных тиристорах. ППЧ данного типа вносили значительные искажения в судовую сеть, в связи с чем, в составе СЭЭС использовались две СЭС переменного тока — главная, для питания СЭД, и вспомогательная, для питания общесудовых приемников электроэнергии.

В последние годы в связи с развитием полупроводниковой техники наиболее широкое применение стали находить ППЧ со звеном постоянного тока, построенные на базе неуправляемых выпрямителей и автономных инверторов напряжения на базе IGBT транзисторах. Для повышения качества электроэнергии и снижения K_u в составе СЭД стали применять ППЧ с двумя неуправляемыми выпрямителями на входе, включенными последовательно или параллельно, получающими питание от двух вторичных обмоток трехобмоточного трансформатора. Применение трехобмоточного трансформатора с двумя обмотками, сдвинутыми в пространстве, позволяет добиться требуемого качества электроэнергии в судовой сети без применения дополнительных фильтро-компенсирующих устройств или вращающихся электромашинных преобразователей.

Единая СЭЭС с СЭД переменного тока с ППЧ на базе НВ-АИ и трехобмоточными трансформаторами представлена на рис. 4.

Дальнейшее развитие полупроводниковой техники связано с применением в составе СЭД переменного тока ППЧ со звеном постоянного тока на базе активных выпрямителей (АИ). Применение АВ с ШИМ управлением позволило отказаться от установки трехобмоточных трансформаторов в составе СЭД. При этом K_u в судовой сети значительно снижается и не требуется использовать дополнительные фильтро-компенсирующие устройства. Единая СЭЭС с СЭД переменного тока и ППЧ на базе активного выпрямителя представлена на рис. 5.

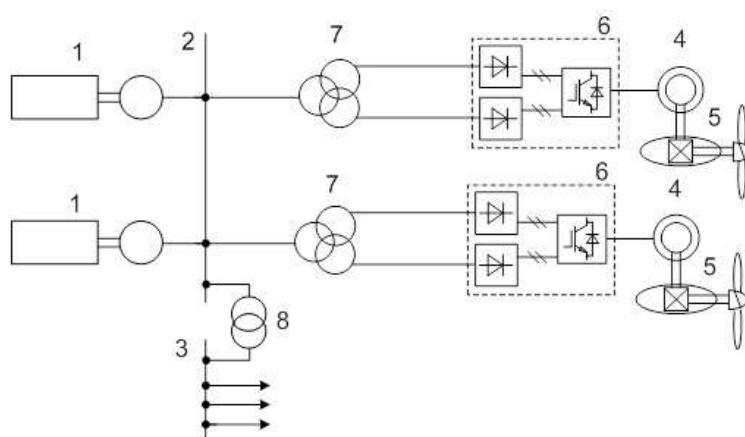


Рис. 4 Структурная схема единой СЭЭС с СЭД переменного тока с ППЧ по типу НВ-АИ и трехобмоточными трансформаторами:
1 — главный дизель-генератор; 2, 3 — ГРЩ; 4 — ГЭД; 5 — винто-рулевая колонка; 6 — ППЧ по типу НВ-АИ;
7 — трехобмоточный трансформатор, 8 — понижающий трансформатор

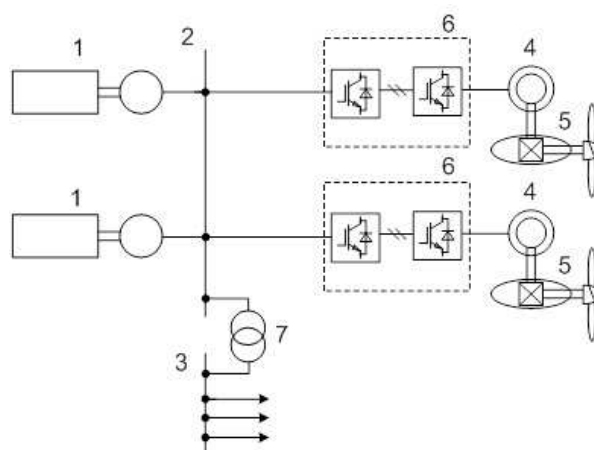


Рис. 5 Структурная схема единой СЭЭС с СЭД переменного тока с ППЧ по типу АВ-АИ:
1 — главный дизель-генератор; 2, 3 — ГРЩ; 4 — ГЭД; 5 — винто-рулевая колонка;
6 — ППЧ по типу АВ-АИ; 7 — понижающий трансформатор

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ВЕНТИЛЬНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

На судах морского флота наиболее широкое применение в качестве источников электроэнергии в настоящее время находят генераторные агрегаты (ГА), работающие с постоянной частотой вращения. Данные ГА напрямую подключены к главному распределительному щиту (ГРЩ). К достоинствам ГА, работающих с постоянной частотой вращения, следует отнести низкую стоимость и хорошие масса-габаритные показатели.

В единых СЭЭС с СЭД нагрузка ГА меняется в широком диапазоне, в связи с чем значительно снижается их экономичность и надежность. Решением данной проблемы является применение вентильных ГА, состоящих из приводного двигателя, генератора и ППЭ. Вентильные ГА работают с переменной частотой вращения по оптимальной с точки зрения расхода топлива характеристике, а ППЭ поддерживают постоянство параметров электроэнергии в судовой сети.

Распределение электроэнергии в единых СЭЭС с СЭД, в случае применения вентильных ГА, целесообразно производить на постоянном токе. При этом повышается экономичность СЭЭС, уменьшается количество ППЧ, значительно упрощается система управления и регулирования ГА и СЭД. Кроме того,

решается вопрос качества электроэнергии в судовой сети. В СЭЭС данного типа общесудовые приемники электроэнергии получают питание от вспомогательного инвертора напряжения, подключенного к ЩЭД постоянного тока.

На рис. 6 представлена единая СЭЭС с вентильными ГА, СЭД переменного тока и распределением электроэнергии на постоянном токе.

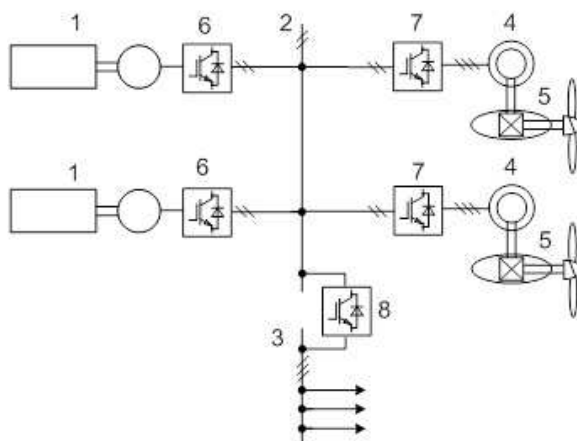


Рис. 6 Структурная схема единой СЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе:

1 — главный дизель-генератор; 2 — ЩЭД; 3 — ГРЩ;
4 — ГЭД; 5 — винто-рулевая колонка; 6 — АВ; 7, 8 — АИ

Электроэнергию в данной СЭЭС вырабатывают вентильные ГА, которые работают с переменной частотой вращения. АВ стабилизирует номинальное значение напряжения в судовой сети постоянного тока и подключены к ЩЭД. АИ преобразуют электроэнергию постоянного тока в электроэнергию переменного тока и питают ГЭД, вращающие ВРК, и общесудовые приемники электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Внедрение единых СЭЭС и системами электродвижения с ППЧ, связано с решением проблемы качества электроэнергии в судовой сети. Для снижения коэффициента гармонических составляющих напряжения в судовой сети в единых СЭЭС с СЭД применяют фильтро-компенсирующие устройства, вращающиеся электромашинные преобразователи и трехобмоточные трансформаторы, что снижает массогабаритные показатели, надежность и КПД, повышает стоимость.

2. Уменьшить коэффициент гармонических составляющих напряжения до допустимого уровня возможно путем применения в СЭД современных ППЧ со звеном постоянного тока, выполненных на базе активных выпрямителей.

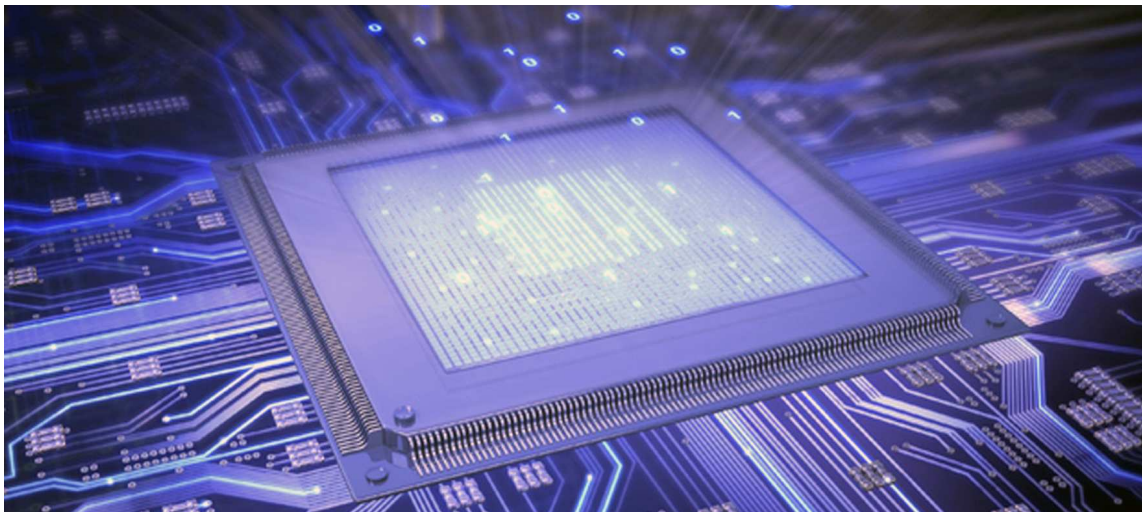
3. Перспективным схемотехническим решением в единых СЭЭС является применение вентильных ГА и распределение электроэнергии на постоянном токе. Данные СЭЭС имеет ряд преимуществ, среди которых следует выделить улучшение массогабаритных показателей и высокий КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота. // Вестник Государственного университета морского и речного флота. — 2015. — № 5 (27). — с. 40 — 46.
2. Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. — Л.: Судостроение, 1990.
3. Качество электрической энергии на судах: справочник / Под ред. В.В. Шейнихович. — Л.: Судостроение, 1988.
4. Григорьев А. Судовой полупроводниковый преобразователь нового поколения // А. Григорьев, А. Колпаков, Ю. Кулагин, Р. Митрофанов // Силовая Электроника. — 2010. — № 4. — с. 47 — 50.
5. Григорьев А.В. Колесниченко В.Ю. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций. // Вестник Государственного университета морского и речного флота. — 2014. — № 6 (28). — с. 39 — 43.
6. Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами. / Вестник Государственного университета морского и речного флота. — 2015. — № 3 (31). — с. 164 — 171.

REFERENCES

1. Grigoryev A.V., Zaynullin R.R. *Analiz vozmozhnosti i tselesoobraznosti primeneniya sistem elektrodvizheniya na sudakh vspomogatelnogo flota* [Analysis of potential effectiveness of using electric propulsion systems on support vessels] / Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota. — 2015. — No. 5 (27). — pp. 40 — 46.
2. Anisimov Ya.F., Vasilyev Ye.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh elektroustanovok* [Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and ship power plants]. — L.: Sudostroyeniye, 1990.
3. *Kachestvo elektricheskoy energii na sudakh: spravochnik* [Quality of electrical power on ships: a reference] / Pod red. V.V. Sheynikhovich. — L.: Sudostroyeniye, 1988.
4. Grigoryev A. *Sudovoy poluprovodnikovyy preobrazovatel' novogo pokoleniya* [Ship semiconductor converter of new generation] / A. Grigoryev, A. Kolpakov, Yu. Kulagin, R. Mitrofanov // *Silovaya Elektronika* [Power electronics]. — 2010. — No. 4. — pp. 47 — 50.
5. Grigoryev A.V. Kolesnichenko V.Yu. *Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii sudovykh dizel'nykh elektrostantsiy* [Improvement of operating efficacy of ship diesel power plants] / Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flot. — 2014. — No. 6 (28). — p. 39 — 43.
6. Grigoryev A.V., Zaynullin R.R. *Analiz rezhimov ekspluatatsii sudovykh valogeneratorykh ustanovok s preobrazovatelyami chastoty i sinkhronnymi kompensatorami* [Analysis of operating modes of ship shaft generator sets with frequency converters and synchronous compensators] / Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota. — 2015. — No. 3 (31). — pp. 164 — 171.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.5.011, УДК 629.5.015.1

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ РЕГИСТРА К ПРОВЕДЕНИЮ ПРОЦЕДУРЫ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ КОРПУСА СУДНА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОЛУЧЕННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПОСАДКИ И ОСТОЙЧИВОСТИ

И.З. Черейский, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Stabedit@cniimf.ru

А.А. Петров, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

С.В. Бродянский, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: BrodyanskiySV@cniimf.ru

В статье представлены результаты научно-исследовательской работы по разработке требований Регистра к проведению трехмерного сканирования корпусов морских судов и оценки качества полученных расчетных моделей. Выполнен анализ действующих нормативных документов иностранных классификационных обществ — членов МАКО и существующего опыта сканирования корпусов морских судов отечественными и зарубежными предприятиями. Рассмотрено два метода создания трехмерных моделей: фотограмметрия и лазерное сканирование. Показано, что для крупнотоннажных судов наиболее оптимальным является лазерное сканирование с помощью лидара. Также в данной статье приведено описание специально разработанной методики для обоснования требований к необходимой точности при проведении сканирования. Отдельно рассмотрена методика оценки качества полученной трехмерной модели для определения возможности выполнения на ее основе расчетов посадки, остойчивости, аварийной остойчивости, а также разработки бортовых приборов контроля остойчивости (грузовых компьютеров). Статья содержит краткое описание разработанного проекта нормативного документа Регистра, а также результаты тестового сканирования корпуса судна, выполненного на его основе.

Ключевые слова: лазерное сканирование, трехмерное сканирование, 3-D-модель корпуса судна, лидар, облако точек, остойчивость, аварийная остойчивость, теоретический чертеж, гидростатические характеристики, прибор контроля остойчивости

DEVELOPMENT OF RS REQUIREMENTS FOR THE PROCEDURE FOR SCANNING THE SHIP'S HULL AND ASSESSING THE QUALITY OF THE RESULTING MODEL FOR TRIM AND STABILITY CALCULATIONS

I.Z. Chereysky, Central Marine Research and Design Institute JSC, St. Petersburg, e-mail: Stabedit@cniimf.ru

A.A. Petrov, PhD, Central Marine Research and Design Institute JSC, St. Petersburg, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

S.V. Brodyanskiy, Central Marine Research and Design Institute JSC, St. Petersburg, e-mail: BrodyanskiySV@cniimf.ru

The article presents the results of the R&D work on the development of the Register requirements for 3-D scanning of the hulls of ships and the quality assessment of the obtained computational models. The analysis of the current regulatory documents of foreign classification societies — IACS members and the existing experience of scanning ship hulls by Russian and foreign companies has been carried out. Two methods for obtaining of the three-dimensional models have been considered: photogrammetry and laser scanning. It has been shown that laser scanning using a lidar is the most optimal for large-capacity vessels. The article also describes

a specially developed methodology for the justification of the requirements for the necessary scanning accuracy. Methodology for assessing the quality of the resulting three-dimensional model has been considered separately to estimate the possibility of using it for trim, stability, damage stability calculations and development of onboard stability instruments (loading computers). Finally, the article briefly describes developed draft Register normative document, as well as the results of test scanning of the ship's hull, carried out on the basis whereof.

Keywords: *laser scanning, three-dimensional scanning, 3-D-model of ship's hull, lidar, point cloud, stability, damage stability, lines drawing, hydrostatic curves, stability instrument*

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ИМО (IMO) — Международная морская организация (International maritime organization).

МАКО (IACS) — Международная ассоциация классификационных обществ (International association of classification societies).

СОЛАС (SOLAS) — Международная конвенция по охране человеческой жизни на море СОЛАС-74 (International Convention for the Safety of Life at Sea SOLAS-74).

НД — Нормативный документ.

ПО — Программное обеспечение.

Лидар (LIDAR) — Технология обнаружения и определения дальности с помощью светового излучения (от англ. Light Identification Detection and Ranging).

ВВЕДЕНИЕ

С 1 января 2020 года вступили в силу поправки к правилу II-1/8-1 СОЛАС (см. резолюцию ИМО MSC.436(99) [1]) в соответствии с которыми пассажирские суда, построенные до 1 января 2014 года, должны не позднее первого возобновляющего освидетельствования после 1 января 2025 года иметь либо бортовую программу для расчетов аварийной посадки и остойчивости, позволяющую капитану получить необходимую информацию о безопасном возвращении в порт после получения повреждения, либо возможность получить аналогичную информацию из берегового центра поддержки.

В обоих случаях для соответствующих расчетов необходимы качественные трехмерные модели корпусов судов. Для судов в эксплуатации, сменивших несколько судовладельцев, зачастую имеет место проблема полноты и/или качества проектной документации, необходимой для создания трехмерной модели корпуса. В качестве альтернативы может быть использована трехмерная модель корпуса, построенная по результатам **сканирования судна**, например, во время освидетельствования в доке.

Необходимым условием для корректного выполнения расчетов посадки и остаточной остойчивости является высокая точность такой трехмерной модели.

Для решения описанной задачи, ФАУ «Российский морской регистр судоходства» (Регистр) включил в план научно-исследовательских работ (НИР), выполняемых в 2019 году, тему «Разработка предложений по включению в часть V «Деление на отсеки» Правил классификации и постройки морских судов РС требований к трехмерной модели корпуса, используемой при оценке последствий затопления на существующих пассажирских судах». По результатам соответствующих конкурсных процедур исполнителем данной НИР было выбрано АО «ЦНИИМФ».

Работа выполнялась в 2 этапа в период с апреля 2019 года по июль 2020 года. Настоящая статья посвящена основным результатам выполненной НИР.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ КОРПУСА СУДНА И СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

На первом этапе НИР был выполнен обзор действующих правил всех классификационных обществ — членов МАКО на предмет наличия указаний или рекомендаций по проведению трехмерного сканирования корпусов морских судов. Помимо изучения информации из открытых источников были направлены запросы в представительства или головные офисы классификационных обществ, в результате чего было установлено, что ни одно из них в своих нормативных документах (НД) не регламентирует процедуру сканирования корпуса судна.

Таким образом, можно утверждать, что Регистр первым из членов МАКО озадачился вопросом нормативного регулирования трехмерного сканирования корпусов морских судов.

В рамках НИР были рассмотрены два основных метода создания трехмерных моделей корпуса, применяемых в отрасли на сегодняшний день: фотограмметрия и лазерное сканирование.

Метод **фотограмметрии** использует множество двухмерных фотографий высокого качества, которые с помощью специального программного обеспечения (ПО) преобразовываются в трехмерную модель. Для моделирования корпусов могут быть использованы два метода фотограмметрии:

- Close Range Photogrammetry (Фотограмметрия с близкого расстояния) и
- Structure from motion (Фотограмметрия в движении).

Несмотря на имеющиеся преимущества (доступность оборудования, легкость фотофиксации труднодоступных частей корпуса), данный метод может быть эффективен только для сканирования маломерных судов, поскольку трудоемкость подготовки корпуса (расстановка контрольных мишеней, зачистка корпуса, освобождение пространства между камерой и корпусом от посторонних предметов) возрастает с увеличением размерений судна. Из рассмотренных практических примеров характерен следующий: для создания трехмерной модели катера длиной 12 м потребовалось более 370 контрольных мишеней на корпусе, для каждой требовалось не менее трех снимков, совмещение и преобразование которых впоследствии заняло несколько рабочих дней.

В отличие от фотограмметрии, **трехмерное лазерное сканирование** представляется оптимальным для работы с судами любых размеров. Методы такого сканирования зависят от оборудования и могут быть подразделены на две основные группы: сканирование с помощью лазерных триангулярных сканеров и лазерных радаров.

Проведенное исследование показало, что единственный приемлемый метод сканирования корпуса судна большого водоизмещения — лазерное сканирование с помощью так называемых лидаров — активных дальнометров оптического диапазона (от англ. LIDAR – Light Identification Detection and Ranging). Принцип данного метода заключается в создании трехмерного облака точек, соответствующих окружению вокруг сканера, которое с помощью специализированных программных средств преобразовывается в трехмерную модель высокого качества. Преимущества и недостатки данного метода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Качественная оценка сканирования с помощью лидара

Преимущества	Недостатки
• Высокая точность • Быстрота сканирования • Минимальное требуемое количество контрольных мишеней (главные оси) • Широкий выбор оборудования и ПО с опытом практического применения в судостроении	• Высокая стоимость оборудования • Необходимость обучения использованию лидара и постобработки данных • Метеозависимость: на точность сканирования влияют осадки, пыль, туман, взвесь в воздухе и др. • В случае со стационарным лидаром: сложность сканирования некоторых труднодоступных конструкций корпуса

Анализ рынка лазерного сканирования показал, что существует множество отечественных и зарубежных компаний, специализирующихся на оказании соответствующих услуг: от ориентированных только на морской транспорт до геодезических предприятий, осуществляющих 3-D сканирование промышленных объектов и зданий в составе комплексных строительных проектов.

Помимо лидаров в НИР рассмотрена возможность использования ручной лазерной рулетки, которое является частным случаем лазерного сканирования. Принцип работы с лазерной рулеткой прежде всего отличается от лидара более строгими требованиями к качеству выполнения замеров и невозможностью выполнять измерения более, чем в одной плоскости. Очевидными недостатками такого метода являются высокая трудоемкость и низкий уровень автоматизации, что приводит к сильному влиянию человеческого фактора на получаемые результаты.

2. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ТОЧНОСТИ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Для обоснования необходимой точности измерений и допустимых погрешностей при проведении сканирований корпусов судов была разработана методика, основанная на сравнении гидростатических характеристик корпусов судов, искаженных внесением с определенным шагом погрешностей в их размерения по осям X, Y и Z, с гидростатическими характеристиками эталонного корпуса. За эталонный принимался корпус, расчетная модель которого разработана на основе теоретического чертежа судна.

При этом было введено условие, что отклонение значений гидростатических характеристик искаженных корпусов от значений эталонного корпуса не должно было превышать значений, требуемых существующими нормативными документами Регистра. Для некоторых из контролируемых параметров на основе многолетнего опыта работы задавались даже более жесткие ограничения, чем того требует Регистр. Допускаемые погрешности контролируемых параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Допускаемые погрешности контролируемых параметров корпуса

Параметр	Допускаемое расхождение не более меньшего из значений
ΔD ΔT ($2 \times \Delta D$, удвоенная погрешность по осадке) ΔLCB ΔKMT Плечо остойчивости формы	± 50 мм/1 % от осадки судна D ± 100 мм/2 % от осадки судна D ± 100 мм/1 % от значения LCB, отсчитываемого от кормового перпендикуляра ± 50 мм/1 % от значения KMT ± 50 мм/5 % ширины судна
Примечание. Допускается в качестве вводного параметра для оценки качества принимать осадку судна, а в качестве контролируемого параметра массовое водоизмещение. При этом допускаемая погрешность по массовому водоизмещению не должна превышать ± 1 %.	

Для расчетов гидростатических характеристик использовался разработанный в АО «ЦНИИМФ» и сертифицированный Регистром программный комплекс «StabEdit Professional 3.2», а для задания корпусов с измененной геометрией и сравнительного анализа гидростатических характеристик применялся специально разработанный для целей НИР сопряженный с ним модуль "Hull Generator" (см. рис. 1).

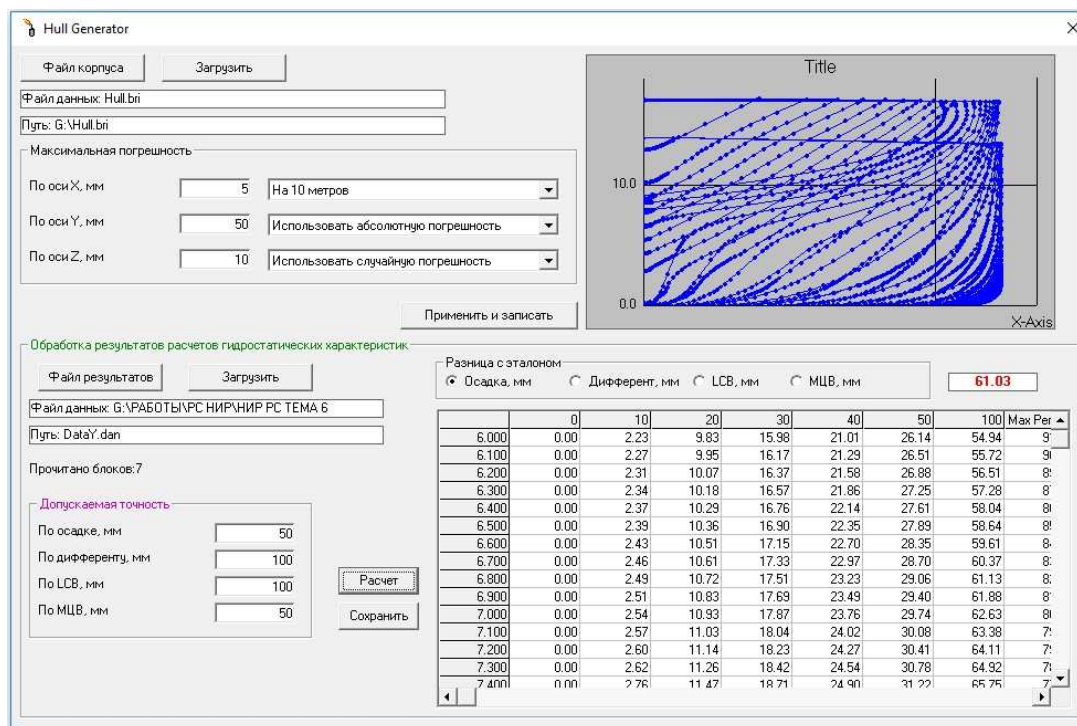


Рис. 1 Интерфейс программного модуля генерации корпусов и сравнения гидростатических характеристик "Hull Generator"

Процедура определения минимально необходимой точности измерений была разделена на два последовательных этапа.

На **первом этапе** сравнительного анализа расчетные корпуса задавались внесением с различным шагом погрешностей в значения координат точек поперечных сечений (ординаты — Y , аппликаты — Z) и в значения отстояний плоскостей сечений от кормового перпендикуляра (абсцисса — X). При этом погрешность по оси Y задавалась приращением с некоторым шагом, по оси Z генерировалась случайно в установленном диапазоне, а по оси X задавалась с фиксированным шагом на каждые 10 м длины судна. Таким образом, на данном этапе основной вносимой погрешностью являлась погрешность по оси Y , которая оказывала наибольшее влияние на значения таких характеристик корпуса судна как осадка/водоизмещение и аппликата метацентра (КМТ). На данном этапе определялось такое значение погрешности по оси Y , при котором значения контролируемых параметров корпуса не выходили за пределы установленных нормативными документами Регистра ограничений.

На **втором этапе** погрешность по оси Z задавалось аналогично случайным образом, по оси Y принималась как максимально допустимая по результатам анализа на первом этапе, а по оси X задавалась приращением с некоторым шагом (аналогично погрешности по оси Y на первом этапе). Таким образом, на данном этапе основной вносимой погрешностью являлась погрешность по оси X , которая оказывала наибольшее влияние на значения таких характеристик корпуса судна как осадка/водоизмещение, дифферент и абсцисса центра величины (LCB). На данном этапе определялось такое значение погрешности по оси X , при котором значения контролируемых параметров корпуса не выходили за пределы установленных нормативными документами Регистра ограничений.

После задания некоторого количества вариаций моделей корпусов с измененной геометрией проводился расчет их гидростатических характеристик, а затем выполнялась процедура обработки и сравнения полученного массива выходных параметров. В целях ускорения процедуры сравнения и уменьшения риска ошибки оператора использовался упомянутый выше программный модуль "Hull Generator".

По результатам обработки массива корпусов с измененной геометрией определялись лимитирующие значения погрешностей по осям X , Y и Z , при которых вышеупомянутые гидростатические характеристики не выходили за пределы установленных ограничений.

По результатам анализа по описываемой методике, проведенного для ряда судов различных главных размерений, было предложено ввести значения минимально допускаемых погрешностей измерений по трем координатным осям при проведении процедуры трехмерного сканирования корпуса судна, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Допускаемые погрешности измерений по координатным осям

Координатная ось	Обозначение	Относительно плоскостей судна	Допускаемая погрешность измерений
ось абсцисс	X	От плоскости мидель шпангоута или кормового перпендикуляра	$\pm 5\text{мм}/0,01\%$ от длины судна ¹
ось ординат	Y	От ДП	$\pm 50\text{мм}/0,2\%$ от ширины судна
ось аппликат	Z	От ОП	$\pm 10\text{мм}/0,2\%$ от высоты борта
¹ Значение приращения погрешности на каждые 10 м длины корпуса судна.			

3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НОВОГО НОРМАТИВНОГО ДОКУМЕНТА РЕГИСТРА

В завершение первого этапа НИР был разработан «Проект требований РС к процедуре проведения сканирования корпуса судна и оценке качества полученной на его основании трехмерной модели», включающий следующие разделы:

- область применения;
- определения и пояснения;
- методики сканирования;
- требования к исполнителю процедуры сканирования;
- требования к техническим средствам для проведения сканирования;
- требования к точности сканирования и количеству измерений;

- требования к процедуре сканирования;
- обработка результатов и оценка качества;
- рассмотрение результатов регистром;
- использование результатов сканирования;
- приложение — образец протокола проведения сканирования.

Предлагаемый проект НД предусматривает возможность использования методик, отличающихся от описанных выше, при условии соблюдения требований к точности сканирования и качеству полученной трехмерной модели. Учитывая то, что полученные в результате сканирования модели предполагается использовать в расчетах остойчивости и непотопляемости, т.е. качество и достоверность результатов напрямую влияют на безопасность судов, важным условием для возможности выполнения сканирования является подтверждение квалификации и навыков исполнителя. Для этих целей специально был разработан и предложен проект изменений в Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов для судов (9.3.19 части I «Общие положения по техническому наблюдению»), описывающий процедуру признания поставщика услуг и включающий перечень требований к предприятию, используемому им оборудованию и ПО.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕСТОВОГО СКАНИРОВАНИЯ КОРПУСА СУДНА

В соответствии с Техническим заданием на выполнение НИР, после разработки проекта нового НД, стояла задача провести процедуру сканирования корпуса существующего судна и оценить качество полученной трехмерной модели. Для этих целей при содействии Регистра был выбран строящийся на ООО «Невский судостроительно-судоремонтный завод» (г. Шлиссельбург) буксир-спасатель проекта MPSV12 (проектант — Морское Инженерное Бюро) (см. рис. 2 и 4, а). В процедуре сканирования приняли участие специалисты АО «ЦНИИМФ» и ООО «НПП «Бента» (см. рис. 3).

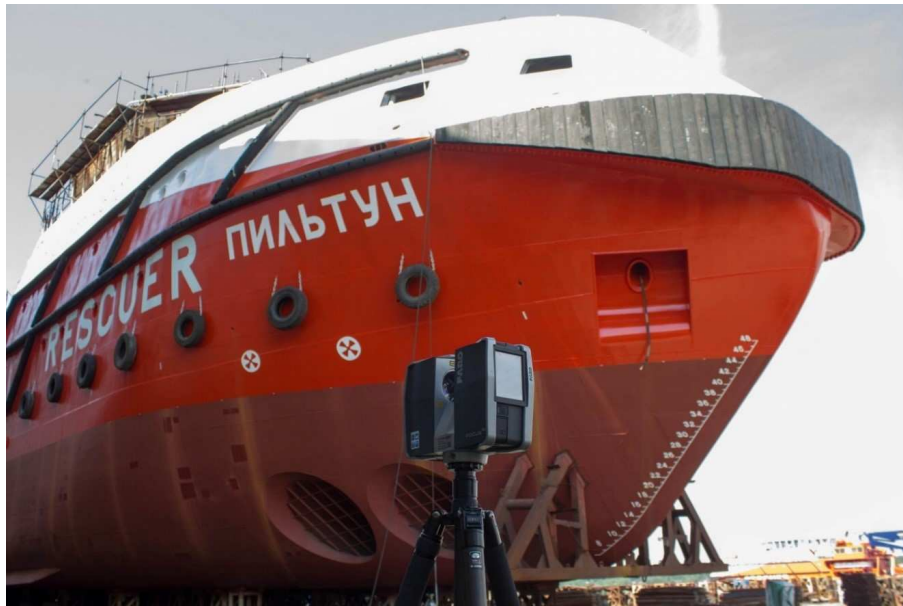


Рис. 2 Сканируемое судно и используемый сканер



Рис. 3 Процесс настройки сканера исполнителями сканирования

Из методов сканирования корпуса был выбран метод трехмерного лазерного сканирования с помощью лидара, как наиболее подходящий для выполнения поставленных задач. Сканирование выполнялось с помощью лидара Faro Focus 3D, а общее время на проведение процедуры составило 4 ч, что, учитывая размеры судна ($L = 79,85$ м, $B = 16,80$ м), можно считать хорошим результатом. После обработки полученного облака точек в ПО "Autodesk ReCap" и "Autodesk AutoCAD" (см. рис. 4, б), была построена расчетная трехмерная модель корпуса (см. рис. 4, в).

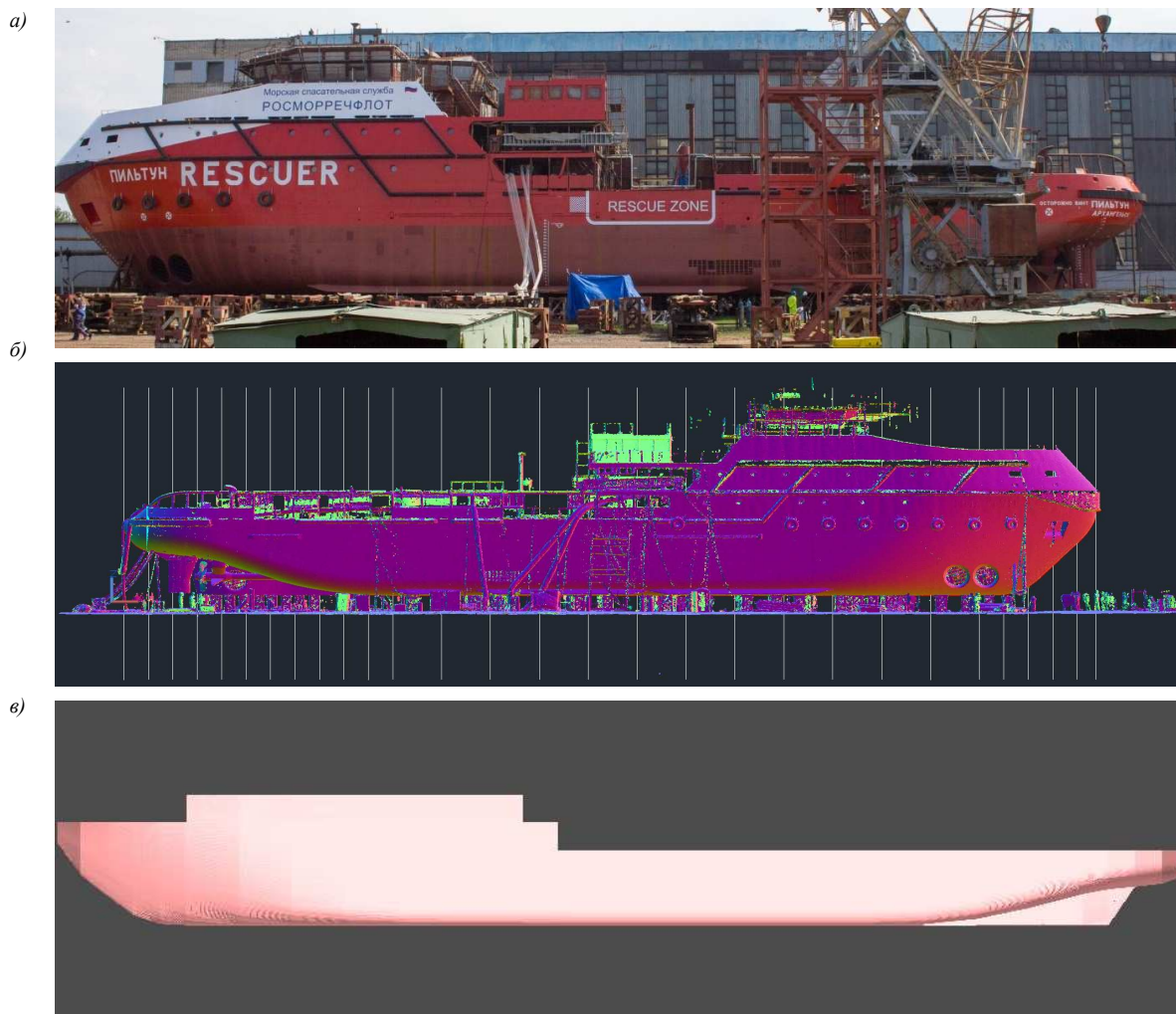


Рис. 4 Результаты трехмерного сканирования:
 а) — фото судна; б) — облако точек и разбивка по сечениям (ПО AutoCAD);
 в) — расчетная трехмерная модель (ПО "StabEdit Professional")

На рис. 5 приведены изометрические виды расчетной трехмерной модели корпуса в ПО "StabEdit Professional".

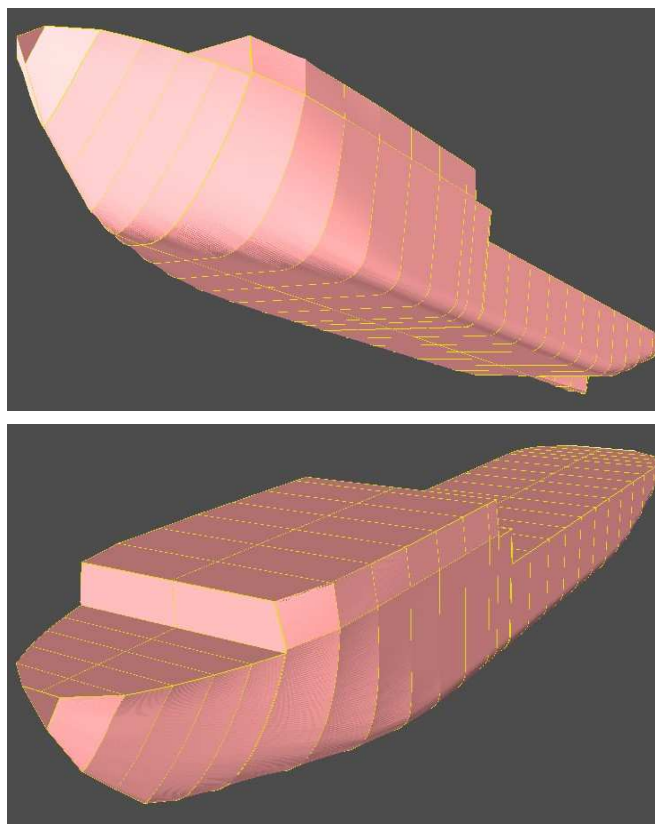


Рис. 5 Расчетная трехмерная модель (ПО "StabEdit Professional").
Изометрический вид

Расчетная трехмерная модель использовалась для проверочных расчетов гидростатических характеристик корпуса судна и плеч остойчивости формы. Расчеты по корпусу выполнялись в вышеупомянутом ПО "StabEdit Professional" (см. рис. 6).

Результаты оценки качества полученной модели (см. табл. 4) показали близость значений контролируемых параметров, полученных по вычислениям на расчетной модели, к соответствующим эталонным значениям из судовой документации в пределах допускаемых погрешностей, регламентируемых новым НД с учетом действующих НД Регистра. Построенная по результатам сканирования расчетная трехмерная модель корпуса может быть признана финальной и использоваться для расчетов, связанных с остойчивостью судна.

Таблица 4

Результаты оценки качества расчетной трехмерной модели корпуса

Контролируемый параметр	Диапазон погрешностей результатов расчета по сравнению с эталонным значением	Допускаемая погрешность в соответствии с новым НД
Водоизмещение	0,50 — 0,54 %	$\pm 1,0$ %
LCB (от КП)	0,022 — 0,051 м	$\pm 0,1$ м
КМТ	0,024 — 0,034 м	$\pm 0,05$ м
Плечи остойчивости формы для углов крена от 5° до 70°	0,000 — 0,028 м	$\pm 0,05$ м

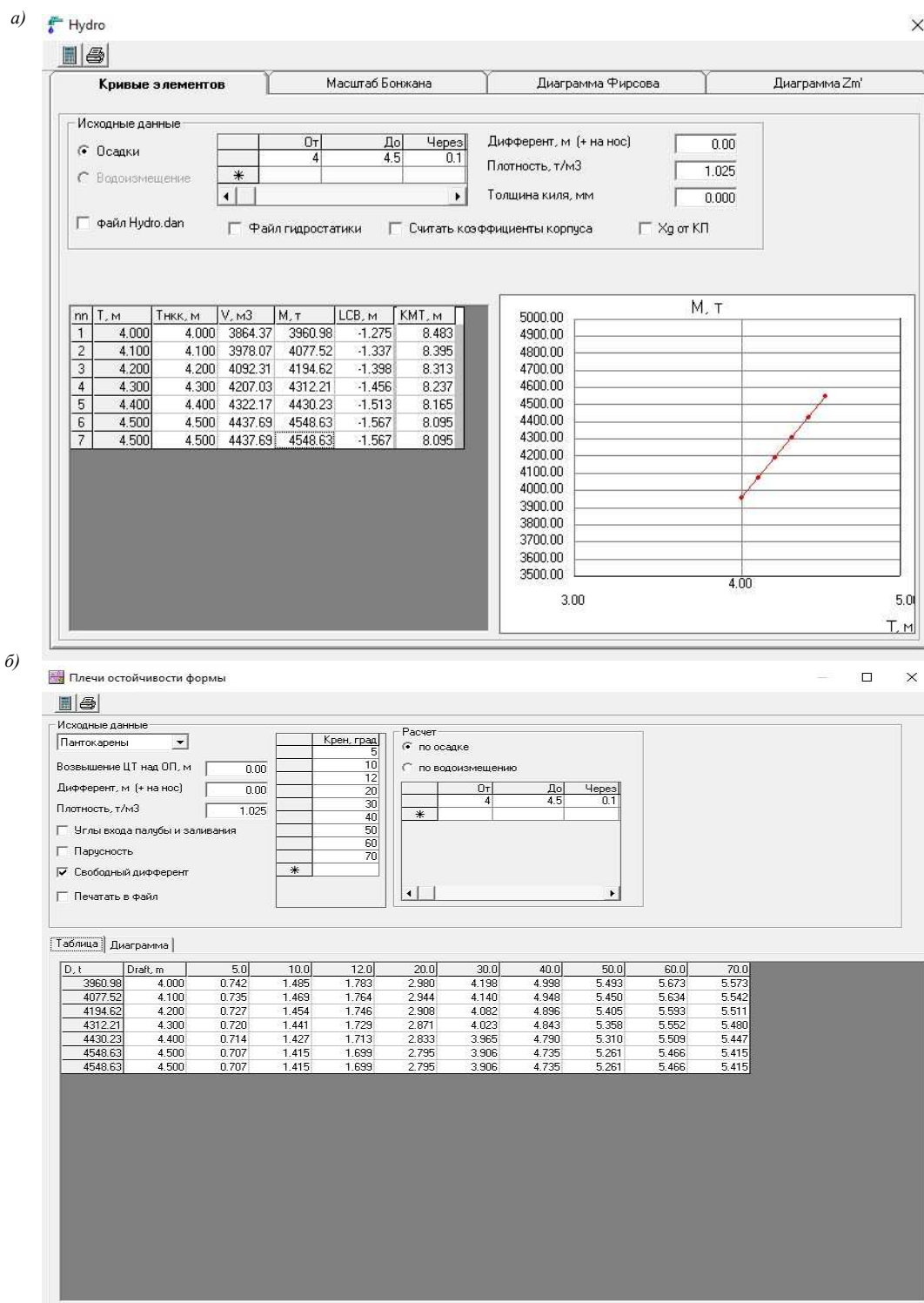


Рис. 6 Интерфейс модулей ПО "StabEdit Professional":

а) — расчет гидростатических характеристик; б) — расчет плеч остойчивости формы

По результатам проведенного тестового сканирования в проект НД были внесены незначительные корректировки, касающиеся требований к самой процедуре сканирования, однако в целом корректность ранее разработанных основных положений нового НД и проведения описанных процедур была подтверждена практическим примером и соответствующими расчетами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с предстоящим обязательным требованием всем пассажирским судам, построенным до 1 января 2014 года, иметь средства оперативного расчета аварийной посадки и остойчивости, необходимо заранее оценить все возможные препятствия для его выполнения. Одним из таких препятствий может быть отсутствие проектной документации, необходимой для создания трехмерных компьютерных моделей судна, используемых в расчетах остойчивости. Регистр первым из всех классификационных обществ — членом МАКО предусмотрел на уровне НД возможность создания достоверных компьютерных моделей судов методами трехмерного сканирования для целей решения вопросов остойчивости.

Разработка проекта НД для Регистра была осуществлена АО «ЦНИИМФ» в ходе выполнения соответствующей НИР. Результаты тестового сканирования корпуса судна, выполненного в строгом соответствии с проектом НД, подтвердили корректность и обоснованность разработанных требований, а также удобство их практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резолюция ИМО MSC.436(99). Поправки к международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками. 24.05.2018.

REFERENCES

2. IMO resolution MSC.436(99). Amendments to the international convention for the safety of life at sea, 1974, as amended. 24.05.2018.



КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

УДК 629.12:539.32

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИНТЕРМОДАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНЫ С СОСУДОМ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Сергичев, канд. физ.-мат. наук, АНОВО «Сколковский институт науки и технологий», Центр Проектирования, производственных технологий и материалов, Москва, e-mail: i.sergeichev@skoltech.ru

А.Н. Федоренко, канд. тех. наук, АНОВО «Сколковский институт науки и технологий», Центр Проектирования, производственных технологий и материалов, Москва, e-mail: a.fedorenko@skoltech.ru

Б.Н. Федулов, д-р физ.-мат. наук, АНОВО «Сколковский институт науки и технологий», Центр Проектирования, производственных технологий и материалов, Москва, e-mail: b.fedulov@skoltech.ru

С.В. Докучаев, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: dokuchaev.sv@rs-class.org

Д.А. Скоропупов, АО «Уралкриомаш», Нижний Тагил, e-mail: cryont@cryont.ru

В статье предложена методика проведения виртуальных испытаний интермодальных контейнеров-цистерн с сосудом из полимерных композиционных материалов на основании применения валидированных конечно-элементных моделей. Приведены рекомендации по выбору типа конечного элемента, его размера и свойств. В результате моделирования динамических испытаний контейнера-цистерны, выполненных в соответствии с требованиями части VIII «Контейнеры-цистерны с сосудом из полимерных композиционных материалов» Правил изготовления контейнеров Российского морского регистра судоходства (РС), получены величины деформаций, действующих в конструкции, а также кривая спектра ударного отклика. Результаты виртуальных испытаний сравниваются с результатами полномасштабных натурных испытаний контейнера-цистерны модели КЦХ.ПКМ-25/0.4 разработки АО «Уралкриомаш» (входит в корпорацию «Уралвагонзавод», ГК «Ростех»), применяемого для транспортировки химически агрессивных продуктов. Показано хорошее соответствие расчетных значений деформации элементов контейнера и экспериментальных значений.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, контейнер-цистерна, динамические испытания, кривая спектра ударного отклика, метод конечных элементов, виртуальные испытания

VIRTUAL TESTING OF INTERMODAL TANK CONTAINER WITH FIBER-REINFORCED PLASTICS SHELL

I.V. Sergeichev, PhD, Skolkovo Institute of Science and Technology, Center for Design, Manufacturing and Materials, Moscow, e-mail: i.sergeichev@skoltech.ru

A.N. Fedorenko, PhD, Skolkovo Institute of Science and Technology, Center for Design, Manufacturing and Materials, Moscow, e-mail: a.fedorenko@skoltech.ru

B.N. Fedulov, DSc, Skolkovo Institute of Science and Technology, Center for Design, Manufacturing and Materials, Moscow, e-mail: b.fedulov@skoltech.ru

S.V. Dokuchaev, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: dokuchaev.sv@rs-class.org

D.A. Skoropupov, JSC "UralCryoMash", Nizhny Tagil, e-mail: cryont@cryont.ru

The article discusses a virtual test method for intermodal tank-containers with fiber-reinforced plastics (FRP) shells. The method is based on utilization of finite element models validated by results of full-scale static and dynamic tests performed for tank container developed by JSC "UralCryoMash" for transportation of chemically aggressive products. Recommendations have been given with respect to the finite element type, its dimensions and properties. The full-scale tests have been performed in accordance with the requirements of Part VIII "Tank Containers with Fiber-Reinforced Plastics (FRP) Shell" of the Rules for the Manufacture of Containers of Russian Maritime Register of Shipping. The calculated stress, strains and shock response spectrum curves have been compared with the test data. The calculated deformation values of the container elements have been demonstrated to be in good agreement with the experimental values.

Keywords: fiber-reinforced plastics, tank container, filament winding, vacuum infusion, strength, finite element method, virtual tests

ВВЕДЕНИЕ

Результаты пятилетней опытной эксплуатации контейнера-цистерны модели КЦХ.ПКМ-25/0.4, разработанного специалистами АО «Уралкриомаш» совместно с компанией «АпАТэк» и Сколковским институтом науки и технологий [1], показали эффективность и безопасность применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) для производства емкостного оборудования, предназначенного для интермодальных перевозок химических продуктов.

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом формируется запрос перевозчиков на данный вид контейнеров-цистерн. При этом в каждом случае эксплуатантам требуется, как правило, несколько транспортных единиц, кастомизированных для перевозки определенной линейки продуктов.

Существующие требования Правил РС [2], а также принятые по инициативе Российской Федерации дополнения Типовых правил ООН [3] регламентируют проведение комплекса натурных полномасштабных статических и динамических испытаний прототипов (опытных образцов) новых или модифицируемых контейнеров-цистерн с сосудом из ПКМ. Однако в случае запроса перевозчиков на единичные экземпляры или малую партию выполнение этих требований в полном объеме делает экономически нецелесообразной разработку или кастомизацию этого оборудования.

Одним из решений указанной проблемы может быть применение виртуальных испытаний взамен натурных или в дополнение к ним, что, в свою очередь, требует создания и экспериментальной проверки (валидации) методики их проведения на основании расчетных конечно-элементных моделей конструкции контейнера-цистерны с сосудом из ПКМ. Предпосылки применения виртуальных испытаний для подтверждения соответствия контейнеров-цистерн требованиям безопасности и качества уже заложены в нормативную базу РС, см., например, 1.4.1.2 части IV «Контейнеры-цистерны» и VIII «Контейнеры-цистерны с сосудом из полимерных композиционных материалов» Правил изготовления контейнеров. Аналогичные требования содержатся в разделах 4.2 и 6.9 принятых дополнений Типовых правил ООН [3].

Современные средства виртуализации испытаний позволяют решить эту проблему, применяя комбинированный подход к сертификации, заключающийся в одновременном использовании методов математического моделирования и натурных экспериментов, причем со значительным превалированием виртуальных испытаний [4].

В настоящей работе предложена методика проведения виртуальных испытаний контейнера-цистерны с сосудом из ПКМ (КЦ), представлен сравнительный анализ результатов моделирования и натурных испытаний КЦ модели КЦХ.ПКМ 25/0.4. Комплекс полномасштабных испытаний КЦ выполнен специалистами Испытательного центра Белорусского Государственного Университета Транспорта (г. Гомель).

Исходные данные для моделирования и валидации методики виртуальных испытаний предоставлены ОА «Уралкриомаш» (входит в корпорацию «Уралвагонзавод», ГК «Ростех»).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящем разделе приводится краткое описание конструкции КЦ и механических характеристик ПКМ [1].

Таблица 1

Характеристики КЦ

Максимальная масса брутто, кг	36000
Масса тары, кг	4350
Внутренний объем сосуда, м ³	24
Максимально допустимое рабочее давление, МПа	0,4
Испытательное давление, МПа	0,6

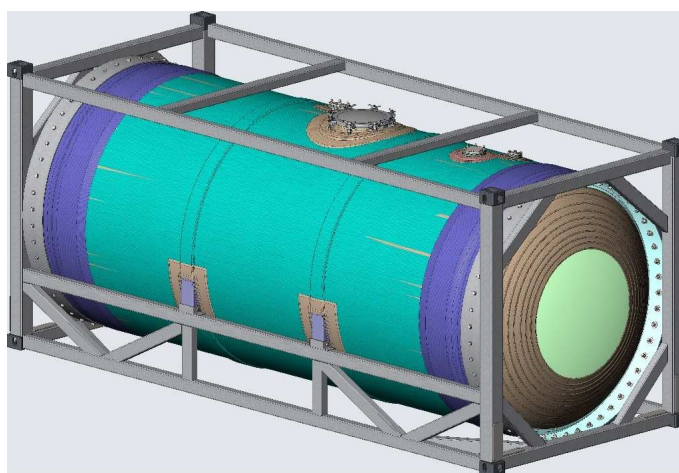


Рис. 1 Общий вид конструкции КЦ

Материалы сосуда КЦ — слоистые стеклопластики, полученные методами вакуумной инфузии и филаментной намотки. Распределение конструктивных слоев цилиндрической части и дна сосуда КЦКМ показаны на рис. 2.

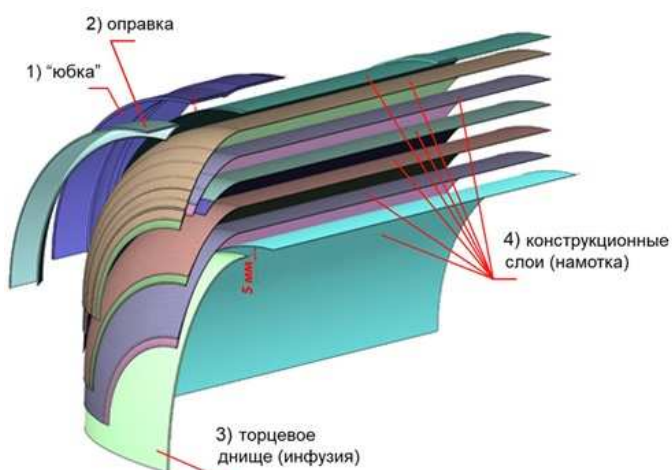


Рис. 2 Структура слоев сосуда КЦ

Сосуд через «юбки» (1) соединяется болтами с рамой КЦ. Оправка (2) соединительных «юбок» и торцевые днища (3) изготавливаются методом вакуумной инфузии. «Юбки» и конструктивные слои сосуда (4) изготавливаются методом филаментной намотки на оправки (2) и торцевые днища (3). «Юбка» (1), оправка (2) и торцевые днища (3) имеют укладку слоев близкую к квазиизотропной. Конструктивные слои сосуда (4) изготавливаются из однонаправленных слоев таким образом, чтобы обеспечить отношение эффективных модулей упругости 2 к 1 в окружном и осевом направлениях соответственно.

Механические характеристики конструктивных слоев сосуда получены в соответствии со стандартами испытаний ISO, указанными в 2.2.9 части VIII «Контейнеры-цистерны с сосудом из полимерных композиционных материалов» Правил изготовления контейнеров [2]. Перечень рассматриваемых расчетных случаев нагружения конструкции КЦ соответствует требованиям 2.2.8, 2.2.9, 2.2.12, 2.2.18, 3.3.2.2 и 3.3.2.3 части VIII «Контейнеры-цистерны с сосудом из полимерных композиционных материалов» Правил изготовления контейнеров [2].

Таблица 2

Свойства конструктивных слоев сосуда

		Квазиизотропные слои, инфузия	Однонаправленные слои, намотка
E_1	ГПа	20,9	42,9
E_2	ГПа	20,9	12,3
ν_{12}	—	0,28	0,27
G_{12}	ГПа	8,94	4,0
σ_{1B}^+	МПа	377	987
σ_{2B}^+	МПа	377	12,1
σ_{1B}^-	МПа	268	474
σ_{2B}^-	МПа	268	102
σ_{12B}	МПа	183	9,81

2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КОНТЕЙНЕРА-ЦИСТЕРНЫ

Расчетная конечно-элементная модель включает весь объем КЦ, как показано на рис. 3. Модель включает только конструктивные слои ПКМ, т.е. не учитываются механические свойства химстойкого слоя и огнестойкого покрытия сосуда. Массовая доля этих материалов в конструкции сосуда учитывается при действии инерционных нагрузок.

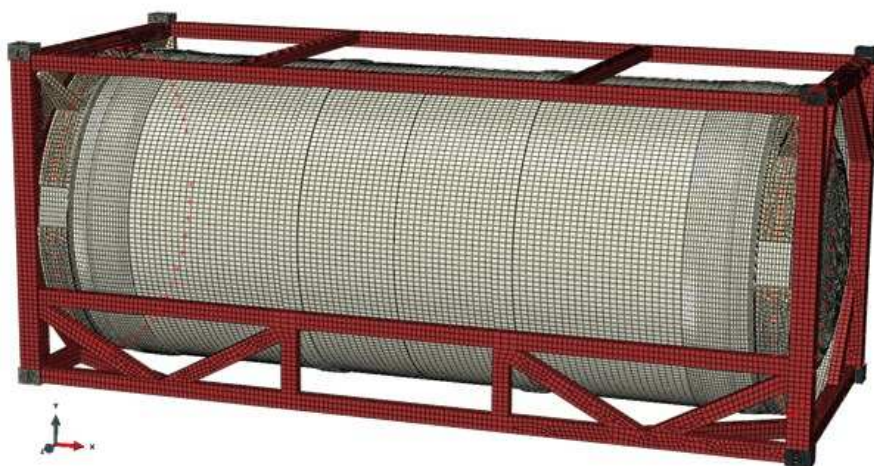


Рис. 3 Общий вид расчетной конечно-элементной модели

Для построения расчетных моделей сосуда КЦ применяются трехмерные многослойные конечные элементы оболочечного типа SC8R с характерным размером 25 мм в регулярных зонах и до 1 мм в зонах соединений. Рама контейнера и угловые фитинги моделируются однослойными двумерными оболочечными элементами типа S4R. Для построения расчетной модели и проведения расчетов применялся конечно-элементный комплекс ABAQUS (см. рис. 4).

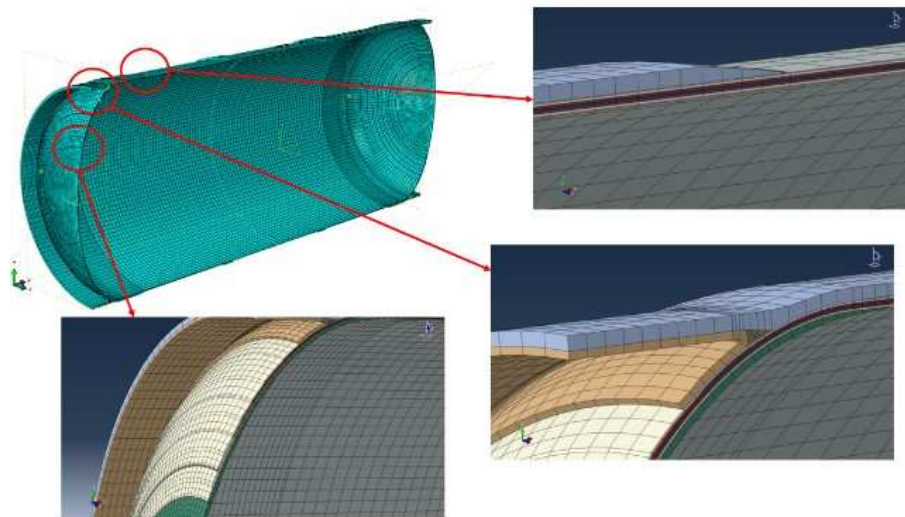


Рис. 4 Конечно-элементная модель сосуда КЦ с детализацией конструктивных слоев ПКМ

Сосуд КЦ закрепляется на раме контейнера в соответствии со схемами установки механического крепежа, приведенными в конструкторской документации. Болтовые соединения задаются жесткими типа *fastener [5]. Между соответствующими поверхностями сосуда и рамы контейнера задаются условия механического контакта.

Пример ориентации конструктивных слоев в системе координат сосуда показан на рис. 5, где красными стрелками показаны направления волокон.

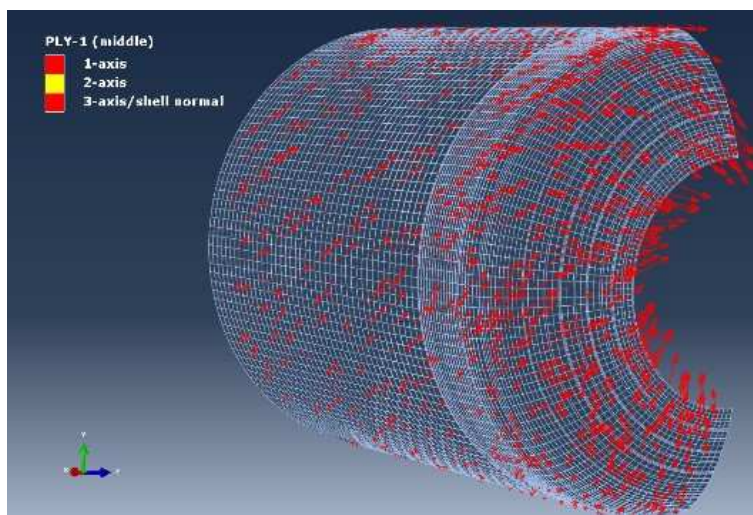


Рис. 5 Пример задания ориентации конструктивного слоя $+30^\circ$ в цилиндрической части и днище сосуда

Для описания напряженно-деформированного состояния конструктивных слоев сосуда КЦ применяется модель упругого трансверсально изотропного материала [6]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & \nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где индекс 1 указывает направление вдоль волокон;

индекс 2 — направление поперек волокон;

индекс 12 — плоскость слоя;

E_1 — модуль упругости материала слоя в направлении вдоль волокон;

E_2 — модуль упругости материала слоя в направлении поперек волокон;

G_{12} — модуль сдвига в плоскости слоя;

ν_{12} — коэффициент Пуассона в плоскости слоя.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Модель динамических испытаний КЦ реализует требования раздела 41 части IV Руководства по испытаниям и критериям, ООН [7]. Схема испытаний приведена на рис. 6. В рамках разработанной модели выполняется:

- расчет ударного взаимодействия испытательной платформы (1) и вагона-бойка (2) через поглощающие аппараты автосцепок (4) — (7);
- расчет взаимодействия перевозимой жидкости с конструкцией сосуда из ПКМ;
- расчет сигнала «ускорение — время» с нижних угловых фитингов КЦ и преобразование этого сигнала в частотную область с целью получения кривой спектра ударного отклика (СУО) для контроля минимального уровня динамического нагружения;
- расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкции КЦ.

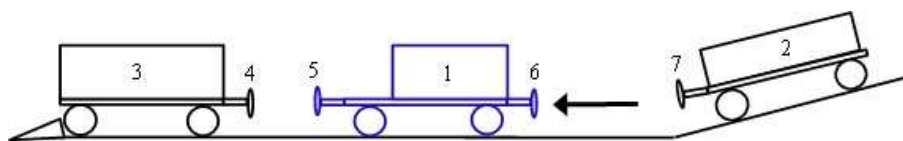


Рис. 6 Схема динамических испытаний КЦ

Испытуемый КЦ (1) заполняется водой до 97 % вместимости сосуда и устанавливается на железнодорожную платформу с жестким закреплением нижних фитингов рамы по всем степеням свободы. Вагон-боек (2) разгоняется с горки и ударяет платформу с установленным КЦ (1), после чего система движется до соударения с фиксированным вагоном-подпором (3). Автосцепки каждого из вагонов оснащены поглощающими аппаратами (4, 6 и 7). На вагон-ударник устанавливается поглощающий аппарат класса Т2 энергоемкостью 130 кДж, а вагон-подпор и испытательная платформа оснащены поглощающими аппаратами класса Т0 энергоемкостью от 50 кДж. Сцепки вагонов после удара не происходит. Расстояние между платформой с испытуемым КЦ и вагоном-подпором составляет 1,5 — 2 м.

Акселерометры устанавливаются на каждый из двух нижних фитингов рамы КЦ. Сигнал с них оцифровывается с минимальной частотой 1000 Гц [7]. Осциллограмма включает в себя запись амплитуды продольного ускорения как при ударе вагона-бойка, так и при ударе платформы с КЦ о вагон-подпор. Скорость соударения подбирается из условия необходимости обеспечить продольное ускорение на нижних фитингах КЦ не менее 4g. Помимо этого, построенная кривая СУО должна лежать выше эталонной кривой [7].

В случае, когда сумма массы полезной нагрузки и массы тары испытуемого КЦ меньше максимальной расчетной массы, то ускорение a_1 , которое должен испытывать КЦ при динамических испытаниях определяется из соотношения (2)

$$a_1 = a \times 1/\sqrt{(1+\Delta M/(M_1 + R_1))}, \quad (2)$$

где $a = 4g$ ускорение, см. 2.2.3.1 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров [2]. Масса брутто определяется как сумма масс тары и груза $R_1 = P + T$, где P — масса груза, T — масса тары КЦ. $R_1 = 23800 \times 0,97 + 4160 = 27246$ кг. $M_1 = 18500$ кг — масса испытательной платформы, R — максимальная расчетная масса (включая тару) испытуемого контейнера 36000 кг. Таким образом, $\Delta M = R_1 - R = 27246 - 36000 = -8754$ кг. Отсюда, минимальная величина ускорения в диапазоне частот до 20 Гц составляет 4,4g. Если полученное в ходе испытаний ускорение не менее 4,4g, то вычисляется кривая СУО по методу спектра ударного отклика [8] на основании сигналов акселерометров.

Минимальная эталонная кривая СУО, регламентируемая требованиями раздела 41 части IV Руководства по испытаниям и критериям [6], ниже которой не могут находиться точки построенной экспериментальной кривой СУО, описывается выражением

$$a = 1,95 \times \omega_n^{0,355}, \quad (3)$$

где a — амплитуда;
 ω_n — собственная частота.

Для проведения расчетов кривой СУО и напряженно-деформированного состояния конструкции КЦ построена конечно-элементная модель (см. рис. 7), включающая модель КЦ (1, см. п. 2), установленного на платформу (2). Импульс вагона-ударника передается на хребтовую балку испытательной платформы (3) через поглощающий аппарат (8). С противоположной стороны платформы находится другой поглощающий аппарат (9) для демпфирования удара платформы с КЦ о вагон-подпор. Система рессорного подвешивания, а также колесные блоки представлены массами M_{II} и M_K , соответственно, взаимодействующими между собой и платформой через демпфирующие вязкоупругие элементы типа *Connector [5]. В силу симметрии задачи учитываются только продольные (4, 7) и вертикальные (5, 6) составляющие вязкоупругих элементов.

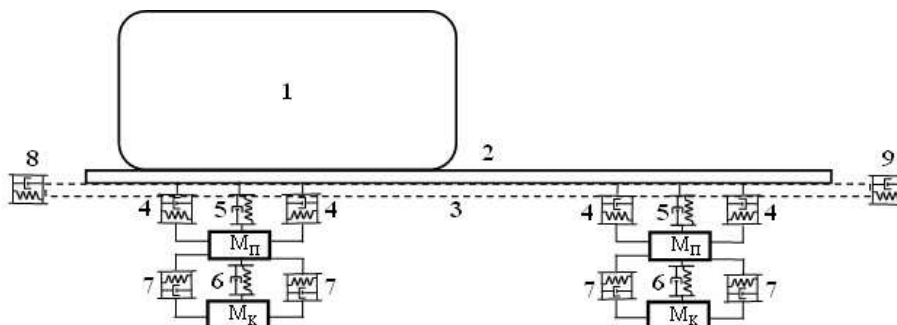


Рис. 7 Схема расчетной модели испытательной платформы с установленным КЦ

Массы колесных блоков, элементов системы рессорного подвешивания, и соответствующие коэффициенты жесткости и вязкости показаны в табл. 3 [9]. Остальные коэффициенты определяются условиями $K_4 = K_7$, $C_4 = C_7$, $K_5 = K_6$, $C_5 = C_6$.

Вагон-боек моделируется жесткой контактной поверхностью с присоединенной массой равной 100 т.

Таблица 3

Параметры модели испытательной платформы [9]

M_K , кг	M_{II} , кг	K_4 , Н/м, $\times 10^6$	C_4 , Н·м/с, $\times 10^5$	K_5 , Н/м, $\times 10^6$	C_5 , Н·м/с, $\times 10^5$
1750	1540	5,7	1,67	1,86	6,0

При проведении испытания для амортизации удара на испытательную платформу с закрепленным КЦ устанавливается поглощающий аппарат класса T0. Вагон-боек оснащен поглощающим аппаратом класса T2 [9]. При построении расчетной модели платформы с КЦ используется динамическая силовая характеристика (см. рис. 8) поглощающего аппарата, полученная при столкновении испытательной платформы и вагона-бойка на скорости 7,5 км/ч [10].

Для выполнения расчета на модель платформы с установленным КЦ и на модель вагона-бойка в зависимости от их взаимного перемещения согласно точкам кривой, показанной на рис. 8, передается сила (ось ординат) в соответствии с перемещениями (ось абсцисс). Реализация такой модели нагружения учитывает реальную нелинейную силовую характеристику, а также эффекты закрытия поглощающего аппарата и необратимого поглощения энергии. Для моделирования описанных выше взаимодействий через поглощающие аппараты используются конечные элементы типа *CONN3D2 [5].

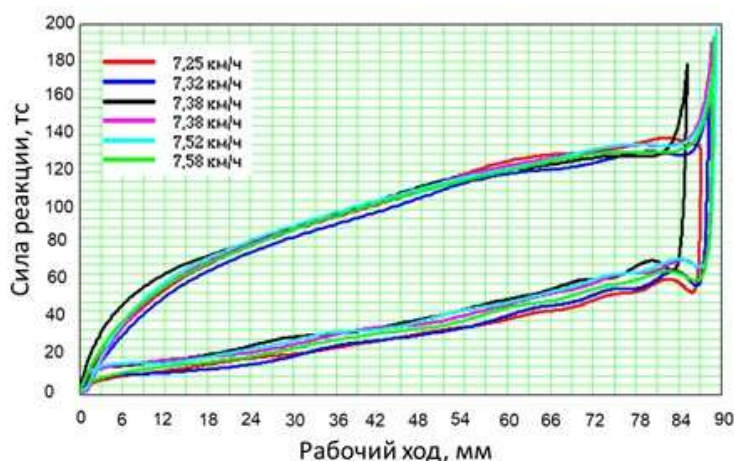


Рис. 8 Силовая характеристика поглощающего аппарата класса T2

Моделирование взаимодействия конструкции сосуда с жидкостью при ударе проводится в совместной эйлерово-лагранжевой постановке, где расчет деформации сосуда проводится на конечно-элементной сетке, перемещения которой ассоциированы с лагранжевой системой координат, а расчет перемещения воды на сетке, ассоциированной с эйлеровой системой координат.

В такой постановке элементы сетки остаются неподвижными и недеформированными, а жидкость может перемещаться в объеме эйлеровой сетки в ограничении контактными взаимодействиями с внутренней поверхностью контейнера-цистерны.

На рис. 9 показана расчетная модель КЦ, помещенная в параллелепипед эйлеровой сетки. Граница объема воды на рисунке показана красной линией. Объем воды моделируется трехмерными конечными элементами типа EC3D8R [5].

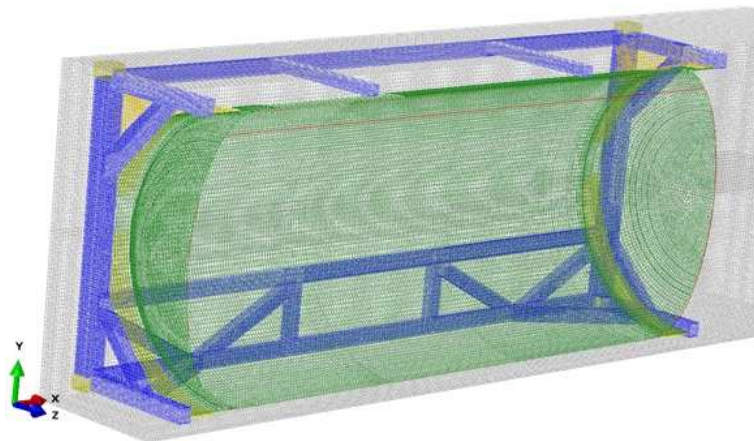


Рис. 9 Модель КЦ в параллелепипеде эйлеровой сетки

Для задания начального объема воды в параллелепипед эйлеровой сетки помещается трехмерный геометрический объем, ограниченный внутренней поверхностью цистерны из ПКМ с учетом отсеченного объема, соответствующего объему пустоты 3 % от общего объема. Затем средствами препроцессора ABAQUS с этим объемом ассоциируется масса воды.

Для учета динамического взаимодействия сосуда из ПКМ и воды, между внутренней поверхностью сосуда и поверхностью, соответствующей границе объема воды, задаются условия механического контакта *General Contact [5]. Используемая модель контактного взаимодействия не накладывает ограничений на величину относительных перемещений и вращений узлов поверхностей механического контакта в конечно-элементной модели, а также допускает разделение поверхностей после контакта. Поверхности взаимодействуют без трения. Вся модель находится под действием силы тяжести. Задается условие симметрии относительно вертикальной срединной плоскости модели.

Для моделирования перемещений воды внутри эйлеровой сетки в результате динамического взаимодействия с сосудом используется уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена [11]

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{1 - s\eta^2} [1 - \Gamma_0 \eta / 2] + \Gamma_0 \rho_0 e. \quad (4)$$

Уравнение (4) предполагает линейную связь скорости ударной волны U_s и массовой скоростью среды U_p , т.е.

$$U_s = C_0 + sU_p, \quad (5)$$

где C_0 — скорость звука в жидкости перед фронтом ударной волны.

В уравнении (4) величина

$$\eta = 1 - \rho_0 / \rho = U_p / U_s, \quad (6)$$

где ρ_0 и ρ — начальная плотность и плотность за фронтом ударной волны соответственно.

Значения параметров уравнения (4) для воды в рассматриваемом в расчетах КЦ диапазоне давлений приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физические параметры воды

Плотность ρ_0 , кг/м ³	1000
Динамическая вязкость, Па·с	0,001
Скорость звука C_0 , м/с	1450
s	0
Коэффициент Грюнайзена Γ_0	0

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ И ИСПЫТАНИЙ

Для проведения сравнительного анализа результатов расчетов и испытаний была разработана карта тензометрирования деформаций (см. рис. 10, а — в). В точках, указанных на рис. 10, а — в, устанавливались трехосевые розетки тензодатчиков (РТ) с помощью которых измерялись компоненты деформаций оболочки сосуда из ПКМ в ходе проведения испытаний. На основании этих измерений вычислялись главные деформации [12], значения которых, в свою очередь, сравнивались с результатами моделирования.

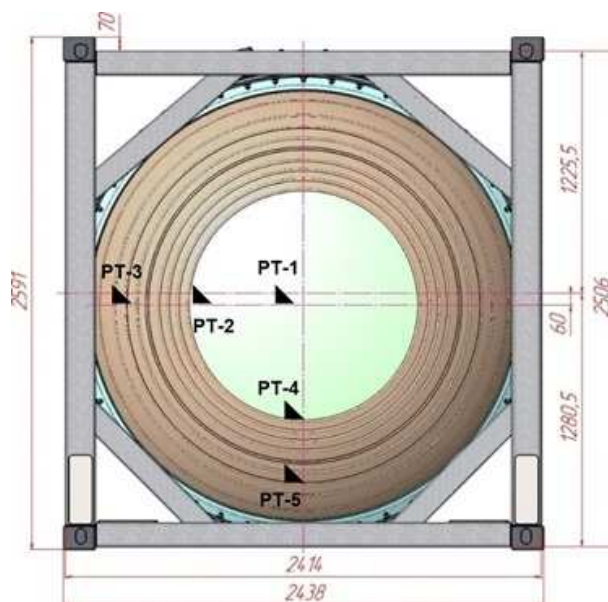


Рис. 10, а Схема наклейки тензодатчиков на сосуд из ПКМ. Вид с торца

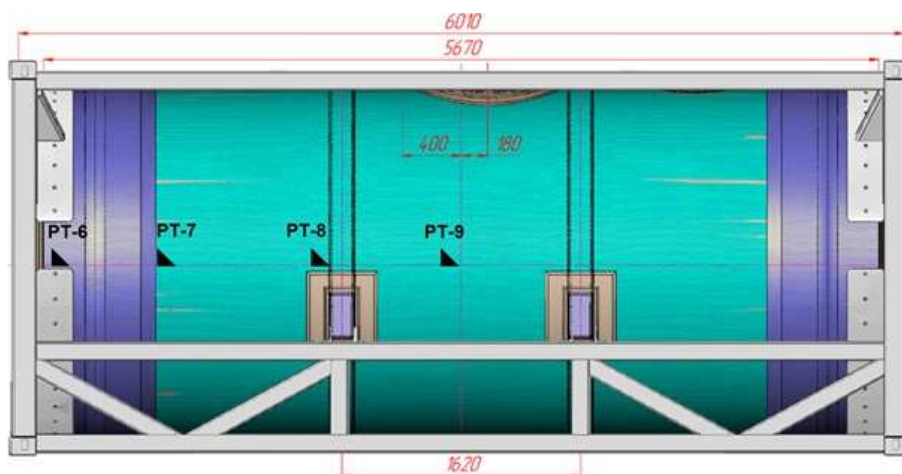


Рис. 10, б Схема наклейки тензодатчиков на сосуд из ПКМ. Вид с боку

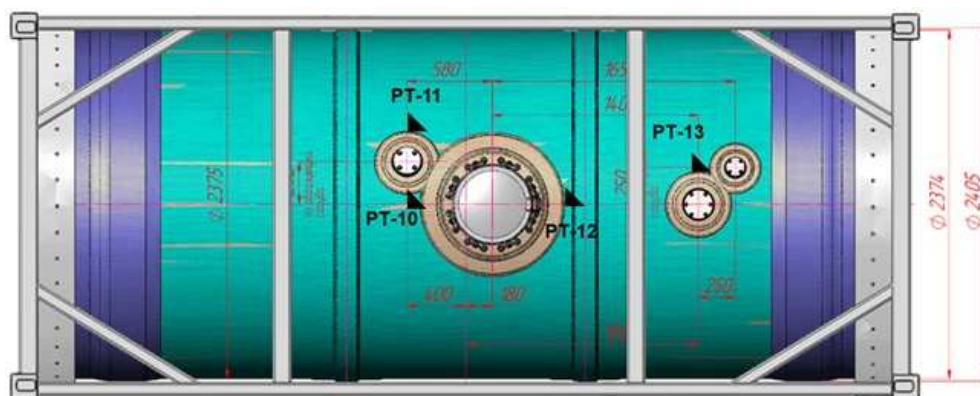


Рис. 10, в Схема наклейки тензодатчиков на сосуд из ПКМ. Вид с верху

На рис. 11 показан пример расчета максимальной растягивающей деформации торцевого днища сосуда из ПКМ в ходе динамических испытаний при скорости соударения 14 м/с. На рис. 12 показано изменение этих деформаций в критическом элементе днища с течением времени.

В результате расчета определено, что критическая зона с наибольшими максимальными деформациями и напряжениями расположена на торцевой стенке сосуда из ПКМ со стороны удара и распространяется вдоль границы соединения инфузионной части сосуда и части, полученной методом филаментной намотки (см. рис. 11). Пиковые значения деформаций торцевого днища достигнуты менее чем через 0,1 с после начала ударного взаимодействия (см. рис. 12).

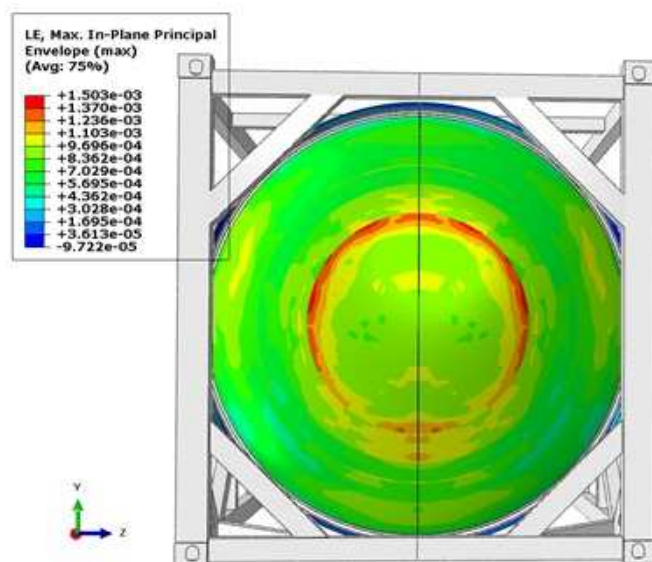


Рис. 11 Пример расчета максимальной растягивающей деформации торцевого днища сосуда из ПКМ

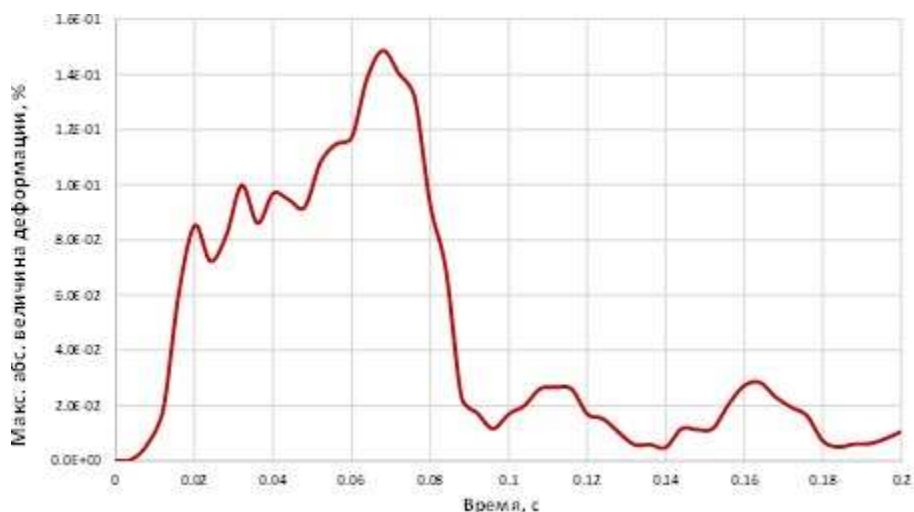


Рис. 12 Изменение максимальной растягивающей деформации в критическом элементе торцевого днища сосуда из ПКМ при ударе

В результате моделирования динамических испытаний получен масштабированный по амплитуде и отфильтрованный в соответствии с требованиями [7] сигнал «ускорение — время», записанный в точках нижних угловых фитингов модели (см. рис. 13). Этот сигнал затем был преобразован в кривую СУО по методике, описанной в п. 3.

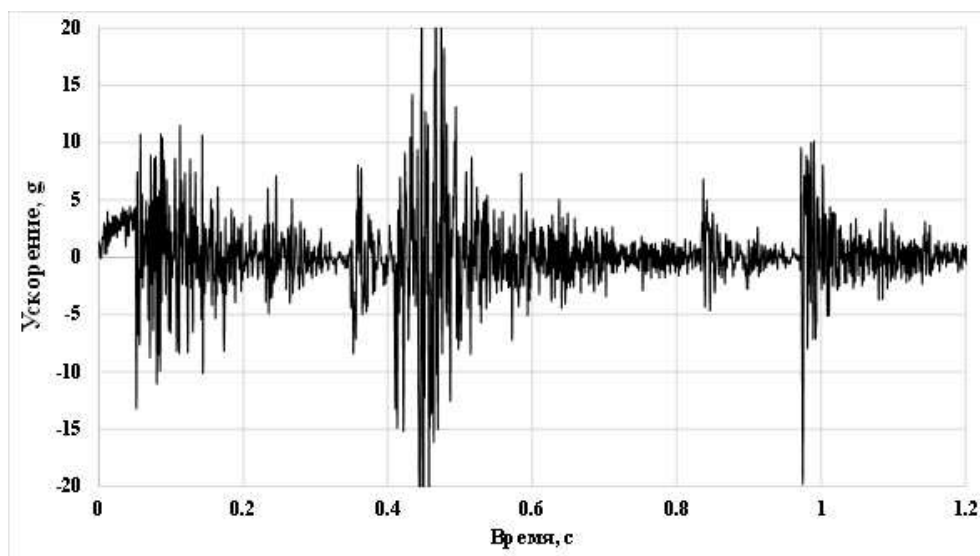


Рис. 13 Осциллограмма моделируемого сигнала ускорение-время в точках нижних угловых фитингов

Для верификации расчетной модели динамических испытаний проводится сравнение результатов расчетов с результатами испытания для скорости соударения 14 км/ч. Измеренные ускорения при этом на фитинге F равнялись 11,8g, на фитинге G — 10,9g. На рис. 14 показаны экспериментальные и рассчитанная кривые СУО. Как видно из рисунка, рассчитанная кривая СУО (оранжевая кривая) при частоте 3 Гц выходит на уровень эталонной СУО. Экспериментальные кривые СУО (синяя и зеленая кривая) выходят на уровень эталонной СУО при частоте 9 Гц.

Достаточно хорошее соответствие рассчитанной на основании результатов моделирования кривой СУО экспериментальным кривым указывает на то, что уровень динамического нагружения при моделировании соответствует уровню нагружения при проведении испытания при ускорении до 12g.

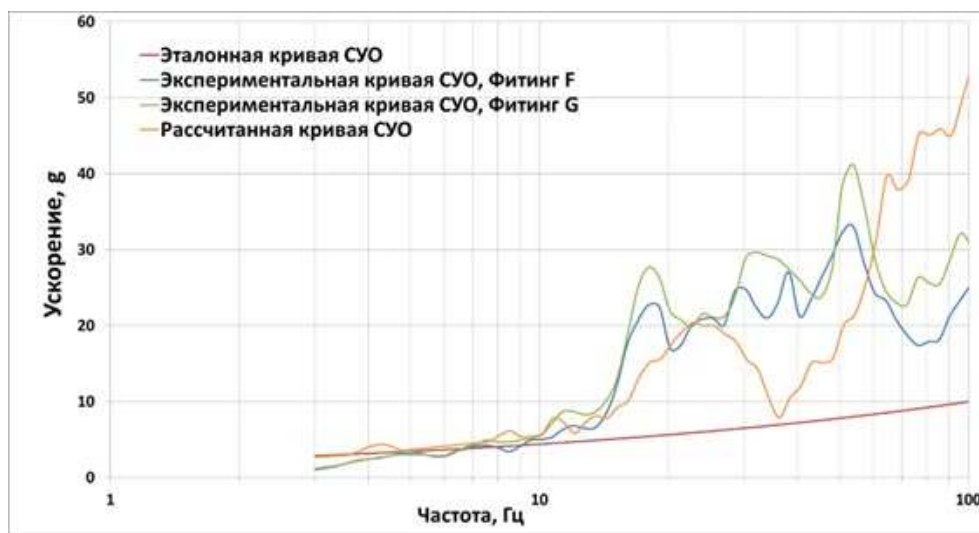


Рис. 14 Сравнение экспериментальных и расчетной кривых СУО

На рис. 15 приведено сравнение пиковых значений максимальных главных деформаций, полученных при проведении расчетов и в ходе динамического испытания. Номера розеток тензорезисторов соответствуют карте измерения деформаций, показанной на рис. 10, а — в.

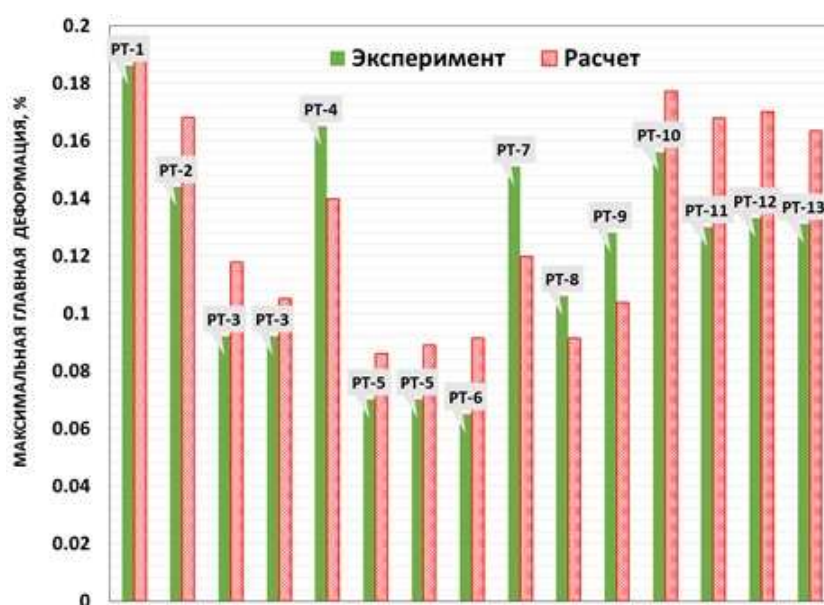


Рис. 15 Сравнение максимальных главных деформаций при проведении динамических испытаний со скоростью соударения 14 км/ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика моделирования динамических испытаний КЦ с сосудом из полимерных композиционных материалов. Результаты виртуальных испытаний КЦ модели КЦХ.ПКМ-25/0.4 разработки АО «Уралкриомаш», применяемого для транспортировки химически агрессивных продуктов, показали хорошее соответствие результатам натурных испытаний как в величинах деформаций, так в кривых СУО, что позволило валидировать разработанную методику. Настоящая методика может быть распространена на контейнеры-цистерны с металлическими сосудами.

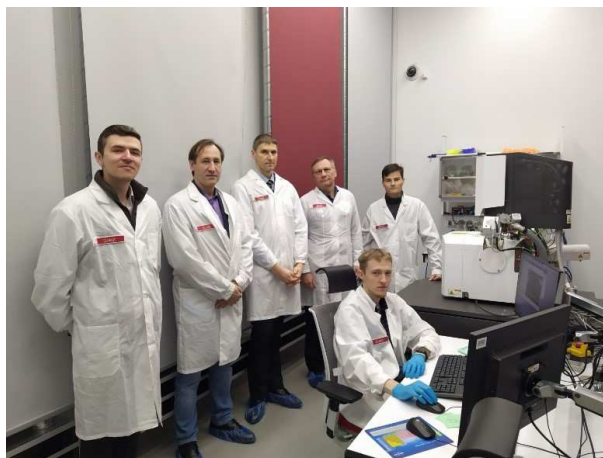
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков А.Е., Сергеичев И.В., Фетисов А.В., Докучаев С.В. Разработка и сертификация контейнера-цистерны с несущим сосудом из полимерных композиционных материалов для мультимодальных перевозок продуктов химии и нефтехимии // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2015. №№ 38/39. с. 101 — 105.
2. Правила изготовления контейнеров. Российский морской регистр судоходства, 2021.
3. Addendum to the Report of the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals on its tenth session ST/SG/AC.10/48/Add.1 — Электронная версия <http://unece.org/sites/default/files/2021-03/ST-SG-AC10-48a1e.pdf>
4. LLorca J., González C., Molina-Aldareguía J.M., Segurado J., Seltzer R., Sket F., Rodríguez M., Sádaba S., Muñoz R., and Canal L.P. Multiscale Modeling of Composite Materials: a Roadmap Towards Virtual Testing // Adv. Mater. 2011, 23, pp. 5130 — 5147.
5. ABAQUS User Manual Documentation, 2019
6. Vasiliev V.V. Composite pressure vessels: Design, analysis and manufacturing // Bull Ridge Publishing, 2009, p. 704.
7. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods – Manual of Tests and Criteria ST/SG/AC.10/11/Rev.6, United Nations, 2015.
8. Kelly R., Richman G. Principles and Techniques of Shock Data Analysis, 1969, 105 p.
9. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки// Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 2011.
10. Протокол испытаний на динамический удар в продольном направлении, Контейнер-цистерна модели КЦХ-25/0,4-01 производства ОАО «Уралкриомаш» (заводской номер 02/10). Испытательный центр открытого акционерного общества «Научно-внедренческий центр «Вагоны». Санкт-Петербург, 2010.
11. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. — 688 с.
12. Кобаяси А. Экспериментальная механика. Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 616 с.

REFERENCES

1. Ushakov A.E., Sergeichev I.V., Fetisov A.V., Dokuchaev S.V. *Razrabotka i sertifikatsiya kontejnera-cisterny s nesuschim sosudom iz polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya multimodalnykh perevozok produktov himii i neftehimii* [Development and certification of a tank container with a vessel from polymer composite materials for multimodal transportation of chemical and petrochemical products] // Research Bulletin of Russian Maritime Register of Shipping. 2015. Nos. 38/39. pp. 101 — 105.
2. Rules for the Manufacture of Containers. Russian Maritime Register of Shipping, 2021.
3. Addendum to the Report of the Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals on its tenth session ST/SG/AC.10/48/Add.1 — Website <http://unece.org/sites/default/files/2021-03/ST-SG-AC10-48a1e.pdf>
4. LLorca J., González C., Molina-Aldareguía J.M., Segurado J., Seltzer R., Sket F., Rodríguez M., Sádaba S., Muñoz R., and Canal L.P. Multiscale Modeling of Composite Materials: a Roadmap Towards Virtual Testing // *Adv. Mater.* 2011, 23, pp. 5130 — 5147.
5. ABAQUS User Manual Documentation, 2019
6. Vasiliev V.V. Composite pressure vessels: Design, analysis and manufacturing // Bull Ridge Publishing, 2009, p. 704.
7. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods — Manual of Tests and Criteria ST/SG/AC.10/11/Rev.6, United Nations, 2015
8. Kelly R., Richman G. Principles and Techniques of Shock Data Analysis, 1969, 105 p.
9. *Apparaty pogloschayushchie stsepyh i avtostsepyh ustrojstv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tehnicheskie trebovaniya i pravila priemki* [Absorbing devices for coupling and automatic couplers of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules] // Evrazijskij sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, Minsk, 2011.
10. *Protokol ispytany na dinamichesky udar v prodolnom napravlenii, Konteyner-tsisterna modeli KCH-25/0,4-01 proizvodstva OAO "Uralkriomash" (zavodskoj nomer 02/10)* [Test report for dynamic impact in longitudinal direction] St. Petersburg, 2010.
11. Zeldovich Ja.B., Rajzer Ju P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of impact waves and high temperature phenomena] M.: Nauka, 1966. — 688 p.
12. Kobayashi A. *Eksperimentalnaya mekhanika* [Handbook on experimental mechanics] transl. from English — M.: Mir, 1990. 616 p.

ОБОЗРЕНИЕ: СПЕЦИАЛИСТЫ РС ПРОШЛИ ОБУЧЕНИЕ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ



Группа специалистов Российского морского регистра судоходства прошла обучение по программе «Аддитивные технологии металла» в Сколковском институте науки и технологий.

В рамках курса специалисты РС изучили современные тенденции, перспективы и особенности применения разнообразных методов послойного наращивания изделий. Обучение состояло как из теоретической, так и из практической подготовки.

Актуальность темы обусловлена увеличением количества поступающих в РС запросов о возможности применения аддитивных технологий при изготовлении изделий для судов. Также при активном участии Регистра в Международной ассоциации классификационных обществ сегодня обсуждаются вопросы по созданию унифицированных требований, которые позволят широко применять эту прогрессивную технологию в области судостроения и судоремонта.

Аддитивные технологии формируют новый подход к получению готовых изделий. Метод послойной печати позволяет получать сплавы разнородных металлов с постепенным изменением концентрации веществ внутри изделия, а также изготавливать детали сложной формы, которые невозможно получить с использованием традиционных способов.



НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 629.123

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРОВЕДЕНИЯ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Д.А. Мебрахту, Санкт-Петербургский морской технический университет, Хьюстон, e-mail: daniel.mebrahtu@yahoo.com

О.Я. Тимофеев, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: oleg_timof@mail.ru

Предлагаемая статья описывает результаты статистического анализа международных баз данных по аварийным событиям на море. В качестве источников анализа используются соответствующие базы данных по авариям Морской администрации США. Аварийные случаи распределяются по следующим видам: столкновения (навалы), столкновения судов, пожары (взрывы), потеря остойчивости, посадка на грунт, превышение безопасных пределов крена или дифферента, потеря плавучести или ее снижение за безопасные пределы. Выборка аварийных случаев при проведении морских операций позволила получить статистическую оценку риска проведения морской операции, классифицировать аварии и их причины, оценить парциальный риск. За меру риска принят страховой риск (произведение вероятности аварии на стоимость компенсации последствий страховой компанией). Ранжирование парциальных рисков позволило определить наиболее приоритетные направления для дальнейшего совершенствования Правил разработки проведения морских операций.

Ключевые слова: морские операции, оценка риска, страхование, аварии на море

QUANTITATIVE STATISTICAL RISK ASSESSMENT OF MARINE OPERATIONS

D.A. Mebrahtu, St. Petersburg State Marine Technical University, Houston, e-mail: daniel.mebrahtu@yahoo.com

O.Ya. Timofeev, DSc, professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: oleg_timof@mail.ru

The proposed article describes the results of statistical analysis of international databases on emergency events at sea. The relevant accident databases of the US Maritime Administration are used as sources of analysis. Accidents are divided into the following types: collisions (bulk), ship collisions, fires (explosions), loss of stability, landing on the ground, exceeding the safe limits of roll or trim, loss or decrease beyond the safe limits of buoyancy. A sample of accidents during marine operations has allowed us to obtain a statistical assessment of the risk of conducting a marine operation, classify accidents and their causes, and assess the partial risk. The insurance risk is taken as a measure of risk (the cost of compensation for the consequences by the insurance company multiplied by the accident probability). The ranking of partial risks has made it possible to determine the areas of most priority for further improvement of the RS Rules for Planning and Executing of Marine Operations.

Keywords: marine operations, risks evaluation, insurance, marine accidents

ВВЕДЕНИЕ

Аппарат оценки риска техногенных аварий широко используется при разработке нормативной базы, методик страхования, совершенствовании методов планирования и подготовки операций на море. Морские операции, как правило, проводятся специальными судами и квалифицированными экипажами по заранее подготовленному плану с постоянным мониторингом гидрометеорологической обстановки и контролем состояния привлекаемых технических средств. Тем не менее, практика показывает, что даже самая тщательно подготовленная и квалифицированно проводимая морская операция может вызвать неблагоприятное или аварийное событие с ненулевой вероятностью. Анализ вероятности появления и потерь при таких неблагоприятных событиях принято называть оценкой риска. Оценка риска может быть качественной или количественной.

В документах Международной морской организации (ИМО) используется матрица риска (см. рис. 1), которую целесообразно отнести к качественному методу оценки риска. По горизонтальной оси матрицы отложена условная вероятность, описываемая на интуитивном уровне. По вертикальной оси дискретные значения интуитивных последствий аварийных событий. Дискретная матрица зависимости «вероятность — последствия» разделена на зоны риска: запрещенные (красные), нежелательные (желтые) и разрешенные (зеленые ячейки). Расстановка численных значений границ ячеек по вертикали и горизонтали позволяет перевести качественную оценку риска в дискретно-количественную.

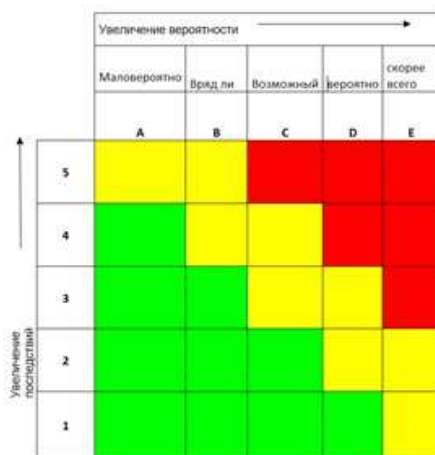


Рис. 1 Матрица оценки риска

Матрицы рисков обеспечивают основу для подробного рассмотрения вероятности и последствий (ущерба) аварий. Их можно использовать для ранжирования в порядке значимости, отсеивания незначительных или оценки необходимости снижения риска каждой опасности. Матрица рисков используется для измерения вероятности и последствий (ущерба) обычно от 3 до 6 категорий. В статье использован стандарт ISO 17776 [2]. Большинство рекомендаций [3, 4] классификационных обществ по оценке рисков морских операций ссылаются именно на этот стандарт.

Общей принятой количественной оценкой риска R является [7] произведение вероятности неблагоприятных событий Q на стоимость компенсации последствий такого события C :

$$R=Q \cdot C.$$

Фактически, при таком определении количественного риска, величина R может быть интерпретирована как страховой сбор нулевой рентабельности. Обычно вероятность Q можно определить статистически. Определение стоимости компенсации потерь C часто трудно определяемая по причине конфиденциальности базовой информации.

В настоящей работе показаны результаты статистического обобщения данных по авариям при проведении морских операций [1, 3] с целью количественной оценки риска, построена классификация аварийных случаев и причин аварий, определены парциальные вероятности по типам аварий и их причинам.

Общее количество морских операций определяется на основе годового дохода всех участников рынка морских операций США и средней стоимости морских операций. Среднегодовая выручка всех участников рынка морских операций США составляет 154 млрд долларов [8]. Средняя стоимость морской операции составляет 20 тыс. долларов в сутки. Если предположить, что эффективность эксплуатации судна составляет 90 %, эта цифра составляет 6,57 млн долларов. Таким образом, общее количество морских операций составляет около 23440, а общая вероятность аварии составляет $8,25 \times 10^{-3}$.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ АВАРИЙНЫХ СЛУЧАЕВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА

Международные базы данных, описывающие аварийные случаи, позволяют предложить следующую классификацию.

1. Столкновение (навалы) судов, участвующих в морской операции. Скорости сближения при навалах небольшие, но на объем повреждений влияет волнение при аварии.

2. Столкновение судов, участвующих в морской операции. Столкновение отличается от навала большей скоростью сближения.

3. Пожар или взрыв. Воспламенение на судне или взрыв во внутренних помещениях или наружных поверхностях. Причины пожаров и взрывов разнообразны: от неисправностей топливной или газовыпускной системы до неосторожного обращения со взрывчатыми веществами.

4. Посадка на грунт в результате некорректных действий экипажа, отсутствии информации по глубинам, воздействия гидрологических факторов (отлив, волнение, течение), ошибки при планировании или проведении операции.

5. Потеря остойчивости. Причинами опрокидывания могут быть полученные повреждения, а также ошибки при подготовке и проведении операции, смещение груза и т.д.

6. Повышение крена или дифферента до опасных для продолжения операции значений.

7. Потеря или снижение плавучести за безопасные пределы.

Обработка данных по авариям позволила построить диаграмму статистических частот по видам аварий (см. рис. 2).

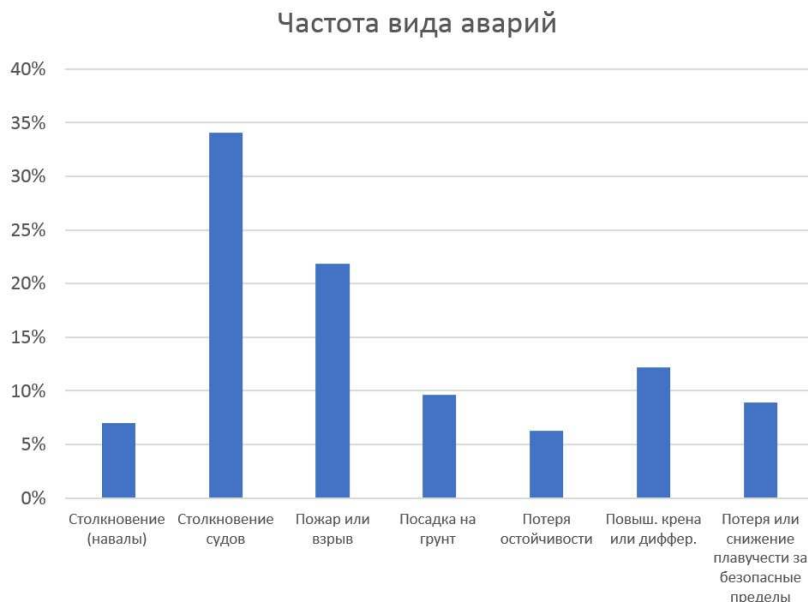


Рис. 2 Распределение статистических частот по видам аварий

Исходя из вероятности аварийных операций, указанной выше, и частоты, указанной на рис. 2, вероятность каждого типа аварий в США приведена в табл. 1.

Таблица 1

Вероятность аварий	
Вид аварии	Вероятность аварии данного вида ($\times 10^{-4}$)
Столкновение (навалы)	5,81
Столкновение судов	28,11
Пожар или взрыв	18,03
Посадка на грунт	7,94
Потеря остойчивости	5,19
Превышение крена или дифферента	10,08
Потеря или снижение плавучести за безопасные пределы	7,33

Сводная таблица (см. табл. 2) составляющих и суммарных средних финансовых потерь по видам аварий при проведении морских операций за 2006 — 2021 гг. Ущерб окружающей среде оценивался на основе стоимости очистки. 200 тыс. долларов США — это среднестатистические расходы на очистку 1000 галлонов (около 3785 л) дизельного топлива. Стоимость травм и смертей в долларах соответствует данным FEMA (Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям) [9].

Таблица 2

Финансовые потери по видам аварий						
Виды аварий	Средний материальный ущерб (%)	Средний ущерб окружающей среде (%)	Травмы			Среднегодовой ущерб на одну аварию (тыс. USD)
			Легкие (%)	Серьезные (%)	Гибель (%)	
Столкновение (навалы)	98,5	0,4	0,1	1,0	0,0	760,3
Столкновение	54,4	17,1	1,6	5,8	21,1	718,5
Пожары или взрывы	57,9	9,7	0,2	7,2	25,0	874,0
Посадка на грунт	53,2	14,8	0,4	3,1	28,5	372,6
Потеря остойчивости	31,4	12,3	1,0	2,6	52,7	1371,6
Превышение крена или дифферента	8,6	0,9	0,4	5,3	84,8	513,6
Потеря или снижение плавучести за безопасные пределы	23,4	0,1	1,0	8,1	57,4	673,6

Величина риска для каждого типа аварии рассчитывается по формуле, упомянутой во введении, и представлена в табл. 3.

Таблица 3

Определение риска по видам аварий			
Вид аварии	Вероятность аварии (Q) ($\times 10^{-4}$)	Ущерб (C) (тыс. USD)	Риск (R) (тыс. USD/ год)
Столкновение (навалы)	5,81	760,3	0,44
Столкновение	28,11	718,5	2,02
Пожары или взрывы	18,03	874,0	1,58
Посадка на грунт	7,94	372,6	0,30
Потеря остойчивости	5,19	1371,6	0,71
Превышение крена или дифферента	10,08	513,6	0,52
Потеря или снижение плавучести за безопасные пределы	7,33	673,6	0,49

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИН АВАРИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Причина аварий могут быть объединены в три большие группы.

1. Человеческий фактор, или ошибка экипажа, который в свою очередь может быть вызван рядом обстоятельств, объединенных в подгруппы:

- отсутствие эффективного общения между персоналом;
- недостаточная подготовка и отсутствие опыта;
- некорректная оценка внешних обстоятельств.

2. Метеорологические условия, которые изменились в процессе выполнения операции не в соответствии с прогнозом.

3. Отказы техники. Этот вид отказов можно разделить на следующие группы:

- отказ двигателя;
- нарушение конструктивной целостности;
- отказ или неисправность пропульсивного комплекса;
- отказ или неисправность электрооборудования, средств навигации и связи;
- отказ буксировочного, кранового или другого технологического оборудования.

В целом, проведенный статистический анализ показывает следующую частотность причин аварий (см. рис. 3).

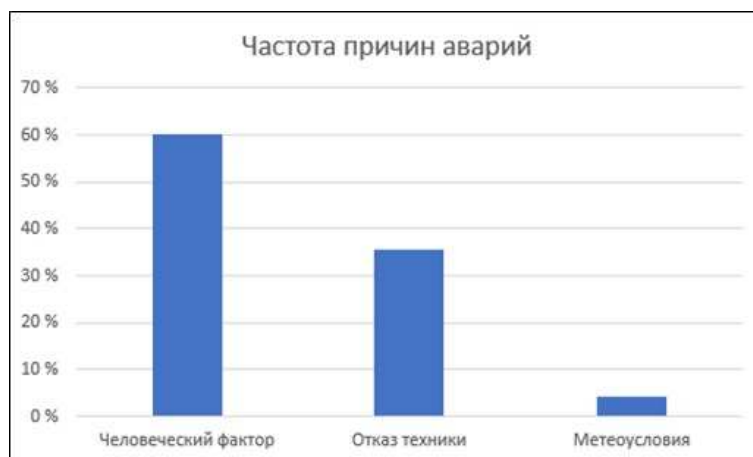


Рис. 3 Распределение частот по группам причин аварий

3. КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА УЩЕРБА ПРИ АВАРИИ

Качественная оценка ущерба может быть определена, как указано в табл. 4.

Таблица 4

Уровни качественной оценки ущерба

Описательный	Персонал	Окружающая среда	Активы/Операции	Репутация
ОБШИРНЫЙ (MAJOR) (5)	Смертельные случаи (Fatality)	Глобальный или национальный эффект. Срок восстановления > 10 лет	Серьезный ущерб активам/ длительная потеря операций Затраты на проект/производственные последствия > 10 млн долларов США	Международное влияние/негативное воздействие
СЕРЬЕЗНЫЙ (SERIOUS) (4)	Серьезная Травма (Major injury)	Срок восстановления > 1 года Стоимость реставрации > 1 млн долларов США	Значительное повреждение оборудования/задержка в эксплуатации на несколько дней Затраты на проект/производственные последствия > 1 млн долларов США	Обширное национальное влияние
УМЕРЕННЫЙ (MODERATE) (3)	Небольшая травма (Minor injury)	Срок восстановления > 1 месяца Стоимость реставрации > 10 тыс. долларов США	Незначительное повреждение оборудования/задержка в эксплуатации до одного дня Затраты на проект/производственные последствия > 100 тыс. долларов США	Ограниченное национальное влияние
НЕЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ (MINOR) (2)	Заболевание или легкая травма (Illness or slight injury)	Срок восстановления < 1 месяца Стоимость реставрации < 10 тыс. долларов США	Незначительные поломки оборудования/отсутствие задержек в работе Затраты на проект/производство < 100 тыс. долл. США	Местное воздействие
НЕЗАМЕЧЕННЫЙ (NEGLECTIBLE) (1)	Первая помощь и без потери работы	Отсутствие воздействия на окружающую среду	Отсутствие вероятного повреждения или потери функции при очень незначительном прерывании работы	Без влияния

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенной количественной оценки риска аварий при проведении морских операций, можно ранжировать риск по причинам возникновения аварий следующим образом (в порядке возрастания количественного риска):

1. посадка на грунт;
2. столкновение (навалы);
3. потеря или снижение плавучести за безопасные пределы;
4. превышение крена или дифферента;
5. потеря остойчивости;
6. пожары или взрывы;
7. столкновение.

Такое ранжирование позволяет сформировать направления совершенствования Правил исходя из критерия максимального улучшения безопасности в части как технических, так и организационных мероприятий. Табл. 5 содержит сводную качественную оценку риска морских операций по данным [1, 3], принятую морской администрацией США. Представленный подход целесообразно применить для совершенствования Правил по разработке и проведению морских операций [6].

Правила планирования и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства (Правила, Правила РС) предусматривают как одобрение проекта морской операции, так и техническое наблюдение за проведением. Согласно Правилам, морские операции, поднадзорные РМРС, могут быть:

- заводскими операциями на плаву у достроечной набережной в защищенной заводской акватории;
- неограниченные морские операции в открытом море или полузащищенной акватории.

По длительности РС разделяет морские операции на:

- неограниченные по погодным условиям длительностью более 72 ч;
- ограниченные по погодным условиям длительностью менее 72 ч.

Основная классификация морских операций подразумевает их категорирование.

Категория 1. Грузоподъемные и монтажные операции с объектами массой от 35 до 300 т.

Категория 2. Хорошо контролируемые операции: такие, как грузоподъем и монтаж объекта свыше 300 т, спуск объекта в защищенной акватории, короткая буксировка, транспортировка объекта на специализированном плавучем средстве.

Категория 3. Сложные операции, к которым относятся длительная буксировка, накат на плавучий объект, монтаж в открытом море опорного основания.

Категория 4. Операции с высокой степенью риска, а именно: дальняя океанская буксировка, монтаж верхнего строения.

Рекомендации раздела 3 настоящей статьи могут быть адаптированы к задаче совершенствования Правил РС по следующим направлениям.

1. Снизить риски, связанные с человеческим фактором для операций категории 1 и 2 можно обязательным предварительным моделированием и тренингом экипажей на специализированных тренажерах [5].

2. Для ограниченных по погодным условиям операций ввести требования по гидрометеорологическому обеспечению лицензированной Регистром организацией.

3. Ввести требования по дополнительным средствам связи, периодичности отдыха и дублированию вахты для снижения риска ошибок экипажа.

Более детальный дальнейший анализ технических причин аварий позволит сформировать направления совершенствования Правил в отношении судов и оборудования, задействованного в морских операциях.

Таблица 5

Сводная качественная оценка риска морских операций по данным [1, 3]

№	Деятельность / Задача	Опасность	Причина опасности	Возможные последствия	Вероятность тн. (А-Е)	До действия тн. (А-Е)	Риск д. (1-5)	Снягчающие действия Предложено / включено	Вероятность тн. (А-Е)	После действия тн. (А-Е)	Риск д. (1-5)	Примечания / ссылки	Ответс. Чел. / Отдел
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРОВЕДЕНИЯ МОРСКОЙ ОПЕРАЦИИ													
3	Буксировка и швартовка	Соприкосновение	•отсутствие эффективной связи между капитаном и пилотом •неопытность или беззаботность пилота/капитана •метеусловия •техническая неисправность швартовного, рулевого и навигационного устройства	•Травмы / смерть •Повреждение корпуса / оборудования •Ущерб окружающей среде •Ущерб активам	D	3	S	а. Непрерывное обучение персонала б. Установление и обновление процедур в. Модернизация коммуникационного оборудования е. Проведение своевременного текущего осмотра, технического обслуживания и надлежащего ремонта г. Обеспечение соблюдения норм рабочего времени. д. Обеспечение своевременного получения точного	A	3	A	Отчеты НСБТ	• Капитан/Вахть • Пилот • экипаж • Адм. Порта • Судовладелец • Судорем. завод
4	Транзит	Опрокидывание	•неадекватная процедура погрузки и разгрузки •метеусловия •Неопытный или небрежный персонал •Повреждение корпуса и отсутствие водонепроницаемости •небрежность при закрытии палубных люков •неверная оценка веса и центра тяжести груза •неправильный расчет остойчивости судна и присвоение журнала остойчивости	•Травмы / смерть •Повреждение корпуса / оборудования •Ущерб окружающей среде •Ущерб активам	B	4	S	а. Обеспечение погрузки и разгрузки судна в соответствии с буклетом б. Обеспечение остойчивости б. Обеспечение своевременного и точного прогноза погоды и поиск убежища в непогоду в. Определение правильного веса и центра тяжести судна в порожнем состоянии при постройке е. Проведение своевременного текущего осмотра, технического обслуживания и надлежащего ремонта г. минимизировать количество незаполненных танков д. Обеспечение соответствия количества и	A	4	A	Отчеты НСБТ	• Капитан/Вахть • Пилот • экипаж • Адм. Порта • Судовладелец • Судорем. завод

Таблица 5 (продолжение)

№	Деятельность / Задача	Опасность	Причина опасности	Возможные последствия	До действия по Вероятности (А-Е)	Риск (1-5)	Смягчающие действия Предложено / включено	После действия Вероятность (А-Е)	Риск (1-5)	Примечания / ссылки	Ответс. Чеп. / Отдел
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРОВЕДЕНИЯ МОРСКОЙ ОПЕРАЦИИ											
5	Транзит	Заземление	• Неопытный или небрежный персонал • не следит за курсом судна в результате утомляемости и сонливости моряка • эффекты алкоголя и наркотиков • несоответствующая батиметрическая информация и навигационная карта	• Травмы / смерть персонала • Повреждение корпуса / оборудования • Ущерб окружающей среде • Ущерб активам	В	4	а. Непрерывное обучение персонала б. Установление и обновление процедур в. Современное плановое техническое обслуживание е. Обеспечение соблюдения норм рабочего времени г. Применение жестких правил в отношении алкоголя и наркотиков на борту. д. Модернизация	А	4	Отчеты НСБТ	• Капитан/Вахты • Пилот • экипаж • Адм. Порты • Судовладелец • Судорем. завод
6	Транзит	Потопление	• Несоблюдение планового осмотра, технического обслуживания и надлежащего ремонта • Повреждение корпуса • отсутствие водонепроницаемости • Неисправность уплотнения гребного вала • Неопытный или небрежный персонал • отсутствие в компании процедур, требующих закрытия люков на палубе во время движения судна • метеусловия	• Травмы / смерть персонала • Повреждение корпуса / оборудования • Ущерб окружающей среде • Ущерб активам	В	4	а. Непрерывное обучение персонала б. Установление и обновление процедур требующих закрытия люков на палубе во время движения судна в. Проведение своевременного текущего осмотра, технического обслуживания и надлежащего ремонта е. Обеспечение количества и положения водонепроницаемых конструкций в соответствии с классификационным обществом	А	4	Отчеты НСБТ	• Капитан/Вахты • Пилот • экипаж • Адм. Порты • Судовладелец • Судорем. завод

Таблица 5 (окончание)

№	Деятельность / Задача	Опасность	Причина опасности	Возможные последствия	До действия по		Смягчающие действия / Предложено / включено	После смягчающих		Примечания / ссылки	Ответс. чел. / Отдел
					Вероятн.	Риск		Вероятн.	Риск		
					тн. (А-Е)	д. (1-5)		тн. (А-Е)	д. (1-5)		
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРОВЕДЕНИЯ МОРСКОЙ ОПЕРАЦИИ											
7	Транзит	Повреждение корпуса / оборудования	• Неэффективный осмотр и техническое обслуживание • Неопытный или небрежный персонал • Метеоусловия • Неправильная оценка погоды • Несоблюдение правил и процедур • Несоблюдение правил и процедур • Несоблюдение правил и процедур	• Травмы / смерть корпуса / оборудования • Ущерб окружающей среде • Ущерб активам	В	4	а. Проведение своевременного текущего осмотра, технического обслуживания и надлежащего ремонта б. Установление и обновление процедур в. Непрерывное обучение персонала е. Обеспечение соблюдения норм рабочего времени г. Применение жестких правил в отношении алкоголя и наркотиков на борту. д. Модернизация навигационного оборудования	А	4	А	• Капитан/Бахть • Пилот • экипаж • Адм. Порты • Судовладелец • Судорем. завод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marine Accident Reports (National Transportation Safety Board NTSB), <https://ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/marine.aspx>
2. ISO 17776. Petroleum and natural gas industries — Offshore production installations — Major accident hazard management during the design of new installations, 2016.
3. Marine Casualties and Incidents, <https://gis.imo.org/Public/Default.aspx>
4. Marine risk assessment, DNV, Offshore technology report 2001/063.
5. Тренажер КГНЦ. (Trainer KSRC) <https://krylov-centre.ru/experimental/base-simulation/>
6. Правила разработки и проведения морских операций, Российский морской регистр судоходства, 2010.
7. Вальдман Н.А., Жарких Н.В., Маляренко Н.Л., Яковлев Д.М. Анализ риска и обеспечение безопасности при проведении морских операций и работ на шельфе. Монография под редакцией О.Я. Тимофеева. Издательство ФГУП «Крыловский ГИИ», 2018.
8. <https://www.americanmaritimepartnership.com/u-s-maritime-industry/economic-security/>
9. Unit 3. The benefit-cost model https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-05/fema_bca_visuals_unit-3.pptx

REFERENCES

1. Marine Accident Reports (National Transportation Safety Board NTSB), <https://ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/marine.aspx>
2. ISO 17776. Petroleum and natural gas industries — Offshore production installations — Major accident hazard management during the design of new installations, 2016.
3. Marine Casualties and Incidents, <https://gis.imo.org/Public/Default.aspx>
4. Marine risk assessment, DNV, Offshore technology report 2001/063
5. Trainer KSRC <https://krylov-centre.ru/experimental/base-simulation/>
6. Rules for Planning and Execution of Marine Operations the Development and conduct of maritime operations. Russian Maritime Register of shipping, 2010. (In Russian)
7. Waldman N.A., Zharkikh N.V., Malyrenko N.L., Yakovlev D.M. *Analiz riska i obespechenie bezopasnosti pri provedenii morskikh operatsiy i robot na shelfe* [Risk analysis and safety assurance during marine operations and offshore operations]. Ed. O.Ya. Timofeev. Publ. by KSRC, 2018.
8. <https://www.americanmaritimepartnership.com/u-s-maritime-industry/economic-security/>
9. Unit 3. The benefit-cost model https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-05/fema_bca_visuals_unit-3.pptx

УДК 627.772

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТРЕБОВАНИЙ К МОРСКИМ ОПЕРАЦИЯМ

Н.А. Вальдман, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: n_valdman@ksrc.ru

Ф.Д. Виноградов, НТО судостроителей им. академика А.Н. Крылова, Санкт-Петербург, e-mail: vfd.62@mail.ru

В.Н. Илюхин, д-р техн. наук, НТО судостроителей им. академика А.Н. Крылова, Санкт-Петербург, e-mail: sntorpsstt@yandex.ru

В.И. Таровик, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru

В статье рассматривается вопрос о целесообразности распространения сферы технического наблюдения Российского морского регистра судоходства (РС) на морские спасательные операции (МСО) в целях обеспечения безопасной эксплуатации морских платформ на всех этапах жизненного цикла в процессе освоения нефтегазовых и минеральных месторождений континентального шельфа. Действующие Правила разработки и проведения морских операций распространяются только на операции по сборке, транспортировке, буксировке, стыковке и установке на точку объекта и его частей, совершаемые при нахождении на плаву объекта или каких-либо его частей, или с использованием плавсредств. В статье приведены основные концептуальные положения, содержание которых определено посредством комплексного и системного осмысления проблем, связанных с морским спасением, в рамках единого междисциплинарного научного подхода, для последующей разработки Правил РС по подготовке и проведению МСО морских нефтегазопромысловых сооружений.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, морские операции, морские спасательные операции, поисково-спасательная операция, нормативное регулирование, безопасность морской деятельности, морская платформа

CONCEPTUAL REGULATORY AND TECHNICAL ASPECTS OF MARINE OPERATIONS REQUIREMENTS DEVELOPMENT

N.A. Waldman, PhD, Krylov State Research Center, St. Petersburg, e-mail: n_valdman@ksrc.ru

F.D. Vinogradov, Scientific and Technical Society of Shipbuilders named after A.N. Krylov, St. Petersburg, e-mail: vfd.62@mail.ru

V.N. Ilyukhin, DSc, Scientific and Technical Society of Shipbuilders named after A.N. Krylov, St. Petersburg, e-mail: sntorpsstt@yandex.ru

V.I. Tarovik, PhD, Krylov State Research Center, St. Petersburg, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru

The article discusses the feasibility of extending the scope of technical supervision of the Russian Maritime Register of Shipping (RS) to marine rescue operations in order to ensure the safe operation of offshore platforms at all stages of their life cycle during the development of oil and gas and mineral deposits on the continental shelf. The current Rules for Planning and Execution of Marine Operations apply only to operations for the assembly, transportation, towing, docking and installation of an object and its parts, performed while the object or any of its parts are afloat, or using watercraft. The article presents the main conceptual provisions developed through a comprehensive and systematic understanding of the problems associated with marine rescue, within the framework of a single interdisciplinary scientific approach, for the subsequent development of the RS Rules for planning and execution of marine rescue operations of offshore oil and gas facilities.

Keywords: emergency situation, marine operations, marine rescue operations, search and rescue operation, normative regulation, safety of marine activities, offshore platform

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае под морскими операциями (МО) понимается совокупность согласованных и взаимосвязанных по цели, месту и времени действий судов различного предназначения и морских объектов для решения на море различных задач.

В техническом (технологическом) аспекте МО представляют собой проекты особого рода, поднадзорные Российскому морскому регистру судоходства (РС).

В 2017 году РС утвердил Правила разработки и проведения морских операций (Правила) [1], которые распространяются на МО, выполняемые при строительстве, модернизации и утилизации объектов обустройства морских нефтегазовых месторождений, или других объектов. Под МО в этом документе понимаются операции только по сборке, транспортировке, стыковке и установке на точку объекта(ов) обустройства морских нефтегазовых месторождений и его частей. Проведение МО должно предваряться одобрением РС соответствующих плана и проекта МО, в которые помимо целого ряда документов, предусматривающих все важные аспекты проведения операции, должны входить планы действий в чрезвычайных (при нарушении планируемого хода МО) и аварийных (при возможности возникновения аварии) ситуациях (ЧС). При этом в 1.4 Правил установлено, что «Концепции разработки и проведения других видов морских операций, не регламентированных настоящими Правилами, должны рассматриваться и согласовываться с Регистром...».

В 2020 году введен в действие стандарт ГОСТ Р 58772-2019 «Сооружения нефтегазопромысловые морские. Морские операции» [2], который с целью обеспечения безопасности при выполнении работ по строительству морских нефтегазопромысловых сооружений на континентальном шельфе устанавливает требования к планированию, проектированию и проведению МО с морскими нефтегазопромысловыми сооружениями, устанавливаемыми, в том числе на акваториях с ледовым режимом. Под МО в этом документе понимается совокупность запланированных и контролируемых перемещений сооружения в целом или его элементов с использованием судов или на плаву, выполняемых при транспортных и строительно-монтажных работах в условиях воздействия морской среды. Определено, что план действий в чрезвычайных и аварийных ситуациях должен содержать в том числе:

- мероприятия в чрезвычайных и аварийных ситуациях (смещение сооружения или его элементов (при транспортировании), повреждение конструкций, креплений, возникновение неблагоприятных погодных условий или состояния моря, выход из строя главного буксира, обрыв буксирной линии и т. д.);
- мероприятия при угрозе человеческой жизни (падение за борт, оказание экстренной медицинской помощи);
- мероприятия по экстренной эвакуации персонала.

Вместе с тем ГОСТ Р ИСО 15544-2000 «Нефтяная и газовая промышленность. Морские добычные установки. Требования и руководства по реагированию на аварийные ситуации (Petroleum and natural gas industries — Offshore production installations — Requirements and guidelines for emergency response (IDT))» [3] распространяется на стационарные морские сооружения и плавучие сооружения, предназначенные для добычи, хранения и отгрузки продукции. Определенные данным стандартом планы действий в аварийной ситуации для морских добычных установок (МДУ) должны устанавливать оперативные и процедурные требования к действиям при различных сценариях аварии, которые должны учитывать особенности конкретной МДУ и подразумевает использование не только собственных и региональных, но и привлекаемых внешних сил и средств для спасения персонала. Поэтому в данном документе речь идет не только о плане действий в аварийной ситуации, наличие которого является необходимым, но недостаточным условием для ликвидации аварий, но и о морской спасательной (поисково-спасательной) операции (МСО).

МСО, как и другие виды морских операций, так же представляют собой технический (технологический) проект, реализуемый в морской среде. Существенным отличием данного проекта является его цель: спасение людей, ликвидация (минимизация) ущерба от морской аварии. В качестве реализуемого в морской среде технического (технологического) проекта МСО тоже может быть поднадзорна РС при соблюдении требований 1.4 Правил.

Разработка морских нефтегазовых и минеральных месторождений объективно сопряжена с высоким риском причинения чрезвычайного ущерба вследствие загрязнения окружающей среды. Последствия катастрофы платформы Deepwater Horizon 20 апреля 2010 года в Мексиканском заливе показали (см. рис. 1), каких численных значений может достичь величина этого чрезвычайного ущерба. Общая сумма компенсаций и штрафов, выплаченная арендатором платформы — британской компанией BP — достигла 65 млрд долларов США [4].



Рис. 1 Техногенная авария 20 апреля 2010 года на глубоководной платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе
(источник: <https://neftegas.wordpress.com/2015/10/09>)

Опыт ликвидации аварий на мировых нефтепромыслах за последние 45 лет свидетельствует о том, что подавляющее количество аварий произошло не в процессе строительства МДУ, а в процессе их эксплуатации. Например, только за период с 1965 по 2001 год, т.е., за 36 лет, на морских платформах нефтегазовых промыслов произошло 60 инцидентов, в результате которых погибло 599 человек, а 76 человек получили тяжелые травмы. Экономический ущерб от этих аварий учету не поддается. При этом почти каждый инцидент заканчивался тем, что платформа или уничтожалась, или становилась непригодной для восстановления. Поэтому любые затраты на обеспечение безопасной эксплуатации морских добычных установок и морских стационарных платформ различного назначения (МДУ/ПБУ) являются оправданными.

Выполнение масштабных задач, определенных «Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года» предполагает увеличение числа технических средств и оборудования для разработки морских нефтегазовых и минеральных месторождений, включая морские платформы и подводно-надводные комплексы [5]. Поэтому риск причинения чрезвычайного ущерба необходимо рассматривать в качестве достаточного основания для разработки и упреждающей реализации комплексных мер по его предотвращению и/или минимизации. Такими комплексными мерами, в первую очередь, являются:

- обеспечение безопасной эксплуатации стационарных морских платформ посредством совершенствования нормативной базы осуществления МСО по ликвидации аварий на морских нефтегазовых месторождениях;
- содействие морскому страхованию рисков, связанных с авариями и осуществлением морских спасательных операций на морских нефтегазовых месторождениях;
- разработка специальных спасательных средств (в первую очередь — средств локализации терпящих бедствие людей в климатических условиях районов разработки большинства морских нефтегазовых и минеральных месторождений РФ — т.е. в арктических условиях).

Ключевое значение имеет обеспечение безопасной эксплуатации МДУ/ПБУ в местах разработки нефтегазовых и минеральных месторождений. Безопасная эксплуатация, рассматриваемая в качестве сложной системы, включает ряд обеспечивающих ее систем (которые являются по отношению к ней подсистемами).

Среди обеспечивающих систем (подсистем) в рассматриваемом аспекте определяющее значение имеет функциональность системы (подсистемы) аварийно-спасательного обеспечения (АСО) стационарных морских платформ. Функциональность данной системы (подсистемы) может быть обеспечена только своевременным осуществлением действенных морских спасательных операций. Действенность данных операций, помимо прочего, обеспечивается содержательным и эффективным нормативным регулированием.

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ В ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ТРЕБОВАНИЙ РС К МОРСКИМ СПАСАТЕЛЬНЫМ ОПЕРАЦИЯМ

Пределы и основное содержание нормативного правового регулирования общественных отношений, связанных с проведением морских спасательных операций, определены содержанием следующих правовых понятий:

- понятия «ликвидация чрезвычайных ситуаций» статьи 1 Федерального закона от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [6];
- понятия «поисково-спасательная операция» пп. 1 и 2 статьи 16 Федерального закона от 31 июля 1998 года № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации» [7];
- понятия «поисково-спасательная операция (search and rescue operation; SAR operation)» четвертого абзаца преамбулы Международной конвенции по поиску и спасанию на море 1979 года [8] (далее — SAR-79) и, соответственно, Руководства по международному авиационному и морскому поиску и спасанию [9] (далее — МАМПС);
- понятия «спасательная операция (salvage operation)» пункта "а" статьи 1 Международной конвенции о спасании 1989 года [10] и пункта 1 части 2 статьи 337 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации [11].

Каждый из перечисленных действующих нормативных правовых актов издан для достижения своих особых целей и имеет особый предмет правового регулирования — совокупность общественных отношений, обозначенных основным правовым понятием. Поэтому указанные правовые понятия (достаточно близкие по значению) объективно не могут быть полностью тождественными.

Термином понятия «ликвидация чрезвычайных ситуаций» Федерального закона от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ обозначены все виды осуществляемых на территории РФ неотложных работ, направленных на: поиск и спасение жизни людей; снижение размеров материальных потерь; снижение размеров ущерба окружающей среде; локализацию зон чрезвычайных ситуаций; прекращение действий опасных факторов; сохранение здоровья людей.

Термином понятия «поисково-спасательная операция» Федерального закона от 31 июля 1998 года № 155-ФЗ обозначена осуществляемая во внутренних морских водах и в территориальном море РФ совокупность правомерных действий (как аварийно-спасательных работ, так и вообще любых других видов необходимых и неотложных работ, действий, мер и пр.), производимых в рамках единой морской операции и направленных на: поиск людей и/или аварийных судов; спасение жизни людей; спасение аварийных судов и буксировку аварийных судов.

Данным термином не обозначаются действия по подъему затонувших судов и грузов.

Термином «поисково-спасательная операция (search and rescue operation; SAR operation)» SAR-79 обозначена осуществляемая в морской среде совокупность любых правомерных действий, производимых в рамках единой морской операции и направленных на: поиск (обнаружение) людей, терпящих бедствие, и спасение жизни этих людей (вызволнение, оказание помощи и доставка в безопасное место).

Термином понятия «спасательная операция (salvage operation)» Международной конвенции о спасании 1989 года обозначены любые действия, предпринимаемые в судоходных или в любых других водах для поиска судна, находящегося в опасности; спасения жизни людей; оказания помощи судну, находящемуся в опасности; спасения любого другого имущества, не прикрепленного постоянно и преднамеренно к побережью и находящегося в опасности, и фрахта на риске.

Частью 4 статьи 337 Кодекса торгового мореплавания Российской Федерации [11] сделано следующее изъятие из действия правил главы XX «Спасание судов и другого имущества» данного кодекса: «Правила, установленные настоящей главой, не распространяются на: стационарные платформы или морские плавучие платформы, если такие платформы осуществляют в местах их расположения разведку и разработку минеральных и других неживых ресурсов морского дна и его недр...».

Соотношение между вышеперечисленными правовыми понятиями представлено в форме диаграммы (см. рис. 2).

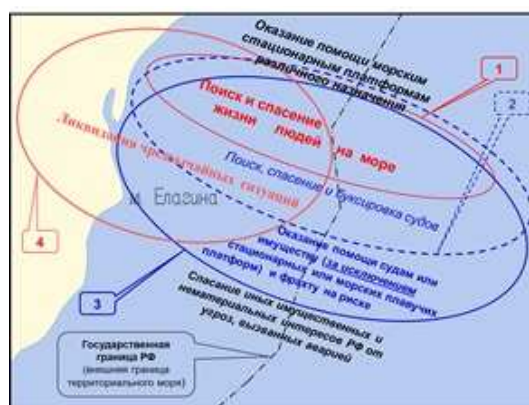


Рис. 2 Диаграмма отношений между понятиями по объему:

- 1 — понятие «поисково-спасательная операция» SAR-79;
 2 — понятие «поисково-спасательная операция» Федерального закона от 31 июля 1998 года № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации»;
 3 — понятие «спасательная операция (salvage operation)» Международной конвенции о спасании 1989 года;
 4 — понятие «ликвидация чрезвычайных ситуаций» статьи 1 Федерального закона от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»

Из представленной диаграммы видно, что отношения, связанные с оказанием помощи стационарным платформам или морским плавучим платформам (когда такие платформы осуществляют в местах их расположения разведку и разработку минеральных и других неживых ресурсов морского дна и его недр) лишь частично охвачены правовым регулированием. При этом содержательным специальным нормативным регулированием охвачены только отношения, связанные со спасанием жизни людей. Налицо **пробел** специального нормативного регулирования, прежде всего, отношений, связанных с оказанием помощи стационарным платформам или морским плавучим платформам.

Необходимыми полномочиями для восполнения данного пробела нормативного регулирования обладает РС.

Нормой пункта 1 распоряжения Правительства РФ от 30 сентября 2000 года № 1377-р [12] на РС возложены функции технического надзора за морскими стационарными платформами различного назначения, связанные с обеспечением безопасности мореплавания, охраны человеческой жизни на море и сохранения морской среды. Объем предоставленных полномочий в данном пункте раскрыт посредством открытого списка некоторых таких функций. В силу **открытого** характера данного списка объем полномочий, предоставленных Российскому морскому регистру судоходства, **не исчерпывается** перечисленными в списке функциями.

В данном списке конкретно указана функция унификации нормативной базы для эксплуатации стационарных платформ различного назначения. Как было отмечено, эксплуатации стационарных морских платформ является комплексным процессом, включающим наряду с другими обеспечивающими процесс подсистемами и подсистему АСО. Подсистема АСО выполняет свое функциональное предназначение посредством своевременного осуществления действенных МСО. Следовательно, объем предоставленных РС нормотворческих полномочий охватывает, помимо прочего, и нормативную регламентацию процесса подготовки и проведения морских спасательных операций.

Таким образом, имеются объективные основания и необходимые полномочия для разработки и утверждения РС Правил подготовки и проведения МСО (далее — Правил МСО).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДМЕТА И ОСНОВНОГО СОДЕРЖАНИЯ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРАВИЛ МСО

Эффективность нормативной регламентации обеспечивается правильным выбором предмета нормативного регулирования (совокупности отношений, подлежащих нормативной регламентации).

МСО при рассмотрении в технологическом и техническом аспектах представляет собой единый проект. Этот проект состоит из уникального набора процессов, включающих разнородные технологические операции (работы). Уникальность набора процессов и работ, в первую очередь, объективно обусловлена многообразием типов аварий и, соответственно МСО. Проект связан в единое целое сетью непрерывных и взаимосвязанных технологических цепочек.

Одна часть эти разнородных технологических операций (работ) детально регламентирована международными руководствами, ведомственными наставлениями и иными нормативными документами. Другая часть технологических операций (работ) регламентирована только правилами хорошей морской практики.

Таким образом, первой специфической особенностью рассматриваемого технологического проекта является частичная (а не всеобъемлющая) нормативная регламентация выполняемых технологических операций (работ).

Вторая специфическая особенность МСО как проекта обусловлена невозможностью заблаговременного определения ни точного времени еще не произошедшей аварии, ни ее характера, ни численных значений параметров процесса ее развития (то есть ситуацией неопределенности). Соответственно невозможно с достаточной для проектного планирования точностью определить характер, временные рамки, продолжительность и другие параметры технологических операций (работ) данного технического проекта. По этой причине разработку проекта МСО невозможно произвести с детальным соблюдением требований национальных стандартов Российской Федерации [13, 14]. Детальный сетевой график (detailed network) со структурой, подробно описывающей все работы проекта, в ряде случаев, заблаговременно разработать невозможно. Зачастую возможна лишь разработка укрупненного (приблизительного) сетевого графика (rough network) со структурой, которая дает только приблизительный обзор развития морской спасательной операции как технического проекта.

Используя понятийный аппарат системного анализа, в данном проекте можно выделить решение хорошо структурированных, слабо структурированных и неструктурированных задач.

Решение хорошо структурированных задач осуществляется посредством производства традиционных аварийно-спасательных работ (АСР) с детально отработанными технологическими регламентами их выполнения. При этом важно особо подчеркнуть, что применяемые при морском спасании специально разработанные и изготовленные суда, технические средства, механизмы и приспособления по существу являются оснасткой технологического процесса этих АСР [15]. Как известно, оснащение технологического процесса производится на завершающей стадии разработки конструкторской документации с присвоением ей самого высокого литеры «А» [16]. Значительная часть составляющих рассматриваемый проект технологических операций полностью либо частично состоит именно из таких работ.

Для решения неструктурированных и слабо структурированных задач необходимо предварительно преодолеть ситуацию неопределенности. Ситуация частичной неопределенности объективно сопутствует значительному числу (если не большинству) МСО и является почти неизбежным явлением. Предсказуемо оказавшись в такой ситуации, руководитель МСО должен последовательно реализовывать специально разработанный и нормативно обоснованный алгоритм выработки решений в условиях ситуации неопределенности, а не принимать ничем не обоснованные спонтанные решения.

В настоящее время такой алгоритм сформирован посредством комплексного и системного осмысления проблем, связанных с морским спасанием, в рамках единого междисциплинарного научного подхода.

В данном алгоритме используются неоднократное проведение экспертных оценок, определение численных значений необходимых параметров посредством выполнения инструментальных замеров и использования метода приложения тарированных усилий.

В качестве тарированных усилий можно рассматривать, например, измеренные динамометром тяговые усилия буксирных судов, подачу в горящее помещение точно измеренного количества огнетушащих средств, приложения к накренному аварийному судну предварительно точно вычисленного выкренивающего момента. Фиксация реакции на приложенные тарированные усилия позволит дать качественные и, отчасти («больше» или «меньше»), количественные оценки параметров морской аварии.

Разработанный алгоритм в общем укрупненном виде представлен на рис. 3.

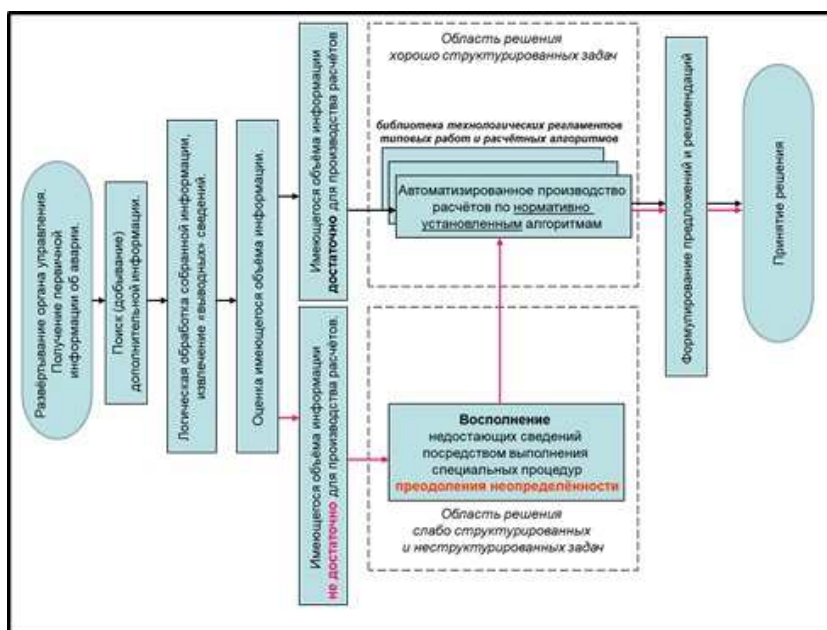


Рис. 3 Алгоритм выработки решений в укрупненном виде

Таким образом, в качестве предмета нормативной регламентации новых Правил РС следует рассматривать отношения, связанные с технологией выполнения АСР, а также с применением руководителями МСО разработанного алгоритма выработки решений.

В качестве отдельного этапа нормотворчества следует рассматривать пересмотр накопленной базы данных технологических регламентов типовых АСР, других сопутствующих работ и расчетных алгоритмов. Цель пересмотра этой базы — ее адаптация к специфике спасания работающих стационарных платформ или морских плавучих платформ.

Целесообразность разработки новых Правил РС обусловлена также отсутствием требований к федеральной системе поисково-спасательного обеспечения морской деятельности и, как следствие этого, к отсутствию единой технической политики при создании судов АСО и поисково-спасательной техники. Анализ тенденций развития судов поисково-спасательного назначения свидетельствует о многообразии номенклатуры спасательных судов, построенных по заказу различных ведомств. При этом имеется неопределенность в нормировании требований к судам АСО и регламентированной их классификации. Существуют, проектируются и строятся: многофункциональное аварийно-спасательное судно, многофункциональное судно АСО, многофункциональный буксир-спасатель, многоцелевое пожарно-спасательное судно, многофункциональное спасательное судно дальней морской и океанской зоны, многофункциональный катер и т.д.

В отличие, например, от установленной РС весьма эффективной классификации ледокольных судов (с присвоением судну определенного т.н. «ледового класса») показанная классификация судов АСО не отражает их способности успешно решать свойственные задачи различной степени сложности, характера и масштаба.

В целях гармонизации ведомственных технических требований к судам АСО и созданию унифицированной номенклатуры судов АСО по заказу ПАО «Газпром» был разработан стандарт организации «Система стандартов корпоративной системы гражданской защиты. Система АСО на море. Суда аварийно-спасательного обеспечения. Общие технические условия», разработанный ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Распоряжением руководства ПАО «Газпром» данный стандарт утвержден и введен в действие с 18.08.2020. Стандарт устанавливает общие технические условия для судов, осуществляющих аварийно-спасательное обеспечение морских объектов ПАО «Газпром».

При этом следует отметить, что действующие стандарты и рекомендации ПАО «Газпром» в части обеспечения функционирования его системы АСО требуют актуализации. Кроме того, при близких и практически одинаковых задачах ряда проектов судов применяются различные технические средства для выполнения АСР. Специализированное оборудование спасательных судов не всех ведомств в полном объеме соответствует требованиям РС и учитывает особенности его эксплуатации в природно-климатических условиях арктических морей. Не решена и проблема унификации поисково-спасательной техники, что не способствует сокращению времени выполнения АСР.

Представляются целесообразными разработка и внедрение новой классификации судов АСО с присвоением им, согласно определенной шкалы, «спасательного класса» РС, отражающего степень способности судна АСО эффективно решать свойственные задачи в зависимости от их сложности, характера и масштаба. Для обеспечения необходимого основания для разработки такой классификации судов АСО новые Правила РС должны содержать развернутую классификацию морских спасательных операций.

При оказании помощи стационарным платформам или морским плавучим платформам, осуществляющим в местах их расположения разведку и разработку минеральных и других неживых ресурсов морского дна и его недр, объективно применяются все показанные на диаграмме рис. 4 виды морского спасания. Поэтому ключевым понятием новых Правил РС должны быть охвачены не только МСО по оказанию помощи этим платформам, но и все другие виды МСО.



Рис. 4 Объем понятия «морская спасательная операция» новых Правил РМРС

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРАВИЛ МСО И МОРСКОГО СТРАХОВАНИЯ РИСКОВ

Любой страховщик возьмет на себя только известные ему лично и просчитываемые риски. В то время и риски, связанные с применением специальных технологий спасания, и сами эти технологии известны лишь узкому кругу экспертов в сфере морского спасания. Поэтому первоочередной мерой содействия морскому страхованию рассматриваемых рисков является полное и качественное информирование потенциальных страховщиков.

Информацию в необходимом для морских страховщиков объеме целесообразно изложить в Правилах МСО. Такую информацию необходимо изложить сжато в доступной для обычного понимания форме с приложением схем и технических рисунков. Специальные термины должны использоваться только в тех случаях, когда это действительно необходимо. Вместе с терминами должны быть приведены формулировки определений обозначаемых данными терминами понятий.

Содержание Правил МСО должно также позволить страховщику восстановить причинно-следственную цепь событий: от наступления страхового случая до возникновения убытка (в целях определения фактической причины убытка), правильно определить степень страхового риска, а в случаях ненадлежащего поведения контрагентов своевременно обнаружить в действиях страхователя либо спасателя наличие умысла и/или грубой неосторожности.

В качестве эффективных мер содействия морскому страхованию рассматриваемых рисков необходимо рассматривать разработку формулировок положений Правил МСО именно таким образом, чтобы страховщики могли их использовать для определения условий страхования (специальных оговорок), объема покрытия (каталога исключений), а также в качестве оснований назначения специальных франшиз, лимитов и страховых премий.

Позитивное влияние Правил МСО на рынок морского страхования не ограничится только лишь достаточно узким сегментом страхования рисков, связанных с МСО по оказанию помощи стационарным платформам или морским плавучим платформам в местах разработки (разведки) нефтегазовых месторождений. Поскольку оказание помощи такого рода аварийным объектам объективно является наиболее технологически сложным видом спасания, то положения Правил МСО будут применимы и к менее сложным морским спасательным операциям. Таким образом, положительный эффект от утверждения РС Правил МСО будет достигнут на всем рынке морского страхования рисков, связанных с осуществлением всех видов МСО.

Морское страхование традиционно является одним из наиболее действенных инструментов обеспечения безопасности глобальной морской деятельности. Наряду с полным либо частичным возмещением причиненного морской аварией убытка специально разработанные на основании Правил МСО механизмы морского страхования мотивируют спасателей к точному исполнению нормативно установленных и рационально обоснованных предписаний данных Правил, уменьшающих либо предотвращающих убытки от морской аварии, а также расширяющих зоны приемлемого риска при оценке безопасности морских операций [1].

ВЫВОДЫ

1. В настоящее время нормативное правовое регулирование отношений, связанных с осуществлением МСО по оказанию помощи стационарным морским платформам, не может обеспечить необходимую действенность этих морских операций, так как рассматриваемые отношения лишь частично охвачены нормативным регулированием. Значительная их часть вообще не регламентирована. Отсутствуют специальные нормы, учитывающие специфику оказания помощи стационарным морским платформам.

Поэтому для обеспечения безопасной эксплуатации стационарных морских платформ в местах разработки нефтегазовых и минеральных месторождений необходима разработка Концепции подготовки и проведения МСО согласно 1.4 [1] и, на ее основе, Правил подготовки и проведения МСО РС. В настоящее время основное содержание данной Концепции рамочно определено посредством комплексного и системного осмысления проблем, связанных с морским спасанием, в границах единого междисциплинарного научного подхода.

2. Разработка РС Правил подготовки и проведения МСО соответствует его уставной цели, каковой являются обеспечение безопасности морских платформ и охрана человеческой жизни на море. Морские спасательные операции по форме своей реализации являются технологическим проектом. Поэтому МСО, также как и другие виды морских операций, могут и должны быть поднадзорны РС.

В целях максимального приближения наступления положительного эффекта от введения в действие Правил МСО РС их разработку, утверждение и введение в действие целесообразно производить несколькими отдельными книгами. В первой книге может быть опубликован основной нормативный текст новых Правил. В последующих книгах предлагается поместить организационно-технологические нормативные документы по видам аварийно-спасательных, а также отдельных видов экстренных судоподъемных и подводно-технических работ.

3. Введение в действие предлагаемых новых Правил РС:

- обеспечит спасателей и специалистов научно обоснованной методологией принятия непростых управленческих решений, а также актуализированной высокоинформативной базой технологических регламентов выполнения типовых АСР и специальных расчетных алгоритмов. Такая заблаговременная подготовка спасателей обеспечит более высокую результативность морских спасательных операций и существенно снизит связанный с разработкой морских нефтегазовых и минеральных месторождений риск причинения чрезвычайного ущерба вследствие загрязнения окружающей среды;
- сформирует необходимые благоприятные условия для дальнейшего развития страхового бизнеса в обширном сегменте страхового рынка, связанном с осуществлением всех видов морских спасательных операций;
- будет востребовано спасателями и морскими страховщиками, так как Правила МСО будут эффективно регламентировать посредством конкретных нормативных требований не только наиболее технологически сложный вид морского спасания, но и осуществление всех других видов морских спасательных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила разработки и проведения морских операций. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/456083174> (дата обращения 17.07.2021).
2. ГОСТ Р 58772-2019 (ISO 19901-6:2009) Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазовых морских. Морские операции ((ISO 19901-6:2009, Petroleum and natural gas industries — Specific requirements for offshore structures — Part 6: Marine operations, MOD). — М.: Стандартинформ, 2020 [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170584> (дата обращения 17.07.2021).
3. ГОСТ Р ИСО 15544 Нефтяная и газовая промышленность. Морские добычные установки. Реагирование на аварийные ситуации. Основные требования. М.: Стандартинформ. — 2012 [Электронный ресурс]: URL: <https://www.standards.ru/document/3632496.aspx> (дата обращения 17.07.2021).
4. Kent S. BP's Deepwater Horizon Bill Grows by \$1.7 Billion [WALL STREET JOURNAL.]. Available at: <https://www.wsj.com/articles/bp-to-book-1-7-billion-charge-for-deepwater-horizon-claims-1516091386>. (дата обращения 17.07.2021).
5. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/566091182> (дата обращения 17.07.2021).
6. Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (редакция от 30.12.2008) // Собрание законодательства Российской Федерации 1994, № 35, ст. 3648.
7. Федеральный закон от 31 июля 1998 года № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации» (Редакция от 13.06.2020) // Собрание законодательства Российской Федерации, 1998, № 31, ст. 3833.
8. Международная конвенция по поиску и спасанию на море 1979 года [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/901824783> (дата обращения 17.07.2021).
9. Руководство по международному авиационному и морскому поиску и спасанию [Электонный ресурс]: URL: https://sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9731-Rukovodstvo-MAMPS-t.3.pdf (дата обращения 17.07.2021).
10. Международная конвенция о спасании 1989 года // Собрание законодательства Российской Федерации, 2001, № 3, ст. 217.
11. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации // Собрание законодательства Российской Федерации, 1999, № 18, ст. 2207.
12. Распоряжение Правительства РФ от 30 сентября 2000 года № 1377-р «О возложении на Российский морской регистр судоходства функций технического надзора за морскими стационарными платформами различного назначения и функций головной организации по унификации оборудования, материалов и изделий для морских судов и морских стационарных платформ различного назначения, связанных с обеспечением безопасности мореплавания, охраны человеческой жизни на море и сохранения морской среды» // Собрание законодательства Российской Федерации, 2000, № 40, ст. 4031.
13. Р ИСО 21500-2014 Руководство по проектному менеджменту [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118020> (дата обращения 17.07.2021).
14. ГОСТ Р 54869-2011 Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089604> (дата обращения 17.07.2021).
15. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики. Определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/555857109> (дата обращения 17.07.2021).
16. ГОСТ 2.103-2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. [Электронный ресурс]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115351> (дата обращения 17.07.2021).

REFERENCES

1. Rules for Planning and Execution of Marine Operations [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/456083174> (accessed on 17.07.2021). (In Russian)
2. GOST R 58772-2019 (ISO 19901-6:2009) *Neftyanaya i gazovaya promyshlennost. Sooruzheniya neftegazopromyslovye morskije. Morskije operatsii* ((ISO 19901-6:2009, Petroleum and natural gas industries — Specific requirements for offshore structures — Part 6: Marine operations, MOD). М.: Standartinform, 2020 [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170584> (accessed on 17.07.2021).
3. GOST R ISO 15544 *Neftyanaya i gazovaya promyshlennost. Morskije dobychnye ustanovki. Reagirovanie na avariynye situatsii. Osnovnye trebovaniya* [Petroleum and natural gas industries. Offshore production installations. Requirements and guidelines for emergency response] М.: Standartinform, 2012 [Website]: URL: <https://www.standards.ru/document/3632496.aspx> (accessed on 17.07.2021).
4. Kent S. BP's Deepwater Horizon Bill Grows by \$1.7 Billion [WALL STREET JOURNAL.]. Available at: <https://www.wsj.com/articles/bp-to-book-1-7-billion-charge-for-deepwater-horizon-claims-1516091386>. (accessed on 17.07.2021).
5. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoj Federacii i obespecheniya nacionalnoy bezopasnosti na period do 2035 goda* [Strategy for development of the Arctic zone of the Russian Federation and national security provision up to 2035] [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/566091182> (accessed on 17.07.2021).
6. Federal law No. 68-FZ dated 21.12.1994 "O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychajnykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennoho haraktera" [On protection of the population and of the territories from environmental and technological emergencies] (edition 30.12.2008) // *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoj Federatsii* 1994, No. 35, p. 3648.
7. Federal law No. 155-FZ dated 31.07.1998 "O vnutrennih morskikh vodakh, territorialnom more i prilozhashchey zone Rossiyskoj Federacii" [On internal waters, territorial sea and contiguous zone of the Russian Federation] (edition 13.06.2020) // *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoj Federatsii*, 1998, No. 31, p. 3833.
8. International Convention on Maritime Search and Rescue, 1979 [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/901824783> (accessed on 17.07.2021). (In Russian)
9. The International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual [Website]: URL: https://sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9731-Rukovodstvo-MAMPS-t.3.pdf (accessed on 17.07.2021). (In Russian)

10. International Convention on SALVAGE 1989 // *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii*, 2001, No. 3, p. 217. (In Russian)
11. *Kodeks torgovogo moreplavaniya Rossiskoy Federatsii* [The Merchant Shipping Code of the Russian Federation] // *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii*, 1999, No. 18, p. 2207.
12. RF Government Order No. 1377-r dated 30.09.2000 "*O vozlozhenii na Rossiyskiy morskoy registr sudohodstva funktsiy tekhnicheskogo nadzora za morskimi stacionarnymi platformami razlichnogo naznacheniya i funktsiy golovnoy organizatsii po unifikatsii oborudovaniya, materialov i izdeliy dlya morskikh sudov i morskikh stacionarnykh platform razlichnogo naznacheniya, svyazannykh s obespecheniem bezopasnosti moreplavaniya, ohrany chelovecheskoy zhizni na more i sohraneniya morskoy sredy*" [On delegating the duty of technical supervision of offshore fixed platforms of various purposes and the duty of head organization responsible for the unification of equipment, materials and products for sea-going ships and offshore fixed platforms connected with maritime safety and safety of life at sea, as well marine environment protection to Russian Maritime Register of Shipping] // *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii*, 2000, No. 40, p. 4031.
13. GOST R ISO 21500-2014 *Rukovodstvo po proektnomu menedzhmentu* [Guidance on project management] [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118020> (accessed on 17.07.2021).
14. GOST R 54869-2011 *Proektny menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu proektom* [Project management. Requirements for project management] [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089604> (accessed on 17.07.2021).
15. 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. [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/555857109> (accessed on 17.07.2021). (In Russian)
16. GOST 2.103-2013 *Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Stadii razrabotki* [Unified system for design documentation. Stages of designing] [Website]: URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115351> (accessed on 17.07.2021).

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/ntsb.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). Предоставляются 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. *Neirofiziologia [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 modelirovanie 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 zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [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://rs-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 хронологии 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 общеизвестные 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 заголовки, 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 (boyko.ms@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. Компетентные 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-bolshix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn--24-dlcyxgbj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtip.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

Фото для обложки журнала предоставлено Фоменко Геннадием Ивановичем,
главным инженером-инспектором Калининградского филиала РС

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 64/65

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 27.01.2022. 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/ru/