

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА СУДАХ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ
И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
АКТУАЛЬНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА
РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЕМКостей
ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА



№ 75
август
2024

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

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.А. Кутейников

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

ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

А.В. Марченко — д.т.н., проф., 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 ВИНИТИ РАН, международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory.

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

Решением Президиума ВАК 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

Mikhail Kuteynikov

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

ISSN 2223-7097

Editorial board

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

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

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

Andrey Grigoriev — Candidate of Technical Science, Admiral

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

Alexey Ilin — Doctor of Technical Science, associate professor, Deputy General Director and Head of Research and Production

Complex, NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

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

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

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

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

Kirill Rozhdstvenskiy — 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

№ 75

RESEARCH BULLETIN BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

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

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

Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

2.5.18 – Проектирование и конструкция судов

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

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

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

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

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

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

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

2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics

2.5.18 – Design and construction of ships

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

2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург
2024



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Реуцкий А.С., Семионичев Д.С., Михеева А.А. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте 4

A.S. Reutskii, D.S. Semionichev, A.A. Mikheeva Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport

Хмельницкий К.Е., Покусаев М.Н., Хмельницкая А.А., Руденко М. Ф. Устройство для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска двухтактного двигателя подвешенного лодочного мотора. 16

K.E. Khmelnitsky, M.N. Pokusaev, A.A. Khmelnitskaya, M.F. Rudenko A device to reduce the loss of fresh charge and noise in the exhaust system of a two-stroke outboard motor

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение ускорений в произвольных точках судна на основании нелинейной теории в условиях нерегулярного волнения 23

V.Yu. Semenova, D.A. Al'baev Determination of accelerations at arbitrary points of a ship based on nonlinear theory in irregular waves

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА MATERIALS AND WELDING

Платонов В.В., Федонюк Н.Н., Бойко М.С., Сотсков С.А. Разработка требований правил Регистра к применению полимерных композиционных материалов при изготовлении емкостей для хранения сжиженного природного газа 33

V.V. Platonov, N.N. Fedonyuk, M.S. Boyko, S.A. Sotskov Development of the Register rules to the application of polymer composite materials for the construction of liquefied natural gas tanks

**МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION**

Шурпяк В.К. Анализ современных тенденций применения двигателей внутреннего сгорания на морских судах 47

V.K. Shurpyak Analysis of current trends in the use of internal combustion engines on ships

Гулый В.А., Смирнов А.А., Фетисов П.В. Муфта самовключения с магнитным механизмом фазирования . . . 61

V.A. Guly, A.A. Smirnov, P.V. Fetisov Self-coupling with magnetic phasing mechanism

**ГРУЗОПОДЪЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
CARGO HANDLING GEAR**

Ивановская А.В., Жуков В.А. Математические основы разработки системы управления судового грузоподъемного оборудования 66

A.V. Ivanovskaya, V.A. Zhukov Mathematical foundations of the development of a control system for marine lifting equipment

**ПОДВОДНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ
SUBSEA PIPELINES**

Мясин Д.В., Уланов А.И., Филатов А.Р. Сопоставление эффекта бурдона и концевго эффекта при расчетах вибрации трубопроводов 75

D.V. Myasin, A.I. Ulanov, A.R. Filatov Comparison of the bourdon effect and the end cap effect in pipeline vibration analysis

**ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ
REVIEW OF INTERNATIONAL DOCUMENTS**

Яковлев Н.М., Смирнов Ю.Д. Проблематика внедрения требований международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими в Российской Федерации 86

N.M. Yakovlev, Yu.D. Smirnov Issues of implementation of the requirements of the international convention for the control and management of ships' ballast water and sediments in the Russian Federation



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.5.01, 629.5.016, 629.5.089.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПУТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Д.С. Семионичев, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

А.А. Михеева, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

В работе рассматривается нормативная база климатических проектов, а также случаи их реализации в Российской Федерации. Целью исследования является определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте. Задачей исследования стало установление зависимости между требованиями, предъявляемыми со стороны нормативной базы к климатическим проектам, и сложившимися в международной морской отрасли способами снижения расхода топлива и выбросов парниковых газов с отработавшими газами СЭУ в атмосферу. Обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильные руководящие документы. Сформированы выводы и требования касательно климатических проектов на водном транспорте со стороны отечественной нормативной базы. В исследовании продемонстрирована нормативная база применения климатических проектов, а также намечены основные пути реализации климатических проектов на водном транспорте. В результате проведенного анализа осуществленных или находящихся на стадии рассмотрения или принятия климатических проектов Российской Федерации было показано, что такие проекты в области транспорта в настоящий момент отсутствуют, поэтому первые шаги в направлении подготовки и реализации КП в транспортной отрасли потребуют от транспортных компаний дополнительных усилий. Дальнейшей задачей авторов будет оценка привлекательности участия заинтересованных лиц в климатических проектах, касающихся внесения изменений в конструкцию или устройства судна с целью удовлетворения формальным признакам КП.

Ключевые слова: климатический проект, КП, энергетическая установка, транспортная эффективность судна, скрубберы, катализаторы, альтернативные топлива, углеродная единица.

IDENTIFICATION OF THE MAIN WAYS TO IMPLEMENT CLIMATE PROJECTS IN WATERBORNE TRANSPORT

A.S. Reutskii, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

D.S. Semionichev, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

A.A. Mikheeva, FAI Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

The paper examines the regulatory framework of climate projects, as well as cases of their implementation in the Russian Federation. The purpose of the study is to identify the main ways to implement climate projects in water transport. The objective of the study was to establish the relationship between the requirements imposed by the regulatory framework for climate projects and the methods established in the international maritime industry to reduce fuel consumption and marine power plant's greenhouse gas emissions into the atmosphere. Conclusions and requirements regarding climate projects in marine transport have been formed. The study demonstrates the regulatory framework for the application of climate projects and outlines the main ways to implement climate projects

in water transport. The analysis of climate projects in the Russian Federation that have been implemented or are being considered or adopted has shown that there are currently no such projects in the transport sector; therefore, the first steps towards preparation and implementation of climate projects in the transport industry will require additional efforts from transport companies. The further steps of the authors will be to assess the attractiveness of the participation of stakeholders in climate projects related to making changes to the design or device of the vessel in order to meet the formal criteria of the climate projects.

Keywords: *climate project, power plant, transport efficiency, scrubbers, catalysts, alternate fuels, carbon unit.*

1. НОРМАТИВНАЯ БАЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ В НАШЕЙ СТРАНЕ

Климатический проект (КП) — это действия, направленные на уменьшение (предотвращение) выбросов парниковых газов и/или увеличение поглощения парниковых газов применительно к структуре с определенными границами: государству, единице государственного устройства (субъекту), компании вне зависимости от формы собственности или ее структурному подразделению.

Нормативная база климатических проектов в нашей стране достаточно обширна и активно развивается. В своей международной части она содержит несколько стандартов, таких как Verified Carbon Standard (VCS) [1], Gold Standard (carbon offset standard) [2], American Carbon Registry (ACR) [3] и др. В части национальной она содержит Федеральный закон [4], постановление правительства РФ [5], приказы министерств [6], методологии, разработанные и утвержденные Минприроды России или полученные как результат разработки КП [7, 8], а также национальные стандарты [9 — 12]. В соответствии с представленной нормативной базой, можно сделать несколько выводов касательно реализуемых или планируемых к реализации в нашей стране климатических проектов:

- действия в рамках КП должны выполняться в соответствии с действующей нормативной базой (документами национальной системы стандартизации в области ограничения выбросов парниковых газов) и не должны ей противоречить;

- целями разрабатываемого КП должны являться увеличение степени поглощения парниковых газов, снижение или полное исчезновение их выбросов (причем действия в рамках КП не должны приводить к увеличению их выбросов или снижению их поглощаемости за пределами КП);

- процедура валидации разработанного КП необходима для того, чтобы подтвердить, что планируемые меры в конечном итоге приведут к сокращению выбросов или увеличению поглощения парниковых газов.

В ходе процедуры валидации результат климатического проекта (количество выбрасываемых парниковых газов после реализации проекта) сравнивается с существующим уровнем выбросов (т. е. количеством выбросов парниковых газов в отсутствие КП) с целью определения положительной динамики. При этом валидация КП может производиться лицом, которое имеет аккредитацию в национальной системе в качестве органа по валидации и верификации парниковых газов. По ее итогам выдается отчет о возможности реализации КП. Если речь идет о международном рынке, то участок, где реализуется КП, должен принадлежать по праву собственности, быть в аренде у исполнителя проекта или права пользования участком должны быть переданы по договору с правообладателем [5].

Таким образом, согласно сложившейся нормативной базе, реализация КП даст исполнителю возможность получить углеродные единицы. Они могут быть учтены при оценке сокращения выбросов парниковых газов и зачислены на счет своей или иной организации. Также ожидается, что разработка КП заинтересует организации, которые ставят цели по сокращению своего углеродного следа в рамках добровольной сертификации или планируют заниматься продажей углеродных единиц на добровольном углеродном рынке [5].

2. ВИДЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Климатические проекты весьма условно делятся на природные или технологические. Природные климатические проекты обычно имеют целью восполнение утраченного в результате антропогенной деятельности баланса природных систем и представляют собой действия, направленные на их защиту (снижение влияния климатических изменений или других опасностей) и управление ими, а также восстановление утраченных экосистем (лесопосадки, осушение заболоченных участков в результате очистки русел рек и т. д.).

Технологические климатические проекты необходимы для уменьшения вреда, наносимого природе в результате хозяйственной деятельности, и зачастую нацелены либо на снижение выбросов (применение

возобновляемых источников энергии, низкоуглеродных технологий и топлив, улавливание углерода в конце технологического цикла, эффективное обращение с отходами), либо на оптимизацию технологических процессов по критерию эффективности этого процесса с сохранением прежнего уровня выбросов (увеличение выполненной полезной работы с использованием того же количества энергии).

Несмотря на озвучиваемое в настоящее время мнение, что для Российской Федерации реализация природных КП имеет наибольшие перспективы в части уменьшения последствий воздействия антропогенного влияния из-за естественных природно-климатических факторов и большой территории, отличающейся природным и климатическим разнообразием [13], технологические КП также должны реализовываться, так как в настоящий момент в мире технологические КП и их реализация в различных секторах транспорта являются не в последнюю очередь стимулирующей мерой для развития промышленности, техники и технологий, лидерство в этих сферах дает технологический суверенитет, который подкрепляет соответствующим образом обновляемая нормативная база.

3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ В РОССИИ

На странице [14] представлены российские КП, прошедшие валидацию и зарегистрированные в российском реестре углеродных единиц. На рис. 1 показано соотношение выпущенных в Российской Федерации углеродных единиц, условно разделенных на следующие группы:

- ввод в эксплуатацию мощностей, генерирующих экологически чистую энергию ($\approx 1\%$);
- мероприятия по защите экосистем ($\approx 9\%$);
- мероприятия, в ходе выполнения которых эффект достигается за счет повышения эффективности существующих технологических процессов ($\approx 23\%$);
- мероприятия по прямому снижению или предотвращению выбросов (67%).

К первой и самой малочисленной группе относятся КП по генерации экологически чистой энергии, такие как КП ПАО «ЭЛ5-ЭНЕРГО» и КП ООО «ДАЛЬЭНЕРГОИНВЕСТ», реализовавшие проекты ветрогенерации и выработки электрической энергии путем использования солнечных панелей. К работам по защите экосистем относятся лесопосадки и охрана их от пожаров. Мероприятия по прямому снижению/предотвращению выбросов CO_2 включают в себя как фильтрацию выбросов, содержащих парниковые газы, попадающих в атмосферу с производств газовых смесей, так и исключение возможности попадания в атмосферу парниковых газов в результате изменения технологических операций. Почти четверть (23%) всех углеродных единиц, выпущенных в рамках КП в России, представляют собой результаты повышения эффективности существующего технологического процесса.

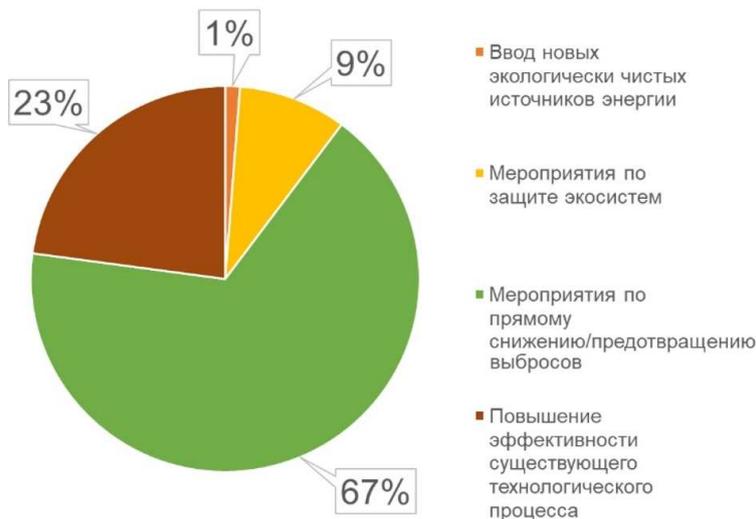


Рис. 1 Соотношение углеродных единиц, выпущенных в рамках российских КП

Здесь необходимо отметить, что российский опыт по созданным КП демонстрирует систему, которая не завязана на государственное финансирование, как это часто бывает в других странах. Созданные механизмы побуждают крупные транспортные компании самостоятельно (за счет собственных средств) реализовывать проекты в целях получения углеродных единиц с последующим их обращением в зачет собственных выбросов или продажи их другим компаниям. Помимо очевидного преимущества созданной системы, выражающегося в экономии средств, видится и его недостаток, представляющий собой несистемность подхода в рамках страны или отдельно взятого региона. Например, из 29 проектов только два по-настоящему экологические, т. е. предполагают либо восстанавливающие меры (КП № 23 — лесоклиматический проект ООО «ВЦЛ»), либо выработку электроэнергии при помощи возобновляемых источников (КП № 28 — климатический проект ООО «ДАЛЬЭНЕРГОИНВЕСТ»). Что касается остальных работ, они касаются модернизации цепочек поставок или модернизации оборудования в рамках технологического цикла компании, в результате которого экологический эффект достигается сопутствующим образом, при этом не являясь самоцелью с самого начала работы. Примерами могут являться изменение способа транспортировки (замена дорожного автотранспорта на трубопроводный), замена угольного котельного оборудования на газовое или повышение энергетической эффективности оборудования. Если судить не по номенклатуре, а по объему производимых КП углеродных единиц, то на данный момент суммарное количество углеродных единиц, выпущенных за счет чисто экологических проектов (КП № 23 и 28), составляет немногим более 2 % от общего их числа — 1 515 378 против 72 829 845 условных единиц.

Таким образом, анализ осуществленных или находящихся на стадии рассмотрения или принятия КП показывает, что в Российской Федерации в настоящий момент нет действующих КП в области транспорта, поэтому первые шаги в направлении их подготовки и реализации требуют от компаний транспортной отрасли дополнительных усилий.

4. ИСТОЧНИКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА СУДНЕ

В 2020 году доля выбросов парниковых газов, приходящаяся на транспортный сектор мирового хозяйства, составила 22 % [15], из которых более чем десятая часть принадлежит выбросам парниковых газов энергетических установок водного транспорта (рис. 2).

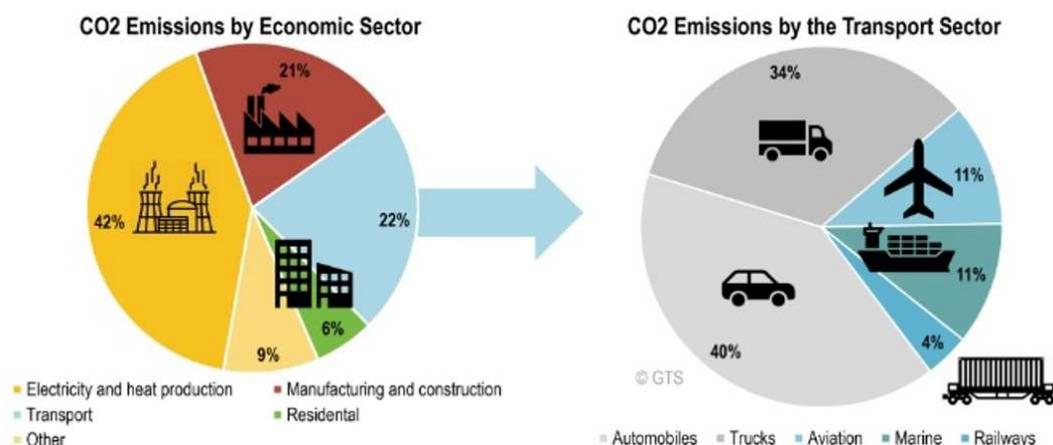


Рис. 2 Распределение выбросов ПГ по секторам мировой экономики

На данный момент мировое сообщество демонстрирует заинтересованность в снижении как общего количества выбрасываемых ПГ, так и количества вредных веществ, выделяемых в атмосферу судовыми энергетическими установками. Источниками выбросов парниковых газов на морских и речных судах являются двигатели внутреннего сгорания (двигатели главной энергетической установки, приводные дизель-генераторы, аварийные генераторы), инсинераторы (мусоросжигатели), а также котлы для выработки водяного пара, используемого для привода механизмов, обогрева помещений и/или груза.

Судовые дизельные двигатели — преимущественная форма энергетической установки в судостроении и коммерческом судоходстве, производящая на борту транспортного судна энергию, используемую для движения и других судовых нужд.

В исследовании [16] был произведен анализ статистической выборки из 100 000 судов, в результате которого было выяснено, что примерно 99 % мирового флота использует морское дизельное топливо и ДВС и менее 1 % снабжается паровыми турбинами. Еще один тип двигателя — газотурбинные двигатели, используемые в основном только на пассажирских судах, — встречается лишь на 0,1 % транспортных судов.

Дизельные двигатели могут быть разделены на малооборотные (примерно 10 % всех морских дизельных двигателей), среднеоборотные (примерно 65 % всех морских дизельных двигателей) или высокооборотные (примерно 25 % всех морских дизельных двигателей) в зависимости от их номинальной скорости.

Малооборотные дизельные двигатели (далее — МОД) имеют максимальную частоту вращения коленчатого вала около 300 об/мин, хотя большая часть этих агрегатов работает с частотой 80 — 140 об/мин. Чаще всего МОД являются двухтактными крейцкопфными двигателями с 4 — 12 цилиндрами. Существуют двигатели, с одного цилиндра которых возможно снимать свыше 4 МВт мощности. В судостроении и судоходстве такие двигатели предназначены исключительно для главной энергетической установки и используются в связке валопроводом и винтом. В таком случае на двигатель приходится большая часть вырабатываемой на судне мощности. На рис. 3 (а) представлен вид на машинное отделение судна, в основе силовой установки которого лежит МОД, внешний вид МОД перед монтажом представлен на рис. 3 (б).

Среднеоборотные дизельные двигатели (далее — СОД) представляют собой морские дизельные двигатели с рабочей частотой вращения коленчатого вала, лежащей в диапазоне 300 — 1400 об/мин. Чаще всего СОД представляют собой четырехтактные рядные (до 12 цилиндров) или V-образные (до 20 цилиндров) двигатели с отдачей мощности в диапазоне 100 — 2000 кВт/цилиндр. В судостроении и судоходстве такие двигатели используются либо в связке с редуктором, валопроводом и винтом, либо в качестве привода дизель-генераторной установки.

а)



б)



Рис. 3

а) вид на машинное отделение судна с МОД; б) внешний вид МОД Wartsila-Sulzer RTA96-C

Вид машинного отделения с СОД представлен на рис. 4 (а). Высокооборотные дизельные двигатели (ВОД) представляют собой морские дизельные двигатели с рабочей частотой вращения коленчатого вала, превышающей 1400 об/мин. На судах используются в основном в качестве вспомогательного или аварийного источника энергии (рис. 4 (б)).

Также существуют паротурбинные и газотурбинные установки, однако из-за своей сложности и больших затрат в эксплуатации (большой расход топлива) на коммерческих судах практически не представлены.

Кроме ранжирования судовых энергетических установок по типу двигателя необходимо упомянуть и об основных востребованных в данный момент типах морского судового углеводородного топлива. Этими видами топлива являются тяжелое морское топливо (флотский мазут) — HFO (Heavy fuel oil), дизельное топливо — MDO (Marine diesel oil), судовый газойль — MGO (Marine gas oil) и газовое топливо (жидкая среда, имеющая абсолютное давление паров более 0,28 МПа при температуре 37,8 °С). Некоторые выбросы (выбросы тяжелых металлов, оксидов серы) в основном зависят от качества топлива и не зависят от типа

а)



б)



Рис. 4

а) вид на машинное отделение судна с СОД; б) внешний вид аварийного дизель-генератора на базе ВОД

двигателя, в котором они используются. Таким образом, данные о типе применяемого в двигателе топлива не менее важны, чем тип судового дизеля, в котором оно используется.

Таким образом, в процессе сгорания углеводородного топлива в судовом дизельном двигателе происходит выброс около 28 опасных веществ, условно разделяемых на: основные загрязнители (оксиды азота NO_x , оксид углерода (II) CO_2 , неметановые летучие органические соединения (НМЛОС), оксиды серы SO_x), твердые или взвешенные частицы различного размера (TSP — частицы размером более 10 мкм, PM-10 — частицы размером менее 10 мкм, PM-2,5 — частицы размером менее 2,5 мкм), тяжелые металлы (свинец Pb, кадмий Cd, ртуть Hg), другие металлы и полуметаллы (мышьяк As, хром Cr, медь Cu, никель Ni, селен Se, цинк Zn), стойкие органические загрязнители (полихлорированные дифенилы (PCD), диоксиды/фураны, бензопирен Ben(a)P, бензофлуорантены Ben(b)flu и Ben(k)flu — $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, Индено [1,2,3-cd] пирен, полициклические ароматические углеводороды ПАХ-4, гексахлорбензол (ГСВ)) и непосредственно парниковые газы (углекислый газ CO_2 , метан CH_4 и закись азота N_2O).

В исследовании [17] представлены значения выбросов этих веществ в граммах на киловатт мощности судовых двигателей различного типа с учетом присущего для этого типа двигателя характерного расхода топлива. Эти данные приведены в таблицах 1, 2 и 3. В рамках данного исследования особый интерес представляет последняя группа веществ, попадающих в атмосферу, — т. н. парниковые газы.

Количество некоторых выбросов зависит не только от типа двигателя и используемого им топлива, но и от того, как нагружен двигатель в процессе работы. Например, долгая работа на холостом ходу или резкая смена режимов работы двигателя приводит к увеличению количества загрязняющих веществ, образование которых связано с неполным сгоранием топлива: CO, НМЛОС, сажа. Таким образом, косвенно эксплуатационный режим судна будет влиять на режим работы его энергоустановки и на производимые ею выбросы. Укрупненно можно выделить три режима работы судна: движение на чистой воде (где коэффициент используемой мощности энергоустановки составляет около 80 — 85 % от суммарной номинальной мощности входящих в нее главных двигателей, а выбросы от вспомогательных двигателей (дизель-генераторов) относительно невелики), при маневрировании (где также преобладают выбросы от главных двигателей, но при более низких и переменных нагрузках), в порту (где главные двигатели не используются, а выбросы возникают от работы вспомогательных двигателей, нагрузка которых составляет в районе 50 %).

Помимо режимов работы двигателя на количество производимых им выбросов влияет его возраст. Причем как напрямую, путем увеличения количества вредных веществ в выпускных газах в результате естественного износа компонентов двигателя, так и косвенно, в связи с тем, что нормативная база ИМО с течением времени меняется, а обновленные, более строгие требования к содержанию вредных веществ в отработавших газах зачастую применяются только к новым двигателям.

Таким образом, в рамках деятельности судоходной компании основным источником выбросов парниковых газов в результате ее деятельности является само транспортное судно.

5. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

Как показал предыдущий материал, в качестве КП могут выступить:

- различные варианты модернизации судовой энергетической установки, ведущие к уменьшению расхода топлива или уменьшению количества выбросов парниковых газов благодаря использованию альтернативных топлив;

- различные варианты модернизации корпуса судна или элементов его пропульсивного комплекса для повышения его эффективности (например, уменьшения составляющих полного сопротивления судна (сопротивления формы, уменьшения коэффициента шероховатости и т. д.)) или повышения эффективности гребного винта;

- различные варианты применения информационных технологий, например роутинг, основанный на долгосрочном планировании маршрута, имеющий целью уменьшение нагрузки главного двигателя транспортного судна в рейсе.

Давно применяющимся способом модернизации судовой энергоустановки является установка скрубберов — специальных устройств для очистки отработавших газов. Скрубберы устанавливаются на судах (рис. 5) главным образом для уменьшения выбросов SO_x и твердых частиц. Они фактически очищают отработавшие газы от оксидов серы и твердых частиц при помощи химических катализаторов. В результате образуются отходы, содержащие добавленное вещество (катализатор) или продукт его реакции в дополнение к удаленным выбросам. Очищенный выхлопной газ выбрасывается в атмосферу, а поток отходов хранится в судовом танке до утилизации [18].

а)



б)

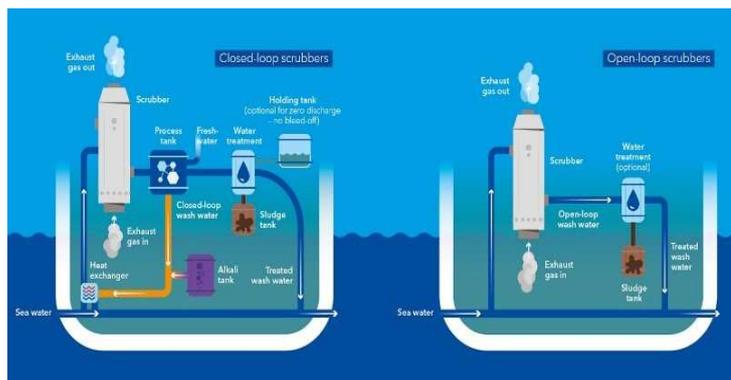


Рис. 5

Установка скруббера в кормовой надстройке в процессе строительства (а); принцип работы скруббера с замкнутым циклом (слева) и с открытым циклом (справа) (б) [19]

Скрубберы по принципу действия разделяются на «сухие» и «мокрые». Сухие скрубберы вместо использования жидких веществ для очистки выхлопных газов работают с гранулированными веществами, обработанными гашеной известью, которые реагируют с SO_x и создают в качестве конечного продукта гранулы гипса, которые хранятся на борту и могут быть утилизированы в порту [18]. Мокрые скрубберы для очистки выхлопных газов от SO_x используют воду и могут быть разделены по типу на: скрубберы открытого цикла, замкнутого цикла и гибридные (смешанные).

Скрубберы открытого цикла (рис. 5 (б)) используют забортную (морскую) воду для промывки выхлопных газов и удаления SO_x и части частиц, абсорбированных каплями воды. Загрязненная вода затем сбрасывается в море, а выбрасываемые в атмосферу выхлопные газы содержат значительно меньшее количество SO_2 . Требуемый расход воды в скруббере может составлять примерно $45 \text{ м}^3/\text{МВт}\cdot\text{ч}$ [19]. Необходимо отметить, что в настоящее время проводятся исследования, направленные на оценку последствий сброса загрязненной воды, которая может наносить вред экосистеме региона.

Принцип работы скрубберов замкнутого цикла (рис. 11) аналогичен открытому, с той лишь разницей, что в процессе очистки используется пресная вода с добавлением некоторого количества щелочного реагента, чаще всего гидроксида натрия. Образовавшиеся отходы хранятся в судовой цистерне. Требуемый расход воды составляет примерно $0,2 \text{ м}^3/\text{МВт}\cdot\text{ч}$ [19].

Гибридные скрубберы могут работать как в режиме открытого, так и в режиме замкнутого цикла, сочетая в себе преимущества каждого метода. При работе в качестве скруббера открытого цикла очищающей средой является морская вода, что снижает общую стоимость эксплуатации за счет уменьшения расхода реагента.

Помимо скрубберов, могут быть использованы селективные каталитические нейтрализаторы (SCR), представляющие собой устройства (рис. 6 (а)) для снижения содержания оксидов азота в отработавших газах (NO_x) путем введения мочевины (карбамида, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) в катализатор. Основным каталитическим материалом для морского применения является оксид ванадия, который объединен с оксидом титана в металлической или керамической структуре. Кроме того, аммиак, образующийся из мочевины, действует как восстановитель, реагируя с NO и NO_2 .

В некоторых случаях также применяется катализатор для нейтрализации аммиака, посредством которого аммиак окисляется, избегая утечки его в атмосферу.

Нейтрализатор может работать на всех видах топлива во всех судовых двигателях. Кроме того, его эффективность повышается при высоких температурах, а каталитическая активность останавливается ниже нижнего температурного предела, который выступает в роли рабочего порога.

Катализатор окисления дизельного топлива (DOC) представляет собой устройство для доочистки CO и HC , а также органической фракции твердых частиц в отработавших газах. DOC структурирован в виде сотовых узких каналов, на стенки которых нанесено каталитическое покрытие. Процесс окисления начинается, когда частицы в отработавших газах вступают в контакт со стенками, покрытыми катализатором. При работе DOC не рекомендуется использовать топлива с высоким содержанием серы. Кроме того, DOC способствует дальнейшему окислению SO_x до сульфатов, что увеличивает массу твердых частиц [19].

Дизельные сажевые фильтры (DPF) бывают разных конструкций и удаляют твердые частицы из потока выхлопных газов с разной эффективностью. Простые конструкции могут представлять собой фильтрующий элемент, состоящий из намоточных каналов относительно открытой конструкции. Эти фильтры иногда называют циклонными или проточными фильтрами. Частицы сталкиваются с поверхностями стенок канала и прилипают к ним. Благодаря своей открытой структуре эти фильтры менее подвержены засорению, чем фильтры с пристенным потоком, которые часто используются для более эффективного удаления частиц. Натяжение и инерционное воздействие и, в некоторой степени, улавливание являются основными механизмами удаления в этих типах фильтров, которые преимущественно удаляют более крупные частицы в потоке выхлопных газов. Фильтр DPF должен будет сжигать сажу и частицы, скопившиеся на фильтре, что часто называют регенерацией фильтра [19]. Фильтры DPF, установленные в судовых двигателях, затрудняют удаление сажи или регенерацию из-за высокого содержания серы в судовом топливе [20]. Также следует принимать во внимание снижение экономичности двигателя при использовании сажевых фильтров в связи с увеличением сопротивления в выпускной системе.

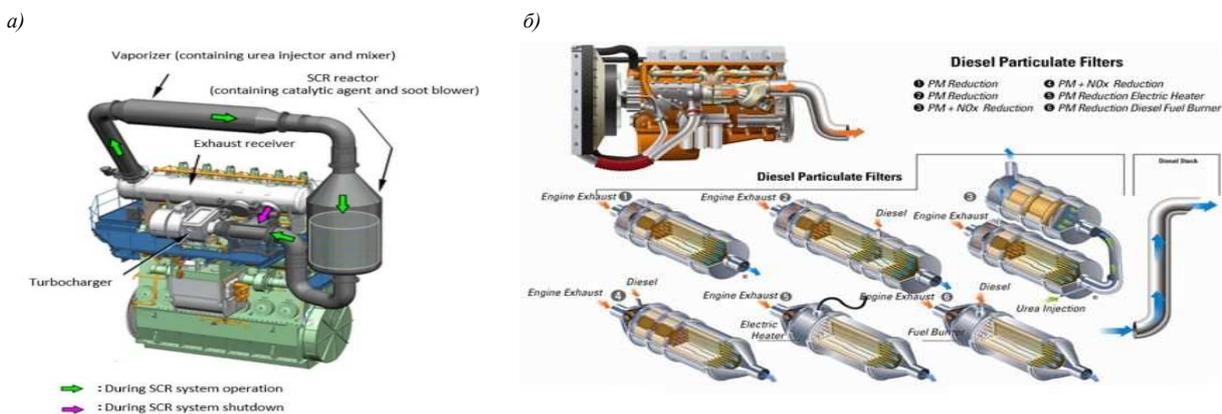


Рис. 6
 Внешний вид SCR, установленного на судовом МОД (а);
 внешний вид DOC, установленного на судовом или автомобильном ВОД (б)

В целях уменьшения количества загрязняющих веществ технологии очистки отработавших газов можно комбинировать. На морском транспорте могут быть установлены селективный каталитический нейтрализатор (SCR) и скруббер для очистки от NO_x и SO_x и сокращения выбросов твердых частиц. С технической точки зрения SCR необходимо расположить перед скруббером, где температура отработавших газов высока, что в свою очередь означает, что отработавшие газы, достигающие SCR, будут содержать высокие уровни диоксида

серы SO_2 . С целью повышения ресурса установки по очистке отработавших газов и для снижения выбросов серы следует использовать топливо с низким содержанием серы. Кроме того, на судах могут быть использованы различные комбинации иных технологий, о которых сообщалось в литературе [19].

6. УМЕНЬШЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВЫБРОСОВ СЭУ

Вопросы уменьшения количества выбросов СЭУ неоднократно исследовались в мировой и отечественной литературе [21 — 23] и на данный момент достаточно хорошо изучены, в том числе даны методические рекомендации по определению выбросов и углеродного следа при их использовании [24].

Меры, направленные на повышение энергоэффективности судна, можно условно разделить на две категории: конструктивные и организационные мероприятия.

К конструктивным мероприятиям относятся [25 — 29]:

- оптимизация формы подводной части (обводов) корпуса судна;
- повышение эффективности движителей за счет уточнения их формы, расположения, а также применения направляющих устройств для выравнивания набегающих и сбегающих потоков воды;
- снижение сопротивления надводной части корпуса судна (обтекаемая форма рубки, размещение постоянного оборудования и перевозимых грузов на палубе с учетом их сопротивления);
- создание воздушных каверн на днище судна;
- применение пузырьков воздуха (воздушная смазка), обтекающих подводную часть корпуса судна;
- применение покрытий корпуса судна с пониженным коэффициентом трения;
- применение энергосберегающих гидродинамических устройств, позволяющих уменьшить осадку судна в процессе его эксплуатации (например, использование подводных крыльев);
- использование альтернативных и возобновляемых источников энергии;
- применение мер, направленных на глубокую утилизацию теплоты выпускных газов двигателей внутреннего сгорания.

Организационные мероприятия включают в себя балластировку и размещение грузов таким образом, чтобы был обеспечен оптимальный с точки зрения энергоэффективности дифферент судна, планирование маршрута с учетом метеорологической обстановки, снижение времени стоянки на рейде, использование берегового электропитания в процессе стоянки и во время погрузочно-разгрузочных операций.

КП в транспортной отрасли могут относиться только к технологическому типу проектов, так как в них объектом приложения сил исследователей, а затем и системных администраторов являются объекты транспорта или транспортная инфраструктура. Несмотря на это, КП в транспортной отрасли не оторваны от внешней среды и зачастую неразрывно связаны с ней, например, в исследовании оценки рисков в КП используется статистическая информация о возможных климатических опасностях [30], а при решении оптимизационных задач планирования маршрутов водного и воздушного транспорта, нацеленных на экономию топлива, ориентируются на динамически меняющиеся погодные условия [31].

ВЫВОДЫ

Анализ осуществленных или находящихся на стадии рассмотрения или принятия климатических проектов Российской Федерации показал, что в транспортной отрасли такие проекты в настоящий момент отсутствуют, поэтому первые шаги в направлении подготовки и реализации КП потребуют от транспортных компаний дополнительных усилий. В исследовании продемонстрирована нормативная база применения КП, а также намечены основные пути их реализации на водном транспорте. Дальнейшей задачей авторов станет оценка привлекательности участия заинтересованных лиц в КП, касающихся внесения изменений в конструкцию или устройства судна с целью удовлетворения формальным признакам КП, путем исследования следующих вопросов:

- сколько углеродных единиц можно получить благодаря тому или иному техническому решению;
- какова стоимостная составляющая данного решения;
- какова ожидаемая выгода от внедрения того или иного климатического проекта на транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Veritas D. E. T. N. VCS Verification/Certification Report. — 2002.
2. Bernstein S., Betsill M., Hoffmann M., Paterson M. A Tale of Two Copenhagens: Carbon Markets and Climate Governance // Millennium. — 2010. — Vol. 39, № 1. — P. 161 — 173.
3. ACR [Электронный ресурс]. URL: <https://acrcarbon.org/acr-registry>
4. Федеральный закон от 02.07.2021 N 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 06.08.2024).
5. Постановление Правительства РФ от 24 марта 2022 г. № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов».
6. Приказ Минэкономразвития Российской Федерации от 11.05.2022 № 248 «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта».
7. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов».
8. Методология реализации климатического проекта № 0010 «Лесовосстановление». Версия 2.0. 18.08.2023. Разработчик: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля [Электронный ресурс]. URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/asscerted/CPM%20№0010_rus.pdf (дата обращения 10.09.2024).
9. ГОСТ Р ИСО 14080-2021 «Управление парниковыми газами и связанные виды деятельности. Система подходов и методическое обеспечение реализации климатических проектов».
10. ГОСТ Р ИСО 14064-2-2021 «Газы парниковые. Часть 2. Требования и руководство по количественному определению, мониторингу и составлению отчетной документации на проекты сокращения выбросов парниковых газов или увеличения их поглощения на уровне проекта».
11. ГОСТ Р ИСО 14064-3-2021 «Газы парниковые. Часть 3. Требования и руководство по валидации и верификации заявлений в отношении парниковых газов».
12. ГОСТ Р ИСО 14065-2014 «Газы парниковые. Требования к органам по валидации и верификации парниковых газов для их применения при аккредитации или других формах признания».
13. Пинаев В.Е. Направления, опыт и перспективы реализации климатических проектов в России / В.Е. Пинаев, В.Н. Ухова, Т.Н. Ледацева // Отходы и ресурсы. — 2023. — Т. 10. — № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://resources.today/PDF/17ECOR223.pdf> (дата обращения 10.09.2024). DOI: 10.15862/17ECOR223.
14. Разработка климатических проектов в лесах [Электронный ресурс]. URL: <https://roslesinforg.ru/services/razrabotka-klimaticheskikh-proektov/>
15. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. — Routledge, 2020.
16. Trozzi C. Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation // Techne Consulting Report ETC.EF.10 DD, May 2010.
17. Cooper D., Gustafsson T. Report Series for SMED and SMED&SLU «Methodology for Calculating Emissions from Ships. 1. Update of Emission Factors», 2004, ISSN: 1652-4179.
18. Tran T.A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships // Journal of Marine Science: Research & Development. — 2017. — Vol. 7, № 6, 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243
19. Technical and Regulatory News no. 18/2018 — Statutory Installation of Exhaust Gas Cleaning Systems (SO_x Scrubbers) — Some Practical Recommendations, DNV, October 2018.
20. Emerge Project Deliverable D1.1 ‘Summary and Analysis of Available Abatement Methods for SO_x, NO_x and PM, Together with Data on Emissions, Waste Streams, Costs and Applicability’, 2020.
21. Kuwahara T., Yoshida K., Hanamoto K., Sato K., Kuroki T., Yamamoto T., Okubo M. Pilot-Scale Experiments of Continuous Regeneration of Ceramic Diesel Particulate Filter in Marine Diesel Engine Using Nonthermal Plasma-Induced Radicals // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2012. — Vol. 48, № 5. Pp. 1649 — 1656.
22. Буянов А.С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А.С. Буянов, О.Н. Леонова, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. № 64 — 65. — С. 91 — 97.
23. Михеева А.А. Математическое моделирование процессов сжигания водоугольного топлива в судовых котлах малой мощности / А.А. Михеева, А.И. Бондаренко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72 — 73. — С. 32 — 39.
24. Буянов А.С. Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов / А.С. Буянов, В.В. Якимов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72 — 73. — С. 21 — 32.
25. Буянов А.С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А.С. Буянов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — №70 — 71. — С. 13 — 28.
26. Магаровский В.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 1 / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — Т. 1, № 402. — С. 141 — 156.
27. Магаровский В.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2 / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — Т. 1, № 403. — С. 167 — 182.
28. Горбачев Ю. Суда на воздушной каверне: реальный способ повышения энергоэффективности и экологической безопасности / Ю. Горбачев, А. Буянов, А. Сверчков // Морской флот. — 2015. — № 2. — С. 28 — 37.
29. Шурпяк В.К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В.К. Шурпяк, М.С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70 — 71. — С. 29 — 36.
30. Jaroszowski D., Chapman L., Petts J. Climate Change and Road Freight Safety: a Multidisciplinary Exploration // Climatic Change. — 2013. — Vol. 120. — Pp. 785 — 799.
31. Zhang M., Tsoulakos N., Kujala P., Hirdaris S. A Deep Learning Method for the Prediction of Ship Fuel Consumption in Real Operational Conditions // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2024. — Т. 130, 107425. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107425.

REFERENCES

- Veritas D. E. T. N. VCS Verification/Certification Report. — 2002.
- Bernstein S., Betsill M., Hoffmann M., Paterson M. A Tale of Two Copenhagens: Carbon Markets and Climate Governance. Millennium. — 2010. — Vol. 39, № 1. — Pp. 161 — 173.
- ACR [Электронный ресурс]. URL: <https://acrcarbon.org/acr-registry>
- Federal Law N 296-FZ of 02.07.2021 'On Limiting Greenhouse Gas Emissions'. URL: <http://www.consultant.ru> (accessed 06.08.2024). (In Russ.)
- Resolution of the Government of the Russian Federation No. 455 of March 24, 2022 'On Approval of the Rules for Verification of the Results of Climate Project Implementation'. (In Russ.)
- Order № 248 of May 11, 2022 of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation 'On Approval of the Criteria and Procedure for Classifying Projects Implemented by Legal Entities, Individual Entrepreneurs or Individuals as Climate Projects, and the Form and Procedure for Submitting a Report on Climate Project Implementation'. (In Russ.)
- Order № 371 of May 27, 2022 of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation 'On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas absorption volumes'. (In Russ.)
- Climate Project Methodology No. 0010 'Reforestation', Version 2.0, August 18, 2023. Developer: Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology. URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20№0010_eng.pdf (accessed 10.09.2024).
- GOST R ISO 14080-2021 'Greenhouse gas management and related activities. System of approaches and methodological support for the implementation of climate projects'. (In Russ.)
- GOST R ISO 14064-2-2021 'Greenhouse gases. Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements'. (In Russ.)
- GOST R ISO 14064-3-2021 'Greenhouse gases. Part 3: Specification with guidance for validation and verification of greenhouse gas claims'. (In Russ.)
- GOST R ISO 14065-2014 'Greenhouse gases. Requirements for greenhouse gas validation and verification bodies for use in accreditation or other forms of recognition'. (In Russ.)
- Pinaev V.E., Ukhova V.N., Ledashcheva T.N. Napravleniya, opyt i perspektivy realizatsii klimaticheskikh proektov v Rossii [Directions, experience and prospects for the implementation of carbon projects in Russia]. Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling. — 2023. — T. 10. — № 2. URL: <https://resources.today/en/17ecor223.html> (accessed 10.09.2024). DOI: 10.15862/17ECOR223
- Разработка климатических проектов в лесах [Электронный ресурс]. URL: <https://roslesinforg.ru/services/razrabotka-klimaticheskikh-proektov/> (In Russ.)
- Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. — Routledge, 2020.
- Trozzi C. Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation. Techne Consulting Report ETC.EF.10 DD, May 2010.
- Cooper D., Gustafsson T. Report Series for SMED and SMED&SLU «Methodology for Calculating Emissions from Ships. 1. Update of Emission Factors», 2004, ISSN: 1652-4179.
- Tran T.A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. Journal of Marine Science: Research & Development. — 2017. — Vol. 7, № 6, 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.
- Technical and Regulatory News no. 18/2018 — Statutory Installation of Exhaust Gas Cleaning Systems (SO_x Scrubbers) — Some Practical Recommendations, DNV, October 2018.
- Emerge Project Deliverable D1.1 'Summary and Analysis of Available Abatement Methods for SO_x, NO_x and PM, Together with Data on Emissions, Waste Streams, Costs and Applicability', 2020.
- Kuwahara T., Yoshida K., Hanamoto K., Sato K., Kuroki T., Yamamoto T., Okubo M. Pilot-Scale Experiments of Continuous Regeneration of Ceramic Diesel Particulate Filter in Marine Diesel Engine Using Nonthermal Plasma-Induced Radicals. IEEE Transactions on Industry Applications. — 2012. — Vol. 48, № 5. Pp. 1649 — 1656.
- Buyanov A.S., Leonova O.N., Reutsky A.S. *Analiz opyta primeneniya metanola i etanola v kachestve topliva na sudakh* [Methanol and ethanol as ship fuel: analysis of application experience]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2021. — № 64 — 65. — Pp. 91 — 97.
- Mikheeva A.A., Bondarenko A.I. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov szhiganiya vodougol'nogo topliva v sudovykh kottakh maloy moshchnosti* [Mathematical modeling of combustion processes of coal-water fuel in low-power marine boilers]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — № 72 — 73. — Pp. 32 — 39.
- Buyanov A.S., Yakimov V.V., Reutsky A.S. *Koeffitsient energoeffektivnosti kak instrument opredeleniya uglerodnogo sleda ot raboty morskikh sudov ledovykh klassov* [Energy efficiency coefficient as a tool for determining the carbon footprint from the operation of sea-going ships of ice classes]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — № 72 — 73. — Pp. 21 — 32.
- Buyanov A.S., Reutsky A.S. *Formirovanie metodologicheskogo podhoda k protsessu opredeleniya uglerodnogo sleda transportnoy uslugi s ispol'zovaniem koeffitsientov energoeffektivnosti sudna* [Formation of a methodology for determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — № 70 — 71. — Pp. 13 — 28.
- Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. *Novoe v mezhdunarodnoy politike snizheniya emissii parnikovyykh gazov sudami i neobkhodimye meropriyatiya v morskoy sektore* [Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 1]. Transactions of the Krylov State Research Centre. — 2022. — T. 1, № 402. — C. 141 — 156.
- Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. *Novoe v mezhdunarodnoy politike snizheniya emissii parnikovyykh gazov sudami i neobkhodimye meropriyatiya v morskoy sektore* [Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 2]. Transactions of the Krylov State Research Centre. — 2023. T. 1, № 403. — Pp. 167 — 182.

28. Gorbachev Yu., Buyanov A., Sverchkov A. *Suda na vozduшной kaverne: realnyy sposob povysheniya energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti* [Air cavern ships: a real way to improve energy efficiency and environmental safety]. *Morskoy flot*. — 2015. — № 2. — Pp. 28 — 37.
29. Shurpyak V.K., Bogdanov M.S. *Analiz potrebleniya alternativnykh vidov topliva na morskikh sudakh* [Analysis of the consumption of alternative fuels on sea-going ships]. *Nauchno-tekhnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva*. — 2023. — № 70 — 71. — Pp. 29 — 36.
30. Jaroszweski D., Chapman L., Petts J. *Climate Change and Road Freight Safety: a Multidisciplinary Exploration*. *Climatic Change*. — 2013. — Vol. 120. — Pp. 785 — 799.
31. Zhang M., Tsoulakos N., Kujala P., Hirdaris S. *A Deep Learning Method for the Prediction of Ship Fuel Consumption in Real Operational Conditions*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. — 2024. — T. 130, 107425. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107425

УДК 621.43.06

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРИ СВЕЖЕГО ЗАРЯДА И ШУМА В СИСТЕМЕ ВЫПУСКА ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОДВЕСНОГО ЛОДОЧНОГО МОТОРА

К.Е. Хмельницкий, канд. техн. наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, e-mail: chuchera80@mail.ru

М.Н. Покусаев, д-р техн. наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, e-mail: evt2006@rambler.ru

А.А. Хмельницкая, канд. техн. наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, e-mail: khmelnitskayaaa@mail.ru

М.Ф. Руденко, д-р техн. наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Установка резонатора в общепринятом виде на двухтактные двигатели подвесных лодочных моторов не представляется возможной ввиду таких технических особенностей моторов, как выхлоп отработавших газов в дейдвуд; ограничение длины дейдвуда подвесных лодочных моторов под двигателями разной мощности из-за регламентированной высоты транца; вращающийся вертикальный вал в зоне выхода отработавших газов; невозможность изменения конфигурации выхлопной системы из-за специфической формы дейдвудной части, имеющей определенную конструкцию, направленную на улучшение, в первую очередь, гидродинамических характеристик и, во вторую очередь, прочностных характеристик, учитывающих консольное расположение мотора. На основании наработанного опыта Научно-учебно-производственной лабораторией «Подвесные лодочные моторы» кафедры эксплуатации водного транспорта и промышленного рыболовства ФГБОУ ВО «АГТУ» в области снижения воздействия на экологическую обстановку маломерных судов с подвесными лодочными моторами, учитывая их конструктивные особенности, разработано устройство, способное по своим характеристикам заменить резонатор. Предлагаемое устройство способно создать «воздушный клапан», останавливающий поток отработавших газов с частью свежего заряда при снижении их давления на выходе из выпускного окна к концу процесса выпуска газов, и возвращает их к выпускному окну. Свежий заряд, поступающий через выпускное окно в цилиндр двигателя во время цикла впуска, под действием продувки направляется к выпускному окну, где задерживается потоком отработавших газов, создаваемых противодавлением. Устройство также способно снизить подводный шум маломерного судна за счет интерференции звуковых волн, которая создается обратным потоком отработавших газов по направлению к выпускному окну.

Ключевые слова: маломерное судно, двухтактный двигатель, подвесной лодочный мотор, свежий заряд, снижение шума, экологические характеристики, вредные выбросы, отработавшие газы.

A DEVICE TO REDUCE THE LOSS OF FRESH CHARGE AND NOISE IN THE EXHAUST SYSTEM OF A TWO-STROKE OUTBOARD MOTOR

K.E. Khmelnitsky, PhD, associate professor, Astrakhan State Technical University, e-mail: chuchera80@mail.ru

M.N. Pokusaev, DSc, professor, Astrakhan State Technical University, e-mail: evt2006@rambler.ru

A.A. Khmelnitskaya, PhD, associate professor, Astrakhan State Technical University, e-mail: khmelnitskayaaa@mail.ru

M.F. Rudenko, DSc, professor, Astrakhan State Technical University e-mail: mf.rudenko@mail.ru

Installation of the resonator in a generally accepted form on two-stroke outboard motors is not possible due to such technical features of the motors as exhaust in deadwood, limitation of the length of the outboard motors for engines of different power due to the regulated height of the transom, a rotating vertical shaft in the exhaust gas outlet zone, the inability to change the configuration of the exhaust system due to a certain shape of the deadwood part having a certain design aimed at improving, primarily, hydrodynamic characteristics and, secondly, strength characteristics taking into account the cantilever arrangement of the motor. Based on the accumulated experience of the Scientific, Educational and Production Laboratory "Outboard Boat Motors" of the Department of Operation of Water Transport and Industrial Fisheries of the Astrakhan State Technical University in the field of reducing the environmental impact of small vessels with outboard boat motors, and taking into account their design features, a device is being developed capable of replacing the resonator according to its characteristics. The proposed device is capable of creating an air valve that can stop the flow of exhaust gases with a part of the fresh charge when their pressure decreases at the outlet of the exhaust window by the end of the exhaust process and returns them to the exhaust window. The fresh charge entering the engine cylinder through the intake window during the intake cycle is directed to the exhaust window under the action of purging, where it is delayed by the flow of exhaust gases created by back pressure. The device is also able to reduce the underwater noise of a small vessel due to the interference of sound waves, which is created by the reverse flow of exhaust gases towards the exhaust window.

Keywords: small vessel, two-stroke engine, outboard motor, fresh charge, noise reduction, environmental characteristics, harmful emissions, exhaust gases.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире проблемы загрязнения окружающей среды отработавшими газами и шумовой эмиссии имеют все большее значение [1 — 3]. В рамках этого контекста двухтактные двигатели подвесных лодочных моторов (далее ПЛМ) являются одной из областей, требующих особого внимания ввиду их многочисленности. ПЛМ с двигателями, работающими по двухтактному циклу, обладает более простой конструкцией и легче такого же по мощности четырехтактного почти на 20 %. Также они более простые в техническом обслуживании, но отличаются повышенной вибрацией и шумом [4]. Особенностью работы двухтактных ПЛМ является введение масла в бензин. Масло как более тяжелая фракция нефти не может полностью сгорать, к тому же часть масла выбрасывается из выпускных окон в процессе продувки. ПЛМ с двигателями, работающими по двухтактному циклу, широко используются в различных водных экосистемах, но при этом их экологические характеристики могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду и пользователей. В отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (далее — ДВС) содержится большое число химических соединений, опасных для здоровья человека. Время, в течение которого вещества, содержащиеся в отработавших газах (далее ОГ), сохраняют свою химическую активность в условиях окружающей среды, колеблется от нескольких минут до нескольких лет, и в течение всего срока существования эти вредные выбросы могут оказывать неблагоприятное воздействие на загрязняемые водоемы. Наряду с отработавшими газами, значительное воздействие на окружающую среду оказывает высокий уровень как воздушного шума, так и гидрошума, создаваемого ПЛМ, который, помимо негативного воздействия на организм человека, влияет и на условия миграции водных гидробионтов и гнездования птиц [1]. Несмотря на такие преимущества двухтактного двигателя, как простота изготовления, малый вес, высокая литровая мощность, они оказывают крайне негативное воздействие на окружающую среду: выбросы в атмосферу, сбросы нефтепродуктов в водоем, высокий уровень шума и вибрации, что является результатом конструктивных особенностей.

1. ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ПЛМ В РОССИИ И СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Количество лодочных моторов в России определить сложно, тем не менее есть несколько источников информации, которые позволяют получить представление об их количестве.

1. Аналитические исследования: BusinesStat в своем исследовании «Анализ рынка подвесных лодочных двигателей в России в 2014 — 2018 г., прогноз на 2019 — 2023 г.» оценивает количество лодочных моторов в России на 2018 год в 1,5 млн штук. Tebiz Group в своем исследовании «Рынок подвесных лодочных моторов в России 2024» оценивает количество лодочных моторов в России на 2023 год в 1,7 млн штук [5].

2. Данные Государственной инспекции по маломерным судам (далее ГИМС): ГИМС регистрирует все подвесные лодочные моторы, применяемые на маломерном флоте, мощностью более 10 л.с. По данным ГИМС, на 1 января 2023 года в России было зарегистрировано 1,2 млн подвесных лодочных моторов.

Важно отметить, что все эти данные являются приблизительными и не включают незарегистрированные лодочные моторы мощностью меньше 9,9 л.с., на которые и приходится существенная доля продаж на рынке ПЛМ.

Большая часть лодочных моторов сосредоточена в Европейской части России. Лидерами по количеству лодочных моторов являются Краснодарский край, Ростовская область, Москва и Санкт-Петербург.

Рынок лодочных моторов в России в последние годы растет, в связи с этим особо остро стоит проблема загрязнения окружающей среды, и применение резонаторов могло бы существенно уменьшить негативное влияние на экологическую обстановку в целом и на водные ресурсы в частности [5].

Главной проблемой двухтактных моторов является выброс и сброс части топливной смеси, но не все типы существующих устройств настроенного газоразпуска подходят для решения. Также стоит учитывать, что конструкция лодочного двигателя играет ключевую роль в определении возможности установки устройств настроенного газоразпуска, разработанных по принципу резонатора, и его эффективности в снижении вредных выбросов в ОГ. Резонаторы на двигатели, работающие по двухтактному циклу, бывают разных типов и конструкций. Они могут быть изготовлены из металла или пластика, иметь разные формы и размеры. Выбор резонатора зависит от конкретной модели и характеристик мотора. Функции резонатора в ДВС, заключаются в оптимизации работы системы выпуска отработанных газов, улучшении сгорания

топлива и повышения мощности двигателя. Однако стоит учитывать, что резонатор не может обеспечить прирост мощности на всех режимах работы. Его настраивают на тот режим, при котором ДВС чаще используется. При этом звуковая волна с выхлопными газами должна успеть пройти через весь резонатор, отразиться от обратного конуса и вернуться к выпускному окну в тот момент, когда оно еще открыто, а продувочные окна уже закрылись. Если волна своевременна, то она вернет часть рабочей смеси обратно в продувочные каналы. Если позже, то произойдет потеря свежего заряда, который попадет в выхлопной тракт. Теория и практика показывают, что для улучшения процессов очистки и наполнения могут быть использованы газодинамические явления, происходящие в самих газовых системах двигателя [6].

2. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРИ СВЕЖЕГО ЗАРЯДА И ШУМА В СИСТЕМЕ ВЫПУСКА ДВУХТАКТНОГО ПОДВЕСНОГО ЛОДОЧНОГО МОТОРА

1. К наработкам Научно-учебно-производственной лаборатории «Подвесные лодочные моторы» кафедры эксплуатации водного транспорта и промышленного рыболовства ФГБОУ ВО «АГТУ» в области понижения воздействия на окружающую среду ПЛМ до недавнего времени относились разработки, способные частично устранять образовавшееся загрязнение, например, путем фильтрации отработавших газов или капотированием шума ПЛМ [7], но сейчас предпринимаются попытки повлиять непосредственно на сами процессы, происходящие в ДВС. Так, путем впрыска в камеру сгорания ПЛМ мелкодисперсионного водного тумана удалось снизить образование NO_x на 32 % [8]; следующим этапом предотвращения образования негативного экологического фактора стала разработка устройства для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска ПЛМ [9].

Так же существуют возможности снизить негативное воздействие на окружающую среду и повысить критерий экологической оценки (описанной в работах профессора М.Ф. Руденко) [10] двухтактных моторов путем применения резонаторов, но установка резонатора в общепринятом виде на ПЛМ с двигателями, работающими по двухтактному циклу, не представляется возможным ввиду таких технических особенностей моторов, как выхлоп отработавших газов в дейдвуд, определенная длина дейдвуда ПЛМ, ограничивающаяся четырьмя видами с соответствующей маркировкой: S — обычный, 381 мм (распространенный формат маломощных моделей, но также производится для моделей мощностью до 55 л.с.); L — длинный, 508 мм (массовый формат, применяется к моторам от 10 до 175 л.с.); X — экстрадлинный, 635 мм (чаще встречается у четырехтактных ПЛМ мощностью двигателя от 175 до 350 л.с.); U — ультрадлинный, 762 мм (формат, предназначенный для решения специфических задач, таким дейдвудом оснащаются только моторы Yamaha). Также важными причинами, по которым невозможно установить резонатор классического исполнения на ПЛМ, являются вращающийся вертикальный вал в зоне выхода отработавших газов и невозможность изменения конфигурации выхлопной системы из-за определенной формы дейдвудной части, имеющей определенную конструкцию, направленную на улучшение, в первую очередь, гидродинамических характеристик и, во вторую очередь, прочностных характеристик, учитывающих консольное крепление мотора. Существует способ установки резонатора на ПЛМ с выхлопом ОГ в атмосферу, но ввиду монтажа на корпус мотора разветвленной газовой выхлопной системы, состоящей из нескольких труб, значительно увеличивает весогабаритные характеристики ПЛМ (такие эксперименты в своих работах описывал Е.И. Фишбейн [6]). На рис. 1 изображен ПЛМ с выбросом отработавших газов в атмосферу.

Но такие технические решения нежелательны для маломерного флота, где идет борьба за уменьшение веса и размера ПЛМ, особенно глиссирующего, где прослеживается зависимость веса маломерного судна от мощности мотора [4], — этот принцип необходимо учитывать при решении приоритетных задач судостроительной отрасли по строительству современных скоростных, прогулочных и круизных пассажирских судов, в том числе судов, имеющих в качестве энергетической установки двухтактный ПЛМ [12].

Разработанное устройство относится к области судостроения, в частности к устройству для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска отработавших газов ПЛМ с двигателями, работающими по двухтактному циклу [9].

Основной задачей работы, являлось создание устройства в системе выпуска отработавших газов, которое снижает потери свежего заряда и уменьшает шум при работе ПЛМ с двигателями, работающими по двухтактному циклу за счет усовершенствования конструкции. Принципиальная схема предлагаемого устройства изображена на рис. 2.



Рис. 1 Подвесной лодочный мотор с выбросом отработавших газов в атмосферу [11]

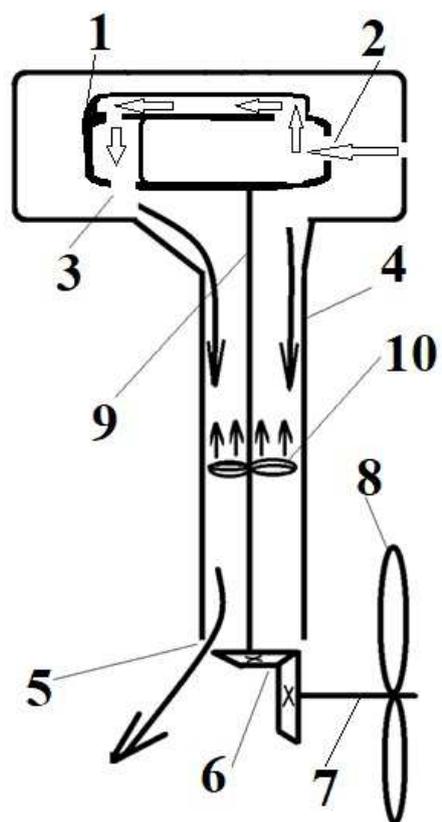


Рис. 2 Принцип работы устройства для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска двухтактного двигателя подвесного лодочного мотора

Устройство содержит двигатель 1 с впускным 2 и выпускным 3 окном, направленным в полость дейдвуда 4 для выпуска отработавших газов, выходящих через канал 5, в воду, имеется редуктор 6, на гребном валу 7 которого установлен винт 8. В полости дейдвуда 4 установлен вертикальный вал 9, связанный с двигателем 1 и редуктором 6, на котором жестко закреплены с возможностью вращения множественные металлические лопасти 10.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. При работающем двигателе 1 отработавшие газы с частью свежего заряда поступают из впускного окна 2 в полость дейдвуда 4 и двигаются через канал вывода отработавших газов 5 в воду, закрепленные на вертикальном валу 9 множественные лопасти 10 приводятся в движение, создавая противодействие отработавшим газам, которое останавливает поток отработавших газов с частью свежего заряда при снижении их давления на выходе из выпускного окна 3 к концу процесса выпуска газов и возвращает их к выпускному окну 3. Свежий заряд, поступающий через впускное окно 2 в цилиндр двигателя 1 во время цикла впуска, под действием продувки направляется к выпускному окну 3, где задерживается потоком отработавших газов, создаваемых противодействием множественными лопастями со стороны полости дейдвуда. Таким образом, снижается потеря свежего заряда. Шум, образующийся в результате газодинамических процессов, поступает из выпускного окна в полость дейдвуда вместе с отработавшими газами, попадает в зону флуктуации в турбулентности воздушного потока, создаваемой множественными лопастями и периодически открываемым выпускным окном. Звуковые волны, проходя через неоднородные слои давления, температуры и направления потоков отработавших газов, теряют звуковую энергию и рассеиваются, за счет чего происходит снижение шума.

Предлагаемое устройство обеспечивает снижение шума ПЛМ с двигателями, работающими по двухтактному циклу из-за создаваемого потока отработавших газов по направлению к выпускному окну, за счет интерференции звуковых волн, кроме того, противодействие создает подпор отработавших газов в зоне выпускного окна, препятствующее выходу свежего заряда. Расчет производительности множественных лопастей проводился из расчета создания давления, равного остаточному давлению в цилиндре в конце выпуска отработавших газов, когда впускное и выпускное окна открыты.

3. ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТУ

Разработанное устройство было создано на 3D-принтере из ABS-пластика. На вертикальный приводной вал двухтактного ПЛМ марки «Sea-Pro 2.5» были установлены две крепежные втулки, жестко закрепленные винтами-фиксаторами к валу двигателя, между втулками размещаются множественные лопасти, которые вращаются на валу, исключая проскальзывания за счет шлицевого соединения (рис. 3).



Рис. 3 Крепление множественных лопастей, обжатых с двух сторон крепежными втулками с шлицевым соединением

Вал двигателя хвостовиком подсоединяется к редуктору и помещается в полость дейдвуда, где множественные лопасти помещаются в сегмент круглого сечения дейдвуда (рис. 4, 5).



Рис. 4 Общий вид втулки с металлическими лопастями, установленной на вертикальном валу, который передает крутящий момент редуктору

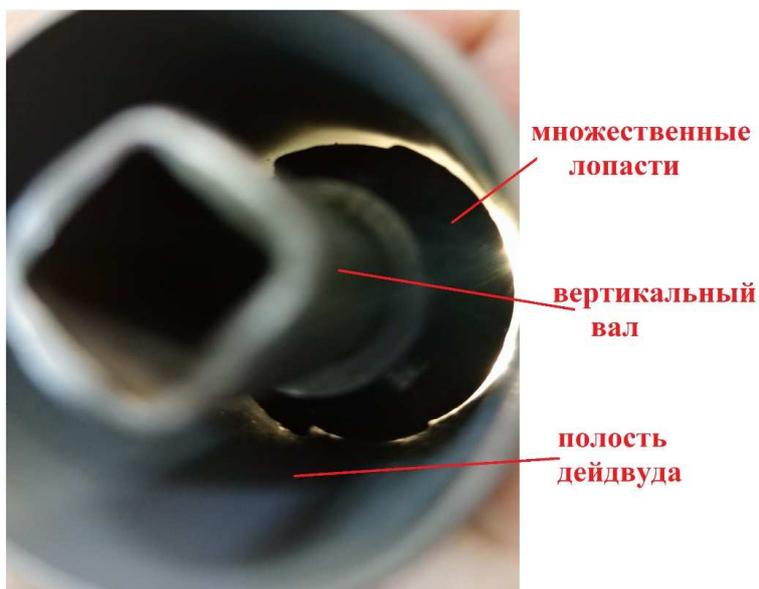


Рис. 5 Общий вид установленного в дейдвуде устройства

После установки вертикального вала в полость дейдвуда сверху устанавливается двигатель, выходной вал которого входит в зацепление с вертикальным валом и тем самым передает вращение.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе серии экспериментов ПЛМ был протестирован до и после установки разработанного устройства в малом опытовом бассейне (далее МОБ) [13] на содержание СО и СН в выбросах. В качестве измерительного оборудования использовался переносной газоанализатор «Инфракар-А-02», имеющий свидетельство о поверке. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения содержания вредных выбросов в отработавших газах ПЛМ

Режим работы ПЛМ	Испытания ПЛМ без устройства		
	об/мин	СО, %	СН, ppm
Малый ход	1335	3,97	7600
Средний ход	2230	3,74	5816
Полный ход	4880	5,06	3900
Режим работы ПЛМ	Испытания ПЛМ с устройством		
	об/мин	СО, %	СН, ppm
Малый ход	1340	1,04	3098
Средний ход	2230	1,48	2222
Полный ход	4920	3,58	3482

Из данных таблицы видно, что показания оксида углерода (СО) ни в одном, ни в другом случае не превышают установленные нормы для ПЛМ в величину 4,8 % от общего объема отработавших газов [14] при измерениях на холостом ходу¹, однако заметно, что после установки устройства показатели оксида углерода (СО) ощутимо снижаются: на малом ходу на 73,8 %; на среднем ходу на 60,4 % и на полном ходу на 29,2 %. Похожая ситуация и с количественным содержанием углеводородов (СН) в выбросах, где на малом и среднем ходу наблюдается снижение их содержания на 60 % (на 4502 ppm) и на 62 % (на 3594 ppm) соответственно, в то время как на полном ходу разница менее ощутимая и составляет 11 % (на 418 ppm). Отмечено, что при работе ПЛМ на малом и среднем режимах работы с установленным устройством образуется сажа в виде взвеси в ОГ, в то время как использование ПЛМ в штатной комплектации оставляет на воде в МОБ масляные пятна. Также проводилось измерение уровня звука и уровней звукового давления на открытой площадке с удаленностью от ближайших строений не менее 30 м. ПЛМ установили на отдельно стоящий транец с выхлопом ПЛМ в воздух, организовав охлаждение для ДВС водяным насосом с приводом от электродвигателя. В качестве измерительного оборудования использовался виброакустический комплекс, анализатор 1 класса «Экофизика 110а», имеющий свидетельство о поверке. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения уровня звука и уровней звукового давления ПЛМ

Условия измерений	Уровни звукового давления дБ								Уровень звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Фон									
Уровень фона	35,1	37,6	41,2	41,1	44,6	41,9	37,9	27,8	49,1
Малый ход									
Без устройства	55,4	70,9	79,6	80,1	82,5	75,5	72	71,8	86,3
С устройством	53,1	68	77,3	71,2	80,1	71,8	68,6	65,2	83
Разница	2,3	2,9	2,3	8,9	2,4	3,7	3,4	6,6	3,3
Полный ход									
Без устройства	51,6	84,3	80	94,1	106,6	100,7	95,2	87,3	107,9
С устройством	64,6	75,5	83,8	93	99	95,7	90,4	78,8	101,8
Разница	-13	8,8	-3,8	1,1	7,6	5	4,8	8,5	6,1

¹ На модели ПЛМ «Sea-Pro 2.5» холостой ход отсутствует, поэтому применяются данные, измеренные на малом ходу.

На малом ходу отмечено снижение уровней звукового давления на всех частотах, а уровень звука снижается на 3,3 дБА. Измерения уровней звукового давления на полном ходу не дало однозначного результата в сторону снижения, так как на частоте 63 Гц и на частоте 250 Гц наблюдается обратный эффект на 13 дБ и на 3,8 дБ соответственно, на других частотах наблюдается высокая эффективность работы устройства. Эффективность устройства при измерении уровня звука составила 6,1 дБА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование резонаторов в двигателях, работающих по двухтактному циклу, может быть эффективным способом повышения критерия экологической оценки. Экологическая обоснованность применения резонаторов может быть подтверждена рядом исследований, которые показывают, что не только вредные выбросы и сбросы, но и шум от двигателей являются одной из основных причин воздействия на окружающую среду. Применение разработанного устройства для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска двухтактного двигателя ПЛМ позволило улучшить процесс сгорания топлива, что повысило экологические характеристики двигателя и снизило образование таких вредных выбросов в отработавших газах, как оксид углерода (СО) и углеводороды (СН). Также этим методом возможно снизить уровень шума газорывпуска на 6,1 дБ, что повысит комфорт плавания. Но иногда установка настроенных систем газорывпуска для снижения выбросов вредных веществ в двухтактных лодочных двигателях может быть затруднительной или даже невозможной из-за конструктивных особенностей самого мотора. В таких случаях ведется поиск технологических решений для снижения вредного воздействия на окружающую среду, например, использование систем очистки выбросов, использование шумо-вибропоглощающих материалов и др., но данная тактика направлена на борьбу с образовавшимся негативным фактом, а идея разработки устройства для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска двухтактного двигателя подвесного лодочного мотора направлена на уменьшение его образования в процессе работы ДВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возницкий И.В., Михеев Е.Г. Судовые дизели и их эксплуатация / И.В. Возницкий, Е.Г. Михеев. — М.: Транспорт, 1990. — 361 с.
2. Туркин А.В. Разработка системы мониторинга выбросов загрязняющих веществ от судовых энергетических установок в атмосферу морского порта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Туркин. Новороссийск, 2011. — 21 с.
3. Климова Е.В. Рекомендации по применению способов снижения вредного воздействия судовых выбросов на гидросферу / Е.В. Климова, А.Ф. Дорохов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. — 2015. — № 1. — С. 91 — 96.
4. Двухтактный или четырехтактный подвесной лодочный мотор: что лучше? Преимущества каждого типа лодочных моторов [Электронный ресурс]. URL: https://vodnyimir.ru/Dvuhtaktnyi_ili_chetyrehtaktnyi_podvesnoi_lodochnyi_motor_s6.html (дата обращения 10.07.2024).
5. Анализ рынка подвесных лодочных двигателей в России в 2014 — 2018 гг., прогноз на 2019 — 2023 гг. [Электронный ресурс]. URL: https://businessstat.ru/images/demo/outboard_motors_2019_russia_demo_businessstat.pdf/ (дата обращения 11.07.2024).
6. Фишбейн Е.И. Устройство системы выпуска / Е.И. Фишбейн // Катера и яхты. — 1977. — № 5(69).
7. Патент № 194855 U1 Российская Федерация, МПК В63Н 21/00(2006.01) Шумоизолирующий капот для подвесного лодочного мотора / М.Н. Покусаев, К.Е. Хмельницкий; заявл. 01.10.2019 г.; опубл. 25.12.2019.
8. Покусаев М.Н. Подача воды во впускной коллектор подвесного четырехтактного лодочного мотора / М.Н. Покусаев, К.Е. Хмельницкий, А.А. Хмельницкая, А.В. Васильев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. — 2023. — № 4. — С. 46 — 54. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-4-46-54. EDN OX1WHT
9. Патент № RU 226 137 U1 Российская Федерация, МПК F01N 1/08 (2006.01) Устройство для снижения потери свежего заряда и шума в системе выпуска двухтактного двигателя подвесного лодочного мотора / К. Е. Хмельницкий, М. Н. Покусаев; заявл. 25.12.2023 г. опубл. 22.05.2024.
10. Руденко М.Ф. Моделирование экологической эффективности внедрения гелиоэнергетических комплексов для производства теплоты / М.Ф. Руденко, Л.П. Третьяк, В.В. Гривина, Ю.В. Шипулина // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2016. — № 2. — С. 73 — 78.
11. Outboard motor with exhaust gas emission into the atmosphere [Электронный ресурс]. URL: <https://quincylooperracing.us/subpage40.html> (дата обращения: 23.06.2024).
12. Кузенков А.И. Анализ современного состояния скоростного пассажирского флота и предложения по развитию скоростных судов повышенной мореходности / А.И. Кузенков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 60 — 61. — С. 49 — 55. — EDN DCGVAG.

13. Покусаев М.Н. Изменение конструкции малого опытового бассейна для комплексных испытаний подвесных лодочных моторов / М.Н. Покусаев, К.Е. Хмельницкий, А.А. Хмельницкая, М.Ф. Руденко, А.А. Кадин, Г.Г. Клочкова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер: Морская техника и технология. — 2022. — № 4. — С. 19 — 26. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-19-26. EDN ARGWHP.
14. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 026/2012 «О безопасности маломерных судов» (принят решением Совета Евразийской экономической комиссии от 15 июня 2012 г. № 33). Статья 5.

REFERENCES

1. Voznitsky I.V., Mikheev E.G. *Sudovye dvigateli i ikh ekspluatatsiya* [Marine diesels and their operation]. — Moscow: Transport, 1990. — 361 p.
2. Turkin A.V. *Razrabotka sistemy monitoringa vybrosov zagryazn'ayushchikh veshchestv ot sudovykh energeticheskikh ustanovok v atmosferu morskogo porta* [Development of a system for monitoring emissions of pollutants from marine power plants into the atmosphere of a seaport]: PhD diss. abstr. — Novorossiysk, 2011. — 21 p.
3. Klimova E.V., Dorokhov A.F. *Rekomendatsii po primeneniyu sposobov snizheniya vrednogo vozdeystviya sudovykh vybrosov na gidrosferu* [Recommendations on the use of methods to reduce the harmful effects of ship emissions on the hydrosphere]. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine Engineering and Technology. — 2015. — No. 1. — Pp. 91 — 96.
4. *Dvukhtakny ili chetyrehtakny podvesnoy lodochny motor: chto luchshe? Preimushchestva kazhdogo tipa lodochnykh motorov* [Two-stroke or four-stroke outboard motor: Which is better? Advantages of each type of outboard motors. URL: https://vodnyimir.ru/Dvuhtaknyi_ili_chetyrehtaknyi_podvesnoi_lodochnyi_motor_s6.html (accessed 07.10.2024).
5. *Analiz rynka podvesnykh lodochnykh dvigateley v Rossii v 2014 — 2018, prognoz na 2019 — 2023* [Analysis of the outboard boat engine market in Russia in 2014 — 2018, forecast for 2019 — 2023]. URL: https://businessstat.ru/images/demo/outboard_motors_2019_russia_demo_businessstat.pdf (accessed 07.11.2024).
6. Fishbein E.I. *Ustroystvo sistemy vypuska* [The device of the exhaust system] // Boats and Yachts. — 1977. — № 5(69).
7. Patent No. 194855 U1 Russian Federation, IPC B63H 21/00(2006.01) Noise-insulating hood for outboard boat motor / M.N. Pokusaev, K.E. Khmelitsky; appl. 01.10.2019, publ. 25.12.2019. (In Russ.)
8. Pokusaev M.N., Khmelitsky K.E., Khmelitskaya A.A., Vasiliev A.V. *Podacha vody vo vpusknoy kollektor podvesnogo chetyrehtaknogo lodochnogo motora* [Water supply to the intake manifold of an outboard four-stroke motor]. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine Engineering and Technology. — 2023. — No. 4. — Pp. 46 — 54. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-4-46-54. — EDN OXIWHT.
9. Patent No. RU 226 137 U1 Russian Federation, IPC F01N 1/08 (2006.01) A device for reducing the loss of fresh charge and noise in the exhaust system of a two-stroke outboard motor engine: application. 12/25/2023. publ. 05/22/2024// Khmelitsky K. E., Pokusaev M. N. (In Russ.)
10. Rudenko M.F., Tretyak L.P., Grivina V.V., Shipulina Yu.V. *Modelirovaniye ekologicheskoy effektivnosti vnedreniya gelioenergeticheskikh kompleksov dl'a proizvodstva teploy* [Modeling the environmental efficiency of the introduction of solar energy complexes for heat production]. Bulletin of the AGTU.Ser.: Management, Computer Engineering and Informatics. — 2016. — No.2. — Pp. 73 — 78.
11. Outboard Motor with Exhaust Gas Emission into the Atmosphere. URL: <https://quincylloopperracing.us/subpage40.html> (accessed 06/23/2024).
12. Kuzenkov A.I. *Analiz sovremennogo sostoyaniya skorostnogo passazhirskogo flota i predlozheniya po razvitiyu skorostnykh sudov povyshennoy morekhodnosti* [Analysis of the current state of the high-speed passenger fleet and proposals for the development of high-speed vessels of increased seaworthiness]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2020. — No. 60 — 61. — Pp. 49 — 55. — EDN DCGVAG.
13. Pokusaev M.N., Khmelitsky K.E., Khmelitskaya A.A., Rudenko M.F., Kadin A.A., Klochkova G.G. *Izmenenie konstruktssii malogo opytovogo basseyna dl'a kompleksnykh ispytaniy podvesnykh lodochnykh motorov* [Changing the design of a small experimental pool for complex tests of outboard motors]. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser: Marine Engineering and Technology. — 2022. — № 4. — Pp. 19 — 26. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-4-19-26. EDN ARGWHP.
14. Technical Regulation of the Customs Union TR TS 026/2012 'On the Safety of Small-Sized Vessels' (adopted by decision of the Council of the Eurasian Economic Commission on 15 June 2012, No. 33). Article 5.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.12.073.243.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЙ В ПРОИЗВОЛЬНЫХ ТОЧКАХ СУДНА НА ОСНОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ В УСЛОВИЯХ НЕРЕГУЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Д.А. Альбаев, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

В статье рассматривается определение ускорений в различных точках судна от действия нелинейных сил второго порядка на основании трехмерной потенциальной теории в условиях нерегулярного волнения. Для их определения используется спектральный метод и ускорения, ранее вычисленные на регулярном волнении. Проводится исследование влияния на максимальные значения ускорений изменения курсового угла и скорости хода. Расчеты ускорений приводятся для различных судов. Показано значительное влияние нелинейных сил на горизонтальные и вертикальные ускорения на волнении 7, 8 при расположении судна лагом и необходимость его учета.

Ключевые слова: супергармонический резонанс, ускорения, нелинейные силы, метод малого параметра, функция Грина, трехмерная потенциальная теория.

DETERMINATION OF ACCELERATIONS AT ARBITRARY POINTS OF A SHIP BASED ON NONLINEAR THEORY IN IRREGULAR WAVES

V.Yu. Semenova, DSc, professor, St. Petersburg state marine technical university, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

D.A. Al'baev, senior lecturer, St. Petersburg state marine technical university, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

The article discusses the determination of accelerations at various points of the ship from the action of second-order nonlinear forces on the basis of three-dimensional potential theory in conditions of irregular waves. To determine them, the spectral method and accelerations previously calculated for regular waves are used. A study is carried out of the influence of changes in heading angle and speed on the maximum values of acceleration. Acceleration calculations are provided for various ships. The significant influence of nonlinear forces on horizontal and vertical accelerations at beam waves 7, 8 and the need to take it into account is shown.

Keywords: superharmonic resonance, accelerations, nonlinear forces, small parameter method, Green's function, three-dimensional potential theory.

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные и поперечные составляющие ускорения на нерегулярном волнении в условиях мелководья с учетом влияния нелинейных сил второго порядка были определены в работе Со Чжо Ту [10] на основании двумерной теории. Было показано значительное воздействие нелинейных сил на ускорения при увеличении балльности волнения и уменьшении относительной глубины. В работах [4 — 9] были определены различные категории нелинейных сил на основании применения трехмерной потенциальной теории и метода малого параметра. В настоящей работе проводится определение ускорений в произвольных точках судна с учетом данных нелинейных сил в условиях нерегулярного волнения.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Линеаризованные горизонтальные и вертикальные ускорения произвольной точки судна могут быть определены аналогично амплитудам качки:

$$\begin{aligned} S_{\xi_A}(\omega) &= |\ddot{\xi}_{m_A}^*/a_w|^2 S_{\zeta_w}(\omega); \\ S_{\eta_A}(\omega) &= |\ddot{\eta}_{m_A}^*/a_w|^2 S_{\zeta_w}(\omega); \end{aligned} \quad (1)$$

$$S_{\zeta_A}(\omega) = |\ddot{\zeta}_{m_A}^*/a_w|^2 S_{\zeta_w}(\omega).$$

Здесь $\ddot{\xi}_{m_A}^*/a_w = \ddot{\xi}_{m_A}^{(1)}/a_w + \ddot{\xi}_{m_A}^{(2)}/a_w$; $\ddot{\eta}_{m_A}^*/a_w = \ddot{\eta}_{m_A}^{(1)}/a_w + \ddot{\eta}_{m_A}^{(2)}/a_w$; $\ddot{\zeta}_{m_A}^*/a_w = \ddot{\zeta}_{m_A}^{(1)}/a_w + \ddot{\zeta}_{m_A}^{(2)}/a_w$.

Составляющие ускорений первого и второго порядка определяются на основании работы [1].

В качестве спектра ординат волнения $S_{\zeta_w}(\omega)$ для бесконечно глубокой жидкости используется спектр Вознесенского-Нецветова [10]:

$$S_{\zeta_w}(\omega) = \frac{9,43}{\omega} 0,0358 h_3^2 ((0,777\bar{\omega})/\omega)^6 e^{-1,5((0,777\bar{\omega})/\omega)^4}. \quad (2)$$

Спектр уклонов волнения:

$$S_{\alpha}(\omega) = (\omega^2/g)^2 S_{\zeta_w}(\omega) \cdot (180/\pi)^2. \quad (3)$$

Псевдоспектры ускорений вычисляются с помощью выражений [5]:

$$D_{\xi_A}^{\varepsilon} = \int_0^{\infty} S_{\xi_A}^{\varepsilon}(\omega) d\omega; \quad D_{\eta_A}^{\varepsilon} = \int_0^{\infty} S_{\eta_A}^{\varepsilon}(\omega) d\omega; \quad D_{\zeta_A}^{\varepsilon} = \int_0^{\infty} S_{\zeta_A}^{\varepsilon}(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Зная дисперсии и используя закон распределения Рэля, можно вычислить максимальные амплитуды и ускорения с учетом нелинейных факторов [2]:

$$a_{\xi_{\max}} = 3,25\sqrt{D_{\xi_A}^{\varepsilon}}; \quad a_{\eta_{\max}} = 3,25\sqrt{D_{\eta_A}^{\varepsilon}}; \quad a_{\zeta_{\max}} = 3,25\sqrt{D_{\zeta_A}^{\varepsilon}}. \quad (5)$$

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основании изложенного метода была разработана программа, реализующая определение ускорений на нерегулярном волнении.

Все расчеты ускорений проводились для четырех судов, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики судов							
Тип/Название судна	L	B	T	δ	α	h_0	Q
Лихтеровоз «Алексей Косыгин»	232	32	10,6	0,57	0,82	3,99	970
Балкер «Капитан Панфилов»	134	20,6	9,4	0,78	0,88	1,45	766
Лесовоз «Николай Новиков»	140	21	8,68	0,74	0,83	2,31	998
Сухогруз «Новгород»	138	20,6	9	0,68	0,79	1,00	952

Здесь Q — количество панелей разбиения судна.

2.1. Анализ результатов расчета ускорений на нерегулярном волнении

Расчеты ускорений на нерегулярном волнении выполнялись для трех точек каждого судна: на носовом перпендикуляре ($L/2$; 0; Н-Т), на правом борту (0; $B/2$; Н-Т) и в точке предполагаемого расположения рубки ($L/4$; $B/4$; Н-Т). Расчеты для каждого судна выполнялись для четырех курсовых углов: 60, 90, 135, 180 и двух скоростей: нулевой и расчетной. На рис. 1 — 33 приведены результаты расчетов трех составляющих ускорений в долях от ускорения g в зависимости от балльности. Все расчеты выполнялись при изменении балльности от 4 до 8. При этом рассчитывались максимальные составляющие ускорений. Все ускорения на графиках приведены в долях от g .

Результаты расчетов ускорений на нерегулярном волнении для курсового угла $\beta=60$ и нулевой скорости, проведенные для всех четырех судов, показали, что значения продольных составляющих ускорений возрастают для всех судов при увеличении балльности, но не превышают 0,2 g . Расчеты по нелинейной теории совпадают с расчетами по линейной теории. Поперечные составляющие ускорений также возрастают в зависимости от балльности и на 8-балльном волнении не превышают 0,4 g . Влияние нелинейных сил отличается для некоторых судов на 7, 8 баллах, но не превышает 5 %. Максимальные значения вертикальных составляющих ускорения не превышают 0,5 g . При расчете данных ускорений наиболее заметно проявление влияния нелинейных сил. Так, для сухогруза «Новгород» в точке на правом борту при 8-балльном волнении оно достигает 25 %.

Результаты расчетов максимальных ускорений для случая $\beta=90$ и нулевой скорости хода показали (рис. 1 — 9), что продольные составляющие ускорений при расположении судна лагом незначительные и не превышают 0,03 g . Максимальные значения поперечных составляющих ускорений не превышают 0,5 g на 8-балльном волнении. При расположении судов лагом и без хода увеличивается влияние нелинейных факторов, которое может достигать 20 % во всех точках.

Вертикальные составляющие ускорений не превышают 0,4 g на волнении 8 баллов. Влияние нелинейных сил проявляется уже на 6-балльном волнении и становится максимальным на 8-балльном, достигая в ряде случаев 25 %.

Результаты расчетов на косом встречном волнении $\beta=135$ и нулевой скорости хода показали, что продольные составляющие ускорений не превышают 0,2 g для всех рассмотренных судов. Как и в предыдущих случаях, расчеты по нелинейной теории для этих составляющих совпадают с расчетами по линейной.

Максимальные значения поперечных составляющих ускорений не превышают на 135 градусах 0,3 g . Влияние нелинейных сил второго порядка мало и не превышает 3 %.

Максимальные вертикальные ускорения имеют место в точке на носовом перпендикуляре, но не превышают 0,4 g . Влияние нелинейных сил на данные составляющие имеет место на волнении 7, 8 баллов, но не превышает 10 %.

Расчеты максимальных ускорений на встречном волнении $\beta=180$ и нулевой скорости показали, что на встречном волнении продольные составляющие ускорения достигают наибольших значений по сравнению со всеми другими курсовыми углами, но не превышают 0,25 g . Вертикальные составляющие ускорений имеют место в точках на носовых перпендикулярах, но не превышают 0,35 g . Влияние нелинейных сил на ускорения на встречном волнении проявляется далеко не для всех судов и не превышает 10 % для волнения большой балльности.

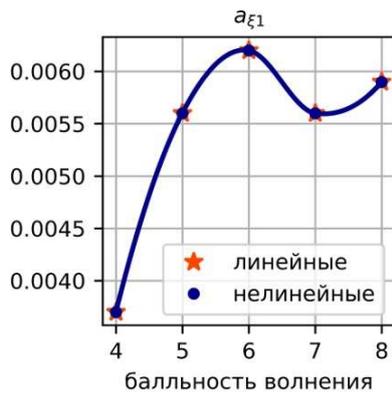


Рис. 1 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

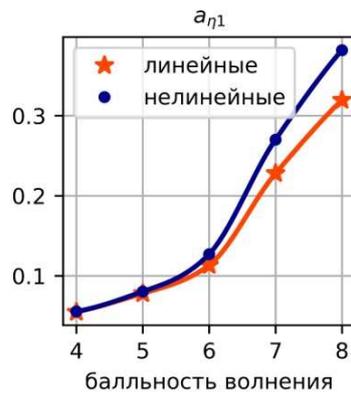


Рис. 2 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

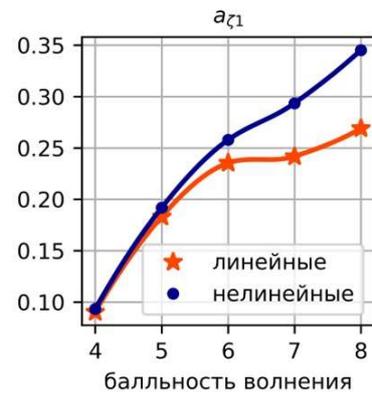


Рис. 3 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

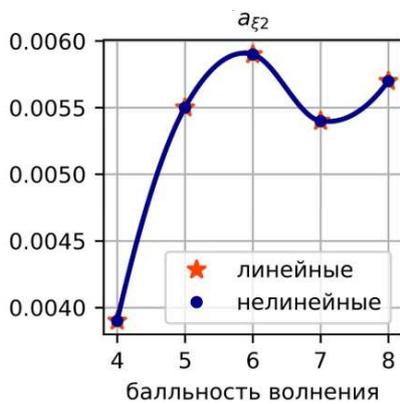


Рис. 4 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

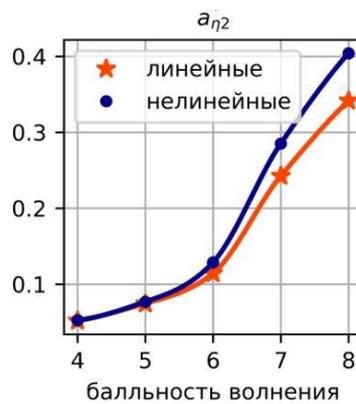


Рис. 5 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

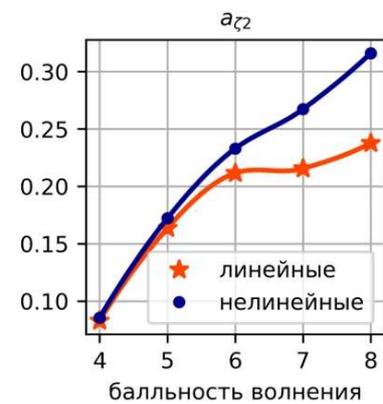


Рис. 6 Вертикальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

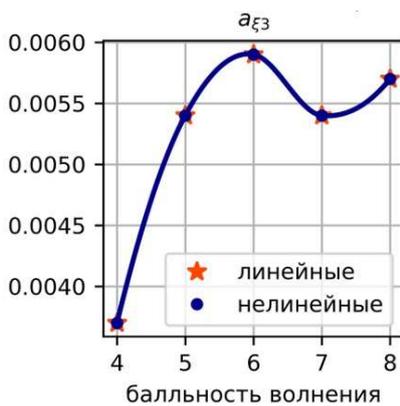


Рис. 7 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

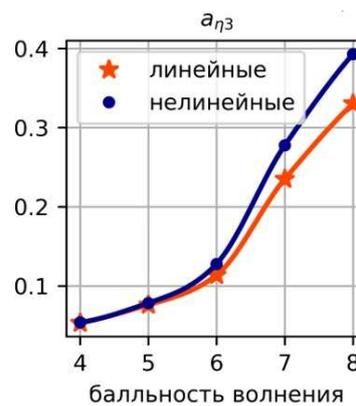


Рис. 8 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

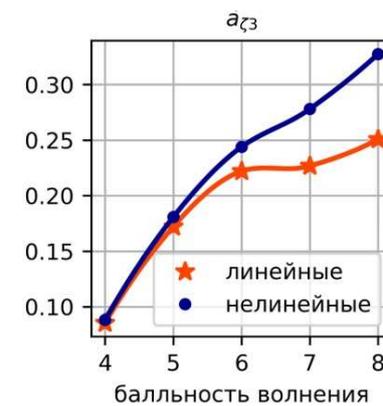


Рис. 9 Вертикальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90,0, u_s = 0,0$)

Были выполнены расчеты максимальных ускорений при сочетании различных курсовых углов и скоростей. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 10 — 33.

Анализ результатов расчетов продольных составляющих ускорений при качке судов на курсовом угле $\beta = 60$ и различных расчетных скоростях показал, что их максимальные значения не превышают $0,14g$ на волнении 8 баллов. На волнении 6 баллов данная величина меньше $0,1g$ (рис. 10, 13, 16). Поперечные составляющие ускорений не превышают $0,35g$. Влияние нелинейных сил проявляется, так же, как и при отсутствии скорости, на волнении 7, 8 баллов и не превышает 5 % (рис. 11, 14, 17).

Вертикальные составляющие ускорений не превышают 0,18g на 8-балльном волнении. При этом такие значения имеют место в точках на носовых перпендикулярах. Влияние нелинейных сил может достигать 20 — 25 % также на волнении 7, 8 баллов (рис. 12, 15, 18).

При движении судов лагом к волнению, продольные составляющие ускорений пренебрежимо малы и не превышают 0,025g. Поперечные составляющие ускорений не превышают 0,35g. В ряде случаев отмечается значительное влияние нелинейных сил на волнении 7, 8 баллов, которое может достигать 20 %.

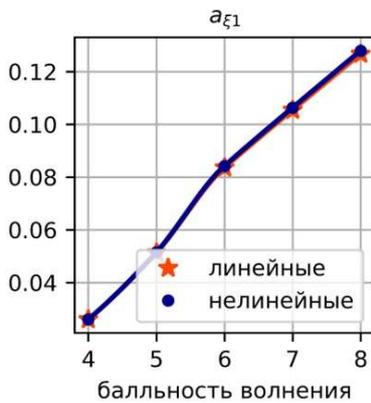


Рис. 10 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

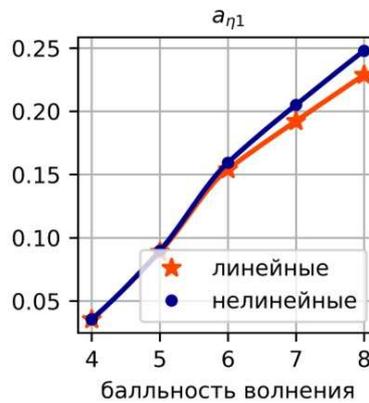


Рис. 11 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

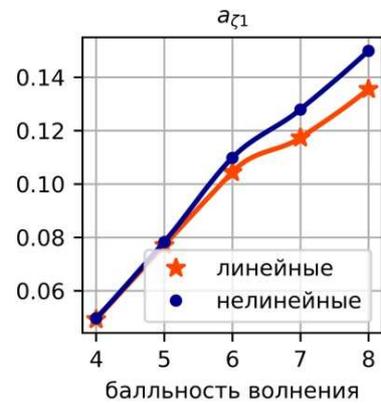


Рис. 12 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

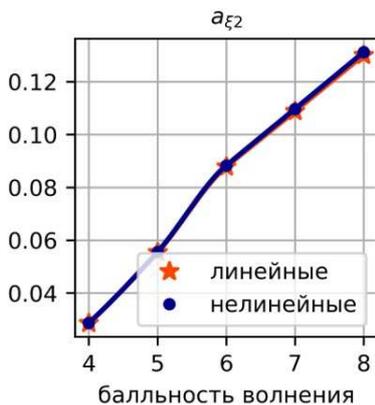


Рис. 13 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

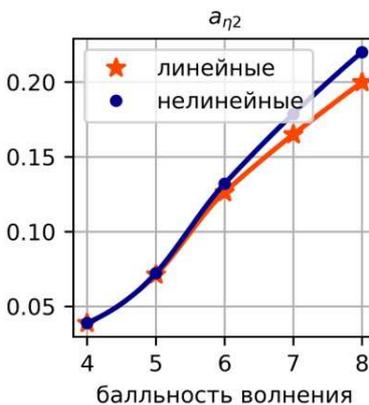


Рис. 14 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

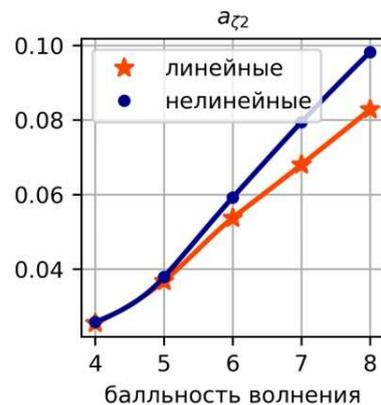


Рис. 15 Вертикальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

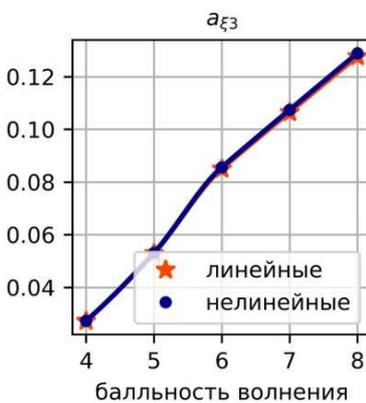


Рис. 16 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

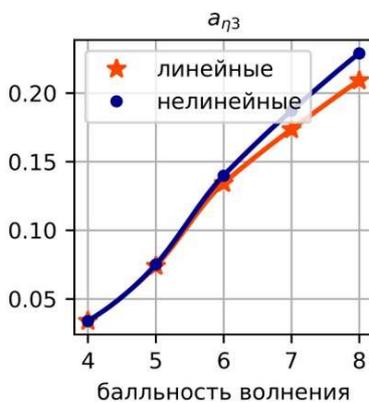


Рис. 17 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

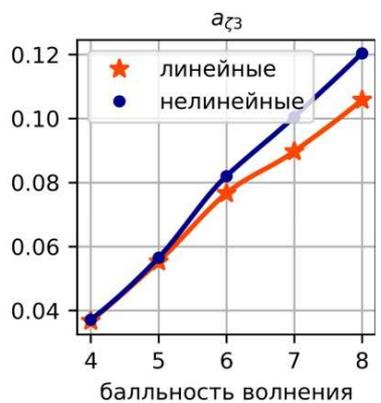


Рис. 18 Вертикальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60,0, u_s = 15,5$)

Вертикальные составляющие ускорений также не превышают $0,35g$. Но при расположении лагом на нерегулярном волнении отмечается максимальное влияние нелинейных сил, которое составляет от 25 до 40 % и имеет место на волнении 6, 7, 8 баллов.

Результаты расчетов на косом встречном волнении приведены на рис. 19 — 27. Анализ этих расчетов показал, что возрастают максимальные значения продольных составляющих ускорения и на 8-балльном волнении не превышают $0,25g$. Поперечные составляющие ускорений не превышают $0,2g$, что меньше, чем при отсутствии скорости хода. Влияние нелинейных сил не превышает 5 % или отсутствует совсем.

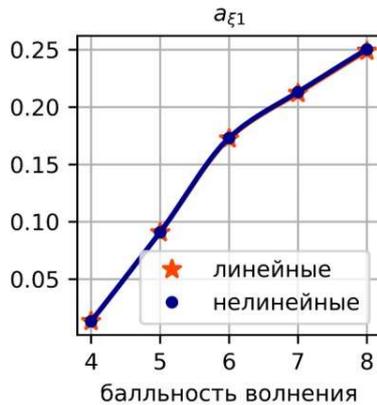


Рис. 19 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

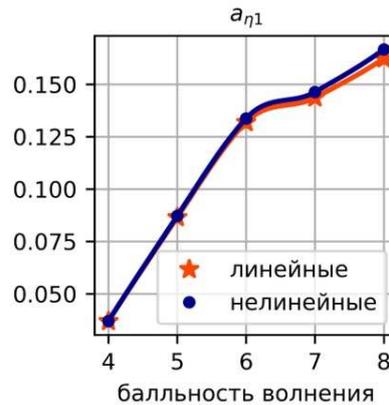


Рис. 20 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

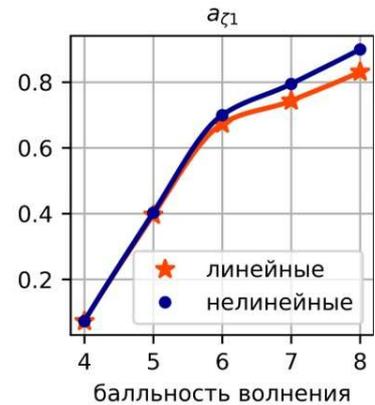


Рис. 21 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

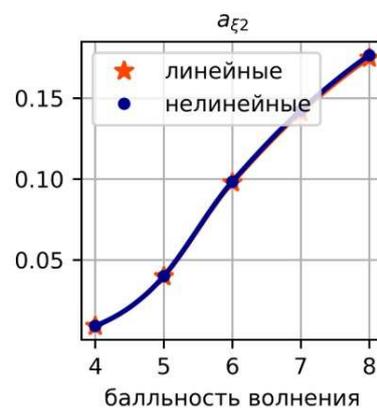


Рис. 22 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

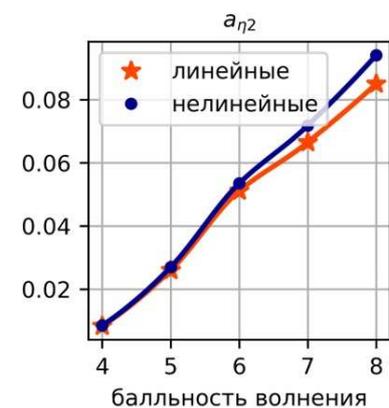


Рис. 23 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

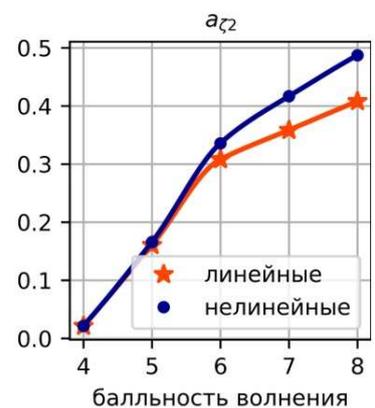


Рис. 24 Вертикальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

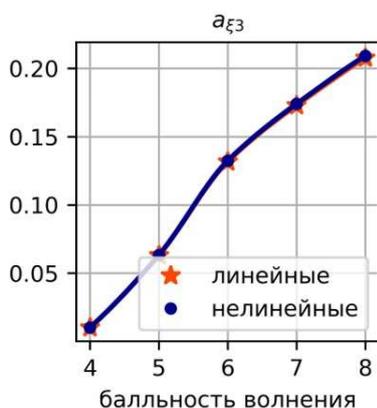


Рис. 25 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

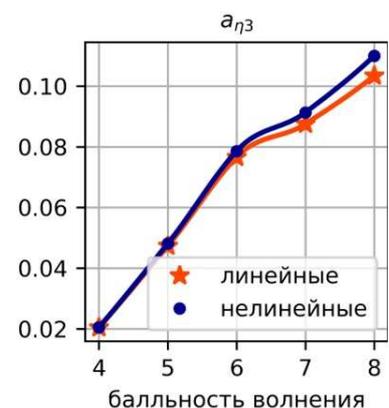


Рис. 26 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

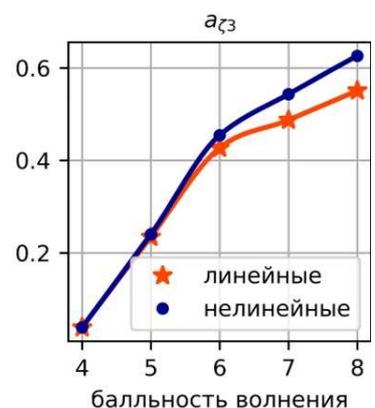


Рис. 27 Вертикальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 135,0$, $u_s = 17,0$)

Максимальные значения вертикальных составляющих ускорений могут быть до $0,9g$ в точках на носовых перпендикулярах. В других точках не более $0,6g$. Влияние нелинейных сил максимальным образом проявляется в точках на правом борту и в точке расположения рубки и может достигать 20 %.

Максимальные значения продольных и вертикальных составляющих ускорений имеют место при движении на встречном волнении (рис. 28 — 33). При этом максимальные значения продольных составляющих не превышают $0,35g$. Максимальные значения вертикальных составляющих не превышают $1,1g$ в точке на носовом перпендикуляре, где отмечается максимальное влияние амплитуд килевой качки. Влияние нелинейных сил имеет место на вертикальные составляющие ускорений в точках на правом борту и в месте расположения рубки и может достигать от 15 до 20 %.

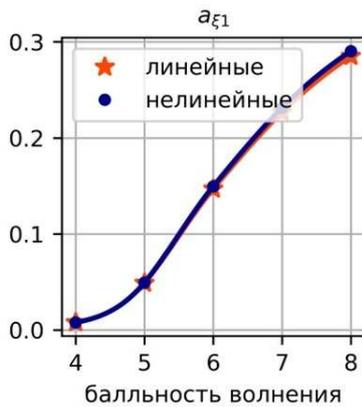


Рис. 28 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 180,0, u_s = 14,0$)

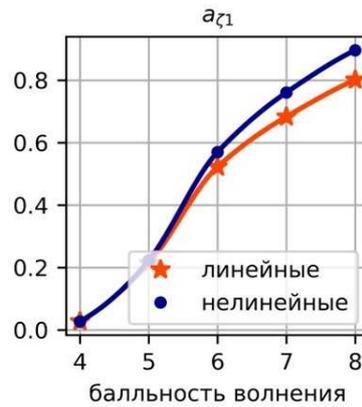


Рис. 29 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 180,0, u_s = 14,0$)

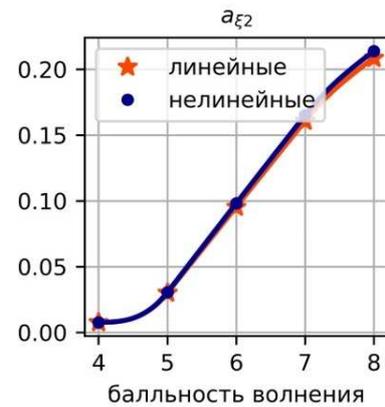


Рис. 30 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 180,0, u_s = 14,0$)

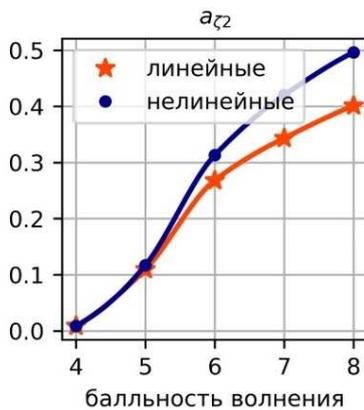


Рис. 31 Вертикальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 180,0, u_s = 14,0$)

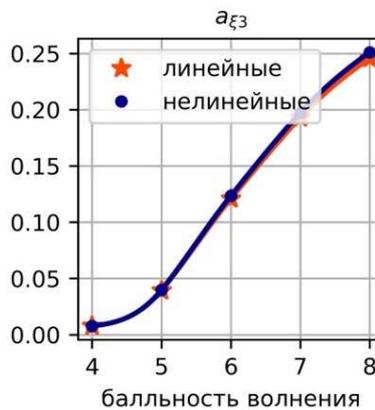


Рис. 32 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 180,0, u_s = 14,0$)

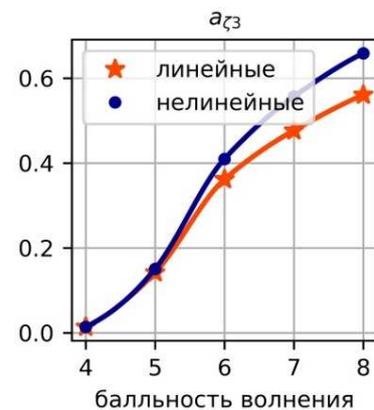


Рис. 33 Вертикальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 180,0, u_s = 14,0$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

В условиях нерегулярного волнения наибольшие амплитуды поперечных и вертикальных составляющих ускорения имеют место при расположении судна лагом без скорости хода в точках на борту и в зоне расположения рубки.

Наибольшие продольные составляющие ускорения имеют место на встречном волнении при наличии скорости хода в точках на носовом и кормовом перпендикулярах.

Наибольшее влияние нелинейных сил проявляется на поперечные и вертикальные составляющие ускорений на волнении 6 — 8 баллов и может достигать 25 % при расположении судна лагом.

На продольные составляющие ускорений нелинейные силы не оказывают практически никакого влияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбаев Д.А. Определение ускорений в различных точках судна, вызываемых нелинейной качкой на регулярном волнении в условиях мелководья / Д.А. Альбаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 4, т. 2. — С. 93 — 98.
2. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля / В.В. Луговский. — Л.: Судостроение, 1966.
3. Семенова В.Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов: дисс. ... д-ра техн. наук / В.Ю. Семенова; СПбГМТУ. — СПб., 2005.
4. Семенова В.Ю. Определение инерционно-демпфирующих сил второго порядка малости, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 2 (44), т. 1. — С. 36 — 44.
5. Семенова В.Ю. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 4-1 (40). — С. 63 — 69.
6. Семенова В.Ю. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 2-2 (48). — С. 11 — 18.
7. Семенова В.Ю. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2, т. 3. — С. 20 — 28.
8. Семенова В.Ю. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4, т. 2. — С. 21 — 31.
9. Семенова В.Ю. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении // В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев / Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 2, ч. 2. — С. 125 — 133.
10. Со Чжо Ту. Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье: дисс. ... канд. техн. наук / Со Чжо Ту; СПбГМТУ. СПб., 2014.

REFERENCES

1. Al'baev D.A. *Opreddenie uskoreniy v razlichnykh tochkakh sudna, vyzyvayemykh nelineynoy kachkoy na regulyarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya* [Determination of accelerations at various points of a ship caused by nonlinear rolling on regular waves in shallow water conditions] *Morskiye intellektual'nye tekhnologii*. — 2023. — № 4, t. 2. — Ss. 93 — 98.
2. Lugovskiy V.V. *Nelineynye zadachi morekhodnosti korablya* [Nonlinear problems of ship seaworthiness]. — L.: Sudostroenie, 1966.
3. Semenova V. Yu. *Razrabotka metoda rashcheta nelineynoy kachki sudov* [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships]: diss. ... dokt. tekhn. nauk / SPBGMTU. — St. Petersburg, 2005.
4. Semenova V.Yu., Al'bayev D.A. *Opreddeniye inertsionno-dempfiruyushchikh sil vtorogo poryadka malosti, vznikayushchikh pri kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsial'noy teorii* [Determination of the second order inertial-damping forces arising during the oscillations of the ship based on the three-dimensional potential theory]. *Morskiye intellektual'nye tekhnologii*. — 2019. — № 2 (44), t. 1. — Ss. 36 — 44.
5. Semenova V.Yu., Al'bayev D.A. *Opreddeniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vertikal'noy kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsial'noy teorii* [Determination of nonlinear forces of the second order arising during the heaving of a ship, based on three-dimensional potential theory]. *Morskiye intellektual'nye tekhnologii*. — 2019. — № 4-1 (40). — Ss. 63 — 69.
6. Semenova V.Yu., Al'bayev D.A. *Opreddeniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri poperechno-gorizontal'nykh i bortovykh kolebaniyakh sudov na osnovanii trekhmernoy potentsial'noy teorii*. *Morskiye intellektual'nye tekhnologii* [Determination of nonlinear second-order forces arising from horizontal and rolling motions of ships based on three-dimensional potential theory]. — 2020. — № 2-2 (48). — Ss. 11 — 18.
7. Semenova V.Yu., Al'bayev D.A. *Opreddeniye nelineynykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystvuyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoy teorii* [The determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory]. *Morskiye intellektual'nye tekhnologii*. — 2021. — № 2, t. 3. — Ss. 20 — 28.
8. Semenova V.Yu., Al'bayev D.A. *Opreddeniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdel'nykh vidov kachki sudna* [Determination of nonlinear forces of the second order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions]. *Morskiye intellektual'nye tekhnologii*. — 2021. — № 4, t. 2. — Ss. 21 — 31.
9. Semenova V.Yu., Al'bayev D.A. *Chislennoye opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri vzaimodeystvii otdel'nykh vidov kachki sudna na regulyarnom volnenii* [Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves]. *Morskiye intellektual'nye tekhnologii*. — 2022. — № 2, ch. 2. — Ss. 125 — 133.
10. So Chzho Tu. *Razrabotka metoda rashcheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, vznikayushchikh pri kachke sudna na melkovodye* [Development of the method for calculating second-order nonlinear forces due to ship's motions in shallow water]: diss. ... kand. tekhn. nauk / SPBGMTU. — St. Petersburg, 2014.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 621.64, 678.07

РАЗРАБОТКА ПРАВИЛ РЕГИСТРА ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

В.В. Платонов, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

Н.Н. Федонюк, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: fednik46@yahoo.com

М.С. Бойко, канд. техн. наук, начальник отдела, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

С.А. Сотсков, главный специалист, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: sotskov.sa@rs-class.org

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в промышленности, строительстве и транспорте. Одной из относительно новых областей применения ПКМ является создание конструкций, эксплуатируемых при криогенных температурах. К таким конструкциям, в первую очередь, следует отнести баки для жидкого ракетного топлива, элементы конструкций космических аппаратов, ракет и спутников. В связи с этим перспективным может являться применение ПКМ в конструкциях емкостей для хранения и транспортировки сжиженного природного газа на судах-газовозах. Для применения таких емкостей на перспективных судах-газовозах следует разработать специальные требования Правил Российского морского регистра судоходства к ПКМ для конструкций емкостей. Для этого необходимо выполнить анализ научно-технической литературы, описывающей опыт применения ПКМ для конструкций, работающих при криогенной температуре, провести комплекс испытаний. В работе формализованы особенности изменения характеристик ПКМ при воздействии криогенной температуры на основе опыта их практического применения и лабораторных исследований. В результате выявлены существенные характеристики ПКМ, требования к которым необходимо учесть в нормативных документах, приведена структура новых требований Правил по применению ПКМ для емкостей для транспортировки сжиженного природного газа.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, сжиженный природный газ, емкости для хранения СПГ, Правила РС.

DEVELOPMENT OF THE REGISTER RULES TO THE APPLICATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF LIQUEFIED NATURAL GAS TANKS

V.V. Platonov, PhD, head of laboratory, Krylov State Research Centre, Saint Petersburg, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru
N.N. Fedonyuk, PhD, leading researcher, Krylov State Research Centre, Saint Petersburg, e-mail: fednik46@yahoo.com
M.S. Boyko, PhD, head of department, Russian Maritime Register of Shipping, Saint Petersburg, e-mail: boyko.ms@rs-class.org
S.A. Sotskov, principal specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, Saint Petersburg, e-mail: sotskov.sa@rs-class.org

Polymer composite materials (PCM) are widely accepted in general industry applications, civil construction and transportation of goods. One of the relatively new areas where PCM become accepted are the structures subjected to cryogenic temperatures. The examples of such structures are primarily as follows: tanks for liquid rocket fuel, structural elements of spacecraft, rockets and satellites. In relation to that, the promising area of PCM application would be the construction of ship tanks intended for the storage and transportation of liquefied natural gas tanks. To facilitate the application of such tanks on future gas tankers it is necessary to develop the specific Russian Maritime Register of Shipping rules that would cover the application of such materials. In order to do that it is necessary to perform the analysis of research papers that cover the practical application of PCM under cryogenic temperatures, and to perform laboratory tests. The paper gives the specifics of PCM characteristics behavior under cryo temperatures based on practical application and results of such tests. As a result, the most critical PCM characteristics are identified that should be covered in rule requirements. The structure of new rule requirements have been developed and presented in the paper.

Keywords: *polymer composite materials, liquefied natural gas, tanks for LNG, RS Rules.*

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются во многих отраслях промышленности: транспортном машиностроении, авиации, ракетной технике, судостроении, ветроэнергетике. В судостроении конструкционные ПКМ применяются при изготовлении корпусов и надстроек кораблей и судов, а также элементов судового машиностроения и систем: гребные валы, винты, виброизолирующие соединительные муфты, опорные фундаменты, трубы, арматура и т. д. Постоянное увеличение объемов применения ПКМ обусловлено целым рядом их преимуществ по сравнению с традиционными металлическими материалами:

- низкая плотность;
- высокие удельные прочностные и жесткостные характеристики;
- коррозионная стойкость;
- низкие теплопроводность и термическое расширение;
- повышенные вибродемпфирующие характеристики.

Возможность создания из ПКМ полифункциональных конструкций на основе разных армирующих материалов, связующих и наполнителей позволяет обеспечить звуко-радиопоглощение (или звуко-радиопрозрачность), а также еще больше повысить демпфирующие свойства. Эксплуатация композитных конструкций и изделий позволяет заметно снизить затраты на их обслуживание и содержание, что делает применение ПКМ экономически выгодным, если учитывать жизненный цикл объекта, несмотря на более высокие первоначальные затраты на их изготовление.

Одной из относительно новых областей применения ПКМ является создание конструкций, эксплуатируемых при криогенных температурах. К таким конструкциям, в первую очередь, следует отнести баки для жидкого ракетного топлива, элементы конструкций космических аппаратов, ракет и спутников. В связи с этим перспективным является применение ПКМ в конструкциях емкостей для хранения и морской транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) на судах-газовозах.

В настоящее время Правила Российского морского регистра судоходства (РС) [1] допускают применение ПКМ в конструкциях емкостей для хранения СПГ, но специальных требований к их использованию в этих конструкциях не содержат. На ПКМ в данном случае распространяются требования к неметаллическим материалам Кодекса МКГ, приведенные в дополнении 4 [2]. Требования этого дополнения содержат преимущественно перечень необходимых испытаний неметаллических материалов, применяемых в конструкциях емкостей для хранения СПГ, который ориентирован на использование различных стандартов ISO.

Поэтому целью настоящей статьи является разработка специальных требований РС к применению ПКМ при изготовлении емкостей для хранения СПГ, предназначенных для включения в Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом [1].

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Интерес к использованию ПКМ, работающих при температурах ниже -150 °С, проявляют во многих странах. Наиболее широкое применение ПКМ нашло при изготовлении резервуаров жидкого топлива космических ракет, а также конструкций самих ракет, спутников и других элементов космической техники (антенны, экраны, корпуса телескопов и т. д.).

Так, в работе [3] приведены результаты разработки компанией McDonnell Douglas (США) нескольких типов топливных резервуаров для жидкого водорода и жидкого кислорода из углепластика, что обеспечивает значительное снижение их веса по сравнению с резервуарами из алюминиевых сплавов. Один из композитных резервуаров DC-XA имеет диаметр 2,43 м и длину 4,88 м, изготовлен из углепластика на основе углеродных волокон марки IM7/8552 фирмы Hexcel Co (США) и эпоксидного связующего (рис. 1). Он имеет внутри легкую внутреннюю изоляцию, и его изготовление производилось методом автоматизированной выкладки волокон (AFP) [4]. Вес резервуара на 33 % меньше по сравнению с весом аналога из алюминивно-литиевого сплава [3].



Рис. 1 Топливный резервуар DC-XA для жидкого водорода компании McDonnell Douglas (США)

Активная позиция NASA способствовала разработке целого ряда композитных резервуаров трехслойной конструкции, состоящих из несущих углепластиковых слоев на основе углеродных волокон марки IM7/977-2 (Hexcel Co) и эпоксидного связующего, а в качестве заполнителя использовался сотовый наполнитель Kogex (рис. 2).

В резервуаре, разработанном компанией Northrop Grumman (США), для обеспечения герметичности резервуара от утечки водорода была использована алюминиевая фольга, слой которой располагался между внутренним несущим слоем и сотовым наполнителем. Одна из трехслойных конструкций резервуара, длиной 4,8 м и диаметром 1,8 м, успешно прошла все испытания и была запущена в серийное производство (рис. 3).

Для изготовления резервуаров, помимо метода автоматизированной выкладки волокон (AFP), применяется технология с использованием препрегов на основе углеродного ровинга и эпоксидного связующего марки Cytac CYCOM 5320-1 компании Cytac (США) [4]. Этот препрег позволяет обходиться без дорогостоящего автоклавного оборудования благодаря применению нового типа эпоксидной смолы, что дает возможность проводить отверждение при относительно низкой температуре, где требуется относительно недорогое оборудование, в том числе с применением вакуумного мешка аналогично технологии VARTM.

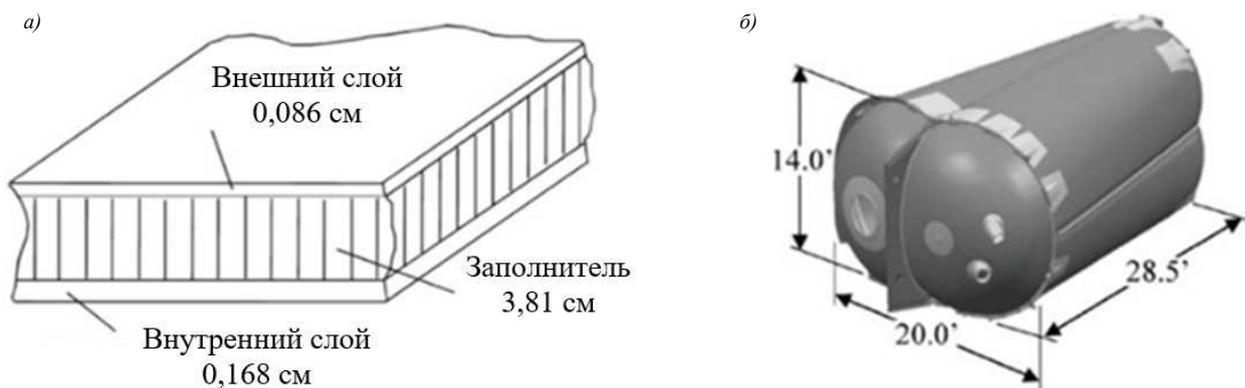


Рис. 2 Криогенный резервуар трехслойной конструкции компании Lockheed Martin Space Systems (США):
а) — структура обшивки; б) — внешний вид



Рис. 3 Криогенный резервуар трехслойной конструкции компании Northrop Grumman (США)

Самый большой криогенный резервуар для жидкого кислорода был разработан и изготовлен американской компанией Space X для межпланетной транспортной системы. Резервуар имеет диаметр и длину 12 м и успешно прошел гидравлические испытания в 2016 году. Для его изготовления применялся углеродный ровинг T800 фирмы Toray SA (Япония) (рис. 4) [4].



Рис. 4 Композитный криогенный резервуар компании Space X (США)

Проведенный анализ информации говорит о том, что ПКМ, в основном углепластики, широко применяются в криогенных резервуарах топлива ракет, а также в других конструкциях и изделиях космической техники.

В судостроении использование ПКМ в емкостях для хранения и транспортировки СПГ рассматривается в настоящее время только на уровне проектов. Исключение составляют пенопласты, являющиеся термопластичными материалами, которые в больших объемах применяются в этих емкостях в качестве теплоизоляции.

В качестве одного из таких проектов можно привести опубликованное в [5] решение фирмы Babcock Schulte Energy (США) об установке на своем судне снабжения СПГ топливных баков из композита (рис. 5). Баки в виде оболочек вращения будут хранить сжатый выпарной газ из емкостей СПГ и выпарной газ от грузовых операций и подавать его в качестве топлива к двухтопливным двигателям судна.



Рис. 5 Судно снабжения СПГ фирмы Babcock Schulte Energy (США)

Второй проект, который стоит рассмотреть, связан с разработкой проекта газовоза, выполненного полностью из ПКМ [6]. В качестве прототипа был выбран газовоз «Coral Methane» грузоподъемностью 7500 м³. В этом проекте заслуживает внимания предложение об изготовлении емкостей для СПГ из ПКМ на основе полиэфирного стеклопластика и эпоксидного углепластика. Так как емкости цилиндрической формы на судне-прототипе не позволяют эффективно использовать пространство грузовых отсеков, в проекте рассматривались другие формы емкостей: двухцилиндрические, трехцилиндрические и призматические (рис. 6). Наиболее эффективными по занимаемому пространству являются призматические емкости: при замене цилиндрических емкостей на призматические грузоподъемность может быть увеличена с 7500 м³ до 9750 м³.

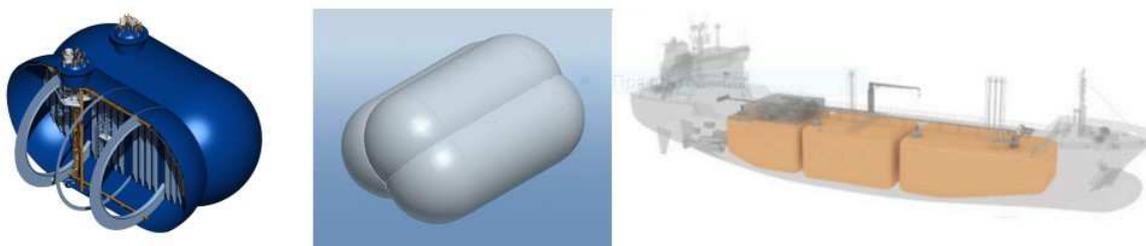


Рис. 6 Различные формы композитных емкостей для СПГ

Еще одним концептуальным проектом танкера-газовоза с вкладными танками типа «В» из ПКМ является проект 10070 [7], предложенный АО «Атомэнергомаш». В качестве материала вкладной емкости типа В был выбран углепластик. В соответствии с имеющейся в открытом доступе информацией, в рамках концептуального проекта была разработана принципиальная конструкция вкладного призматического танка из углепластика и сделаны предварительные оценки прочности и теплоизоляции конструкции танка.

Разработчиками проекта справедливо отмечен ряд преимуществ использования углепластика для изготовления конструкции танка, таких как снижение массы танка, возможность раздельного строительства танка и корпуса судна, сокращение за счет этого общего срока строительства газовоза. Особый интерес при дальнейшей проработке проекта с точки зрения его возможной практической реализации представляет конструктивное оформление первичного и вторичного барьера, расположение элементов набора внутри конструкции емкости.

Одним из преимуществ изготовления призматической вкладной емкости из металлических материалов является установка отбойных переборок, которые снижают нагрузку при слошинге. Поэтому особый научный и практический интерес представляют решения авторов проекта по снижению нагрузок от слошинга в емкости из углепластика.

В статье [8] приведены результаты исследования прочности и температурной проводимости нового теплоизоляционного блока мембранной изоляции. Блок имел трехслойную структуру, состоящую из стеклопластиковых слоев на основе тканей из волокна Е-стекла и эпоксидного связующего и среднего слоя из пенопласта низкой плотности, заключенного в композитную коробчатую структуру для обеспечения его вспенивания при заливке полимерной массы.

Композитная структура топливного бака для СПГ рассматривалась в работе [9] с целью замены конструкции с двойными стенками из нержавеющей стали. Предлагаемая конструкция бака имела однослойную обшивку из стеклопластика толщиной 15 мм и внутреннюю теплоизоляцию из пенополиуретана, защищенного изнутри также слоями стеклоткани.

Результаты этих работ показывают, что применение ПКМ в виде стеклопластика в конструкциях криогенных емкостей обеспечивает требуемые теплоизоляционные характеристики при заметном снижении веса, повышении надежности и увеличении срока эксплуатации.

Стеклопластик также применялся в качестве основного конструкционного материала при разработке новой конструкции теплоизоляционных блоков системы мембранной изоляции ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Основу разработанной конструкции емкости составляют типовые теплоизоляционные блоки, выполненные с применением стеклопластика, пенопласта и герметизирующих слоев, показанные на рис. 7 [10, 11]. Разработанные конструктивно-технологические решения проходили апробацию путем испытаний образцов материалов в заданном температурном диапазоне и макетов блоков на прочность, герметичность и теплопроводность, а также испытаний на статическую и циклическую прочность узла крепления блоков к обшивке и соединения между собой. Результаты проведенных испытаний подтвердили возможность реализации разработанных решений при создании емкостей мембранного типа для транспортировки и хранения СПГ.

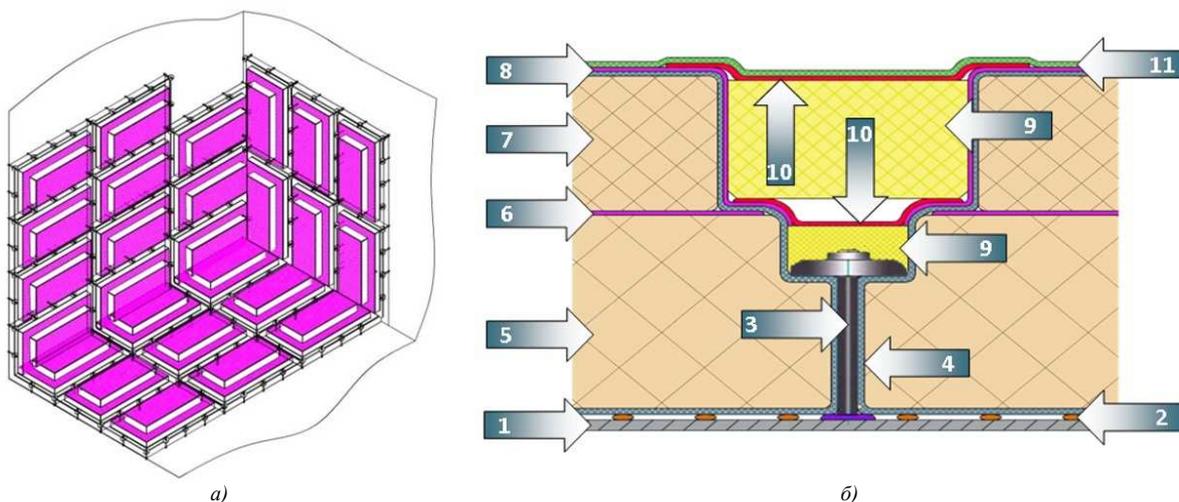


Рис. 7 Конструктивная схема емкости мембранного типа из ПКМ со снятыми первичным герметизирующим слоем и защитным слоем из стеклопластика (а) и узел соединения типовых блоков между собой и с обшивкой газовоза (б):
 1 — корпус грузового танка; 2 — выравнивающие прокладки; 3 — крепление (шпилька и прижимная планка);
 4 — корпус блока (стеклопластик); 5 — вторичная термоизоляция (пенопласт); 6 — вторичная мембрана (фольга);
 7 — первичная термоизоляция (пенопласт); 8 — первичная мембрана (фольга); 9 — закладные монтажные блоки (пенопласт);
 10 — монтажные мембраны (фольга); 11 — защитная обформовка (стеклоткань)

Выполненный на основе имеющейся информации анализ композитных конструкций и изделий, применяющихся в криогенной технике, показывает, что номенклатура этих конструкций и изделий ограничивается космической техникой. Тем не менее наблюдается интерес к созданию композитных топливных цистерн и емкостей для хранения и транспортировки СПГ. Основными ПКМ, применяющимися в этих конструкциях, являются стекло- и углепластики на основе винилэфирных и эпоксидных связующих, а также термопластов. Свойства этих материалов будут рассмотрены ниже.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработка конструкций криогенной техники из ПКМ должна опираться на результаты исследований свойств этих материалов при температурах ниже $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые относятся к области криогеники. Исследования на эту тему начали проводиться относительно давно, в 60-х годах прошлого века, и сегодня накоплен значительный по объему материал, касающийся влияния низких температур как на характеристики армирующих волокон и матрицы и их взаимодействие между собой, так и на структуру, физико-механические, химические и технологические свойства самих ПКМ.

Изменение свойств стекловолокон и полимерных связующих при понижении температуры рассмотрено в монографии [12]. Прочностные свойства стеклянных волокон зависят от состава стекла и от состояния их наружной поверхности. На поверхности волокон имеются, как известно, микродефекты, которые при нагружении растут медленнее при понижении температуры. Поэтому прочностные характеристики волокон возрастают в области криогенных температур (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики отдельных марок отечественных стекловолокон при нормальной и криогенной температурах
(d — диаметр волокна)

Марка стекловолокна	Температура	Предел прочности при растяжении, ГПа	Модуль упругости, ГПа
ВМП	+20 °C	4,28	91,0
	-196 °C	6,02	104,0
ВМ-1	+20 °C	3,62	86,3
	-196 °C	5,2	105,7
Е-стекло ($d=9$ мкм)	+20 °C	2,99	78,1
	-196 °C	4,7	82,7
Е-стекло ($d=14$ мкм)	+20 °C	2,47	75,0
	-196 °C	4,3	81,1

Углеродные волокна при воздействии криогенных температур меняют свою внутреннюю структуру и морфологию наружной поверхности, что приводит к изменению свойств при растяжении. Медленное охлаждение до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызывает усадку диаметра волокна на 3 % и его расширение в осевом направлении. Увеличивается шероховатость поверхности волокна, что приводит к повышению прочности на сдвиг на границе «волокно — эпоксидное связующее» на 30 %. Этот фактор одновременно с повышением прочности самого волокна объясняет увеличение прочностных характеристик углепластика [13].

В области криогенных температур также меняются и свойства полимерных матриц, что выражается в увеличении их упругих и прочностных характеристик. Это обусловлено тем, что при понижении температуры уменьшается подвижность молекулярных цепей, в результате чего увеличиваются силы сцепления между молекулами. Такой характер изменения свойств матриц проиллюстрирован в табл. 2 [14].

Таблица 2

Свойства эпоксидного связующего марки ЭДТ-10 при нормальной и криогенной температурах

Характеристика, размерность	Температура	
	-196 °C	+20 °C
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	145	75,0
Модуль упругости при растяжении, ГПа	8,32	3,0

Для оценки влияния криогенных температур на физико-механические характеристики ПКМ, проводились испытания образцов, в первую очередь на основные виды нагружения: изгиб, растяжение, сжатие, межслойный сдвиг. На эту тему опубликовано большое количество работ. Так, в работе [15] приведены результаты испытаний на изгиб эпоксидных стеклопластиков с разной структурой армирования (табл. 3). Как видно из табл. 3, увеличение упругих и прочностных характеристик стеклопластика может достигать при температуре $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ более, чем в 2 раза в зависимости от структуры армирования.

Таблица 3

Изгибные свойства эпоксидных стеклопластиков с разной структурой армирования при температурах 295 К и 4,2 К

№ п/п	Структура армирования	Модуль упругости, ГПа		Предел прочности, МПа	
		+22 °С	-269 °С	+22 °С	-269 °С
1	Перекрестная ($0^{\circ}/90^{\circ}$)	19	30	430	1000
2	Диагональная ($\pm 45^{\circ}$)	11	24	270	770
3	Однонаправленная (0°)	46	56	1600	3100
4	Косоугольная (45°)	16	52	150	610
5	Однонаправленная (90°)	16	45	83	450
6	Эпоксидное связующее	3,1	7,4	69	130

Аналогичные результаты испытаний по влиянию криогенной температуры на характеристики стеклопластиков при изгибе были получены в работе [16]. Испытаниям подвергались образцы на основе эпоксидного связующего марки Aradite GY 282 фирмы Huntsman (США), изготовленные методом инфузии. В качестве армирующих материалов использовались несколько видов стеклотканей из волокон Е-стекла. Результаты испытаний обобщены на рис. 8, из них следует, что прочность стеклопластиков практически не изменяется при криогенной температуре, а модуль упругости увеличивается в 1,5 раза.

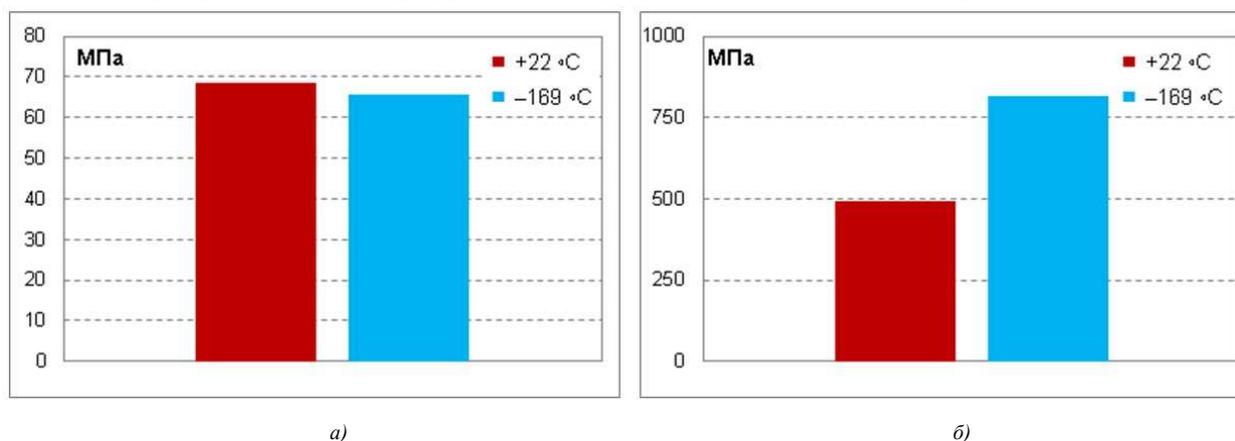


Рис. 8. Прочность (а) и модуль упругости (б) стеклопластиков при изгибе при нормальной и криогенной температурах

Большой объем публикаций посвящен исследованиям свойств углепластиков при криогенных температурах. В отчете [17] рассматриваются различные ПКМ для применения их в области хранения и транспортировки криогенных жидкостей. Исследовались два типа эпоксидных углепластиков при нормальной температуре и температуре $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$: тип 1 на основе биаксиальной ткани ($0^{\circ}/90^{\circ}$) на растяжение (рис. 9) и тип 2 на основе однонаправленной ленты на сжатие (рис. 10).

Как видно из рис. 9, снижение температуры до $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к уменьшению прочности при растяжении, а жесткость незначительно увеличивается. При испытаниях на сжатие углепластика (рис. 10) наблюдается обратная картина: прочность и модуль упругости растут с понижением температуры. По мнению авторов работы, неоднозначность поведения углепластиков при криогенной температуре связана с существенной разницей в коэффициентах термического расширения (КТР) углеродного волокна и полимерной матрицы.

Результаты исследований поведения углепластиков в условиях действия различных температур при термоциклировании приведены в [18]. Объектами исследований являлись два типа углепластиков с эпоксидной матрицей на основе однонаправленного ровинга из высокопрочных углеродных волокон T700, а также ткани из этих волокон, и ткани из высокомодульных углеродных волокон M40 фирмы Toray SA (Япония).

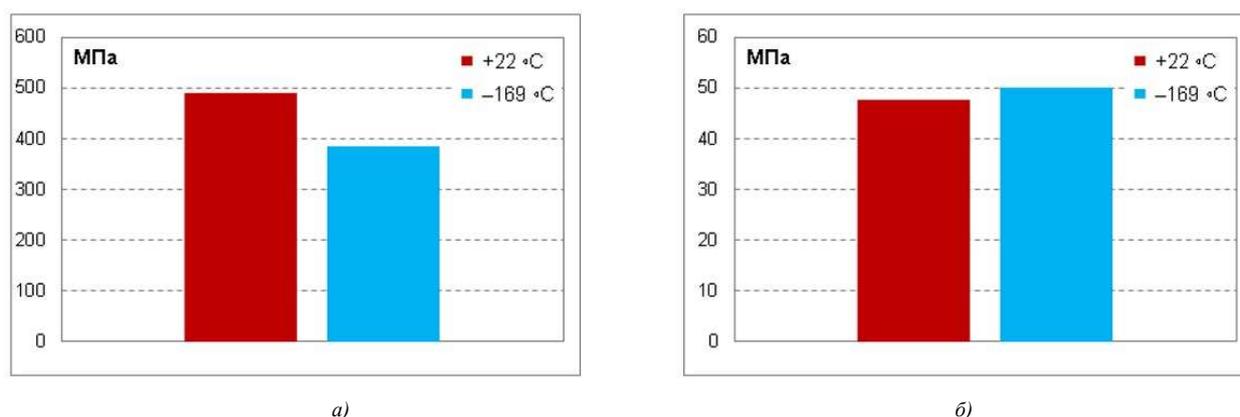


Рис. 9 Прочность (а) и модуль упругости (б) при растяжении в направлении 0° эпоксидного углепластика на основе биаксиальной ткани ($0^\circ/90^\circ$)

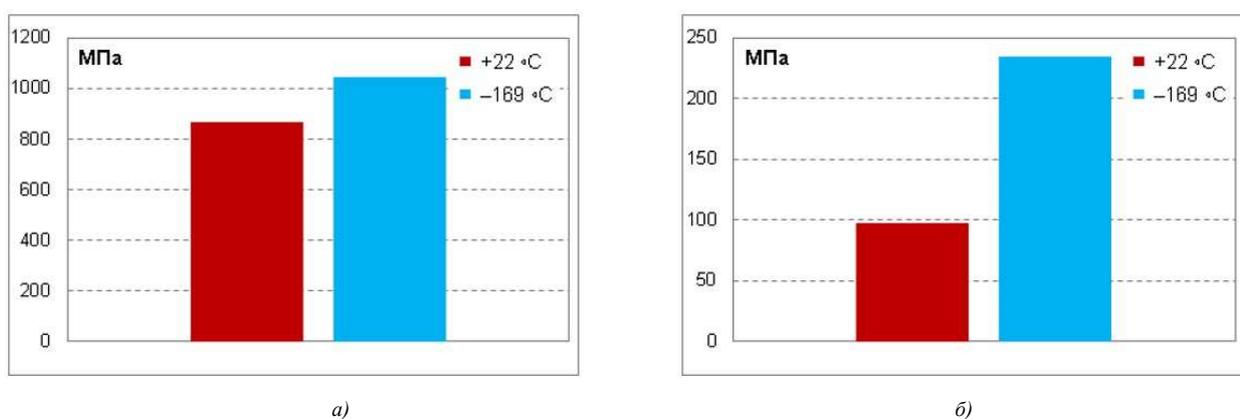


Рис. 10. Прочность (а) и модуль упругости (б) при сжатии в направлении 0° эпоксидного углепластика на основе однонаправленной ленты (0°)

Испытания образцов материалов проводились при температурах $+80^\circ\text{C}$, -196°C и при нормальной температуре, после многократного термоциклирования на базе 300 циклов (табл. 4).

Из полученных результатов следует, что термоциклирование мало сказывается на характеристиках испытанных углепластиков. Прочность при изгибе, сжатии и межслойном сдвиге у тканевого углепластика немного снижается с увеличением количества циклов. Материал на основе ровинга практически не меняет своих характеристик при этих видах испытаний, и у обоих материалов прочность при растяжении остается достаточно стабильной.

Таблица 4

Характеристики углепластиков после термоциклирования

Марка материала	Количество циклов	Прочность, МПа, при			
		растяжении	изгибе	сжатии	межслойном сдвиге
Ткань М40/эпоксидное связующее	0	745	1050	566	57,8
	100	760	879	552	54,9
	300	745	906	499	51,4
Ровинг Т700/эпоксидное связующее	0	2110	2020	1210	103
	100	2280	2080	1250	115
	300	2010	2100	1280	103

Несколько отличная картина получена в работе [19]. Испытания при различных температурах с термоциклированием на растяжение и изгиб проводились на образцах углепластика, изготовленных из однонаправленного препрега на основе углеродного волокна T700 и эпоксидного связующего, с тремя структурами армирования: 0° s, 90° s и $(0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ)$ s, которая называется квазиизотропной. Полученные результаты показывают, что прочность при растяжении образцов с однонаправленной (0°) s и квазиизотропной $(0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ)$ s структурами армирования снизилась при понижении температуры. Такое падение прочности авторы объясняют разрушением волокон при температуре -196°C , которые в основном определяют прочность материала, особенно со структурой (0°) s. Прочность на изгиб и модуль нормальной упругости увеличились для всех трех структур армирования, что связано с уплотнением молекулярной структуры матрицы и, соответственно, усилением ее связи с волокнами при криогенных температурах.

Большой объем испытаний стеклопластиков на основе разных типов связующих при криогенных температурах был проведен в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при разработке мембранной изоляции из ПКМ. Испытаниям подвергались четыре типа материалов на основе одной марки ровинговой ткани полотняного переплетения ORTEX-560 фирмы ЗАО «Бау Текс» (Россия) и трех марок связующих: винилэфирного связующего марки DION FR9300 фирмы Reichhold (Швеция), винилэфирного связующего марки Derakane Momentium 510C-350 фирмы Ashland (США), эпоксидного связующего марки ХТ-116 фирмы ООО «Химэкс» (Россия).

Результаты испытаний на сжатие, межслойный сдвиг и изгиб приведены на рис. 11. Анализ полученных данных показал, что в процессе статических испытаний все исследованные стеклопластики на основе стеклоткани ORTEX 560 вне зависимости от марки связующего показали увеличение пределов прочности после однократного охлаждения до -163°C в основном пределах 25 — 40 % по сравнению с теми же характеристиками при нормальной температуре порядка $+20^\circ\text{C}$. При дальнейшем термоциклировании увеличение показателей прочности незначительное, а разница в величинах разрушающих нагрузок между 10 и 50 циклами находится границах точности эксперимента.

Обобщая приведенные здесь результаты исследований, можно отметить, что влияние криогенных температур на свойства и характеристики ПКМ носит разнонаправленный характер. Это связано со множеством факторов, влияющих на поведение материала. К ним относятся: свойства волокон и матрицы и прочность их адгезионных связей, тип армирующего материала (ровинг, плетеная или мультиаксиальная ткань), структура армирования, масштабный фактор, технология формования, уровень остаточных технологических напряжений, наличие микродефектов и т. п.

Определяющую роль в процессе изменения деформативности ПКМ при понижении температуры играет различие в КТР волокон и матрицы. Поскольку КТР матрицы на порядок выше, чем у волокон, происходит ее сжатие (уплотнение), что увеличивает силы молекулярного взаимодействия и, соответственно, повышает ее прочность. В свою очередь усадка связующего вокруг волокна повышает в той или иной степени прочность их адгезионного взаимодействия. На эту картину накладывается разница в КТР волокон в продольном и поперечном направлениях. В направлении оси волокна большинство углеродных и арамидных волокон расширяются при охлаждении, а стеклянные и базальтовые волокна сокращаются. В поперечном направлении стеклянные, арамидные и базальтовые волокна сокращаются, а углеродные волокна так же расширяются. В результате наблюдается достаточно сложный процесс взаимодействия волокон и матрицы, учитывая, что КТР волокон и матрицы зависит от температуры.

На основании выполненного анализа опыта применения ПКМ в криогенной технике и особенностей изменения характеристик ПКМ при криогенных температурах с учетом требований действующих нормативных документов [1], [2] и [20] был разработан проект требований РС к применению ПКМ для изготовления емкостей для хранения СПГ, предполагающий включение отдельным приложением в [1].

Разработанные требования распространяются на ПКМ, которые используются в конструкции емкостей для обеспечения их прочности и надежности при заданных условиях эксплуатации и дополнительно для обеспечения функции теплоизоляции. Другими словами, применение ПКМ в конструкции предполагает выполнение силовой функции с дополнительной функцией теплоизоляции.

Результаты, представленные в настоящей статье, получены на основе выполненной по заказу Российского морского регистра судоходства научно-исследовательской работы. Данная работа является продолжением цикла системных исследований Регистра, посвященных развитию нормативных документов по применению конструкционных материалов при низкой расчетной температуре [21] и развитию требований к судам, предназначенным для транспортировки сжиженного природного газа [22].

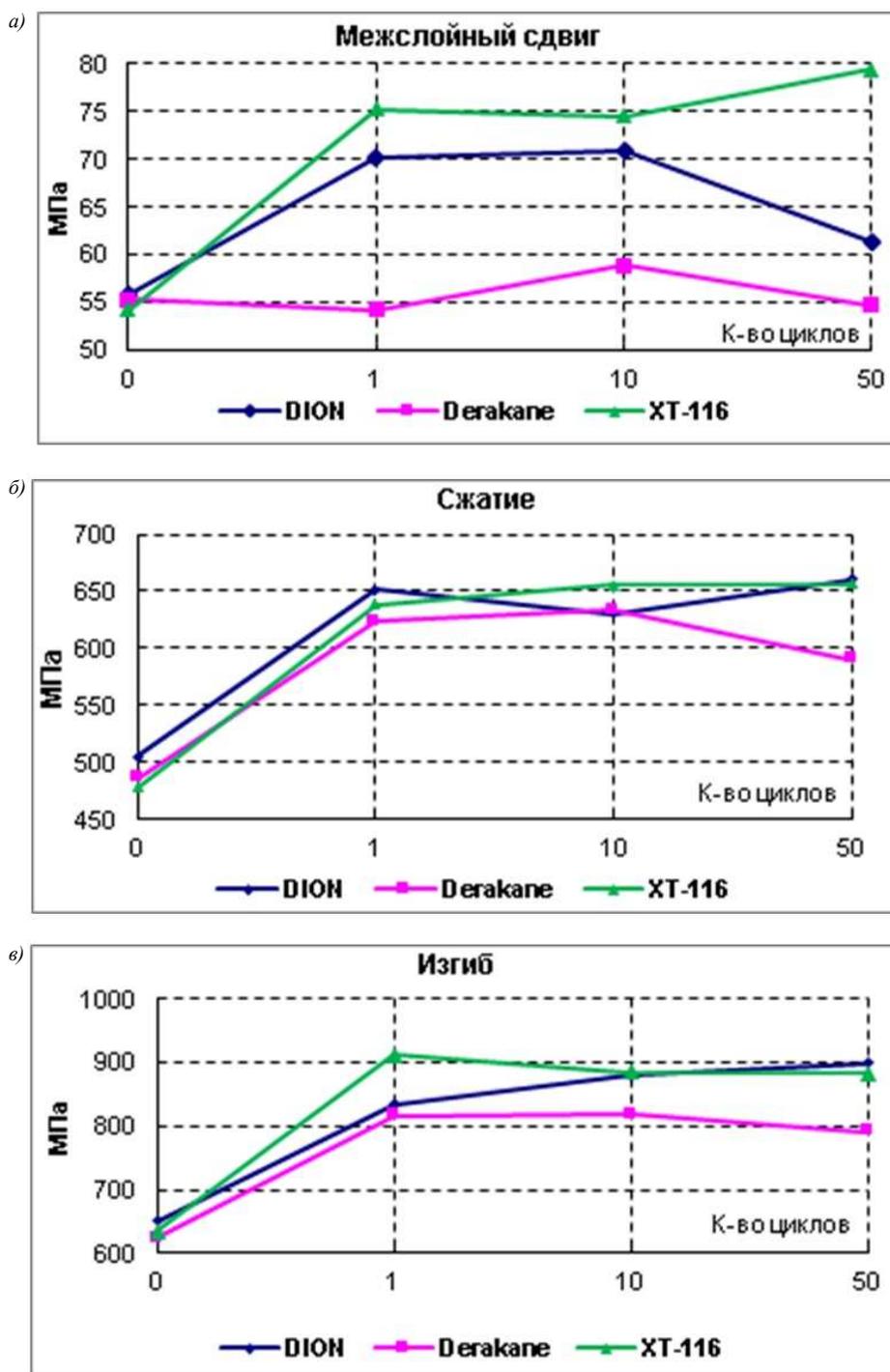


Рис. 11 Графики изменения пределов прочности стеклопластиков при межслойном сдвиге (а), сжатии (б) и изгибе (в) после n — кратного термоциклирования на базе (+20 °С; -163 °С)

Разработанный проект требований содержит следующие подразделы.

1. Общие положения, включающий
 - определение области распространения;
 - классификацию исходных компонентов — армирующих наполнителей и связующих;
 - классификацию ПКМ по составу и структуре.
2. Требования к исходным компонентам ПКМ, содержащий требования к
 - стеклянным и углеродным волокнам армирующих материалов;
 - стекло-, и углеармирующим материалам;
 - связующим;
 - условиям поставки исходных компонентов для производства ПКМ и конструкций из них.
3. Требования к ПКМ, содержащий требования к
 - характеристикам ПКМ и его стойкости к воздействию эксплуатационных факторов;
 - проведению контроля качества изготовления конструкций из ПКМ.
4. Требования к предприятиям-изготовителям исходных компонентов и ПКМ, содержащий требования к
 - документации, предъявляемой предприятиями — изготовителями исходных компонентов и ПКМ;
 - порядку выдачи СТО на изготовление исходных компонентов и ПКМ.
5. Требования к объему и порядку технического наблюдения за изготовлением ПКМ и емкостей из этих материалов и их освидетельствования, содержащий требования к
 - перечню и составу документации, предъявляемой Регистру;
 - к объему освидетельствования;
 - к порядку технического наблюдения.
6. Перечень испытаний и типовых проверок ПКМ и изготовленных из этих материалов емкостей, содержащий требования к испытаниям:
 - по определению физико-механических характеристик ПКМ в исходном состоянии;
 - по определению физико-механических характеристик ПКМ при воздействии факторов среды эксплуатации, в том числе при действии криогенных температур;
 - по определению технологических характеристик ПКМ;
 - по определению показателей степени пожароопасности ПКМ;
 - опытных конструкций емкости.
7. Требования к методам изготовления емкостей, включающий
 - общие требования к технологии изготовления емкостей из ПКМ;
 - перечень методов изготовления, допущенных к применению, и области их использования.
8. Требования к составу документации, представляемой на одобрение Регистра.
9. Требования к методам расчета прочности и устойчивости емкостей и методам нормирования допускаемых напряжений и деформаций, содержащий
 - требования к нагрузкам и их комбинациям;
 - требования к методам расчета, которые должны учитывать особенности ПКМ;
 - нормы опасных и допускаемых напряжений и деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В настоящее время ПКМ широко применяются в изделиях космической техники, в судостроении использование ПКМ в емкостях для хранения и транспортировки СПГ рассматривается исключительно на уровне проектов.

2. Влияние криогенных температур на свойства и характеристики ПКМ носит разнонаправленный характер. Определяющую роль в процессе изменения деформативности ПКМ при понижении температуры играет различие в коэффициенте теплового расширения волокон и матрицы и его зависимость от температуры:

- при растяжении жесткость матрицы и ее прочность, а также адгезия к волокнам увеличиваются, поэтому при растяжении ПКМ определяющим фактором является прочность волокон: стеклянных — повышается, углеродных может как повышаться, так и снижаться;

- при сжатии и сдвиге определяющую роль играет матрица и ее соединение с волокнами, поэтому упругие и прочностные характеристики ПКМ увеличиваются в области криогенных температур;

• термоциклирование ПКМ в диапазоне от нормальной до криогенной температуры сказывается на характеристике материалов в основном на первых циклах, при дальнейшем термоциклировании механические свойства ПКМ практически не меняются, либо в начале они увеличиваются, а затем выходят на плато.

3. Разработан проект требований РС к применению ПКМ при изготовлении емкостей для хранения СПГ. Требования распространяются на конструкционные ПКМ, применяемые в конструкции емкостей для обеспечения их прочности и надежности при заданных условиях эксплуатации, а также дополнительно для обеспечения функции теплоизоляции.

Разработанный проект требований предполагает включение отдельным приложением в Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом. Часть IV. Хранение груза. 2023. Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3> заяв. и патентооблад. Минпромторг России. — № 2013108513/11; заявл. 26.02.2013; опублик. 27.08.2014, Бюл. № 24. — 10 с.
11. Пат. 2566588 Российская Федерация, МПК B63B25/16, F17C3/02, B32B37/00 Способ изготовления блоков термоизоляционной герметичной стенки емкости нового типа из полимерных композиционных материалов для сжиженного природного газа / М.Н. Бирюкова, А.В. Блинов, А.В. Задумов, А.Е. Рыжкин, Д.Ю. Соосаар, Н.Н. Федонюк, В.М. Шапошников; заяв. и патентооблад. Минпромторг России. — № 2013152659/11; заявл. 28.11.2013; опублик. 27.10.2015, Бюл. № 16. — 8 с.
12. Трофимов Н.Н. Физика композиционных материалов: в 2-х т. / Н.Н. Трофимов, М.З. Канович, Э.М. Карташов и др. — М.: Мир, 2005. — Т. 2. — 344 с.
13. Zhang Y. Tensile and interfacial properties of polyacrylonitrile-based carbon fiber after different cryogenic treated condition / Y. Zhang, F. Xu, Ch. Zhang, J. Wang et al. // *Composites*. — 2016. — Vol. 99. Part B. — Pp. 358 — 365.
14. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К.Е. Перепелкин. — СПб.: Научные основы и технологии (НОТ), 2009. — 380 с.
15. Буров Л.А. Применение полимерных композиционных материалов в криогенном оборудовании / Л.А. Буров — М.: ЦНИТИХИМНЕФТЕМАШ, 1987. — 50 с.
16. Reed R.P. Low-temperature mechanical properties of glass/epoxy laminates / R.P. Reed, M. Madhukar, B. Thaicharoenporn et al. // *Joint Conference of the Transactions of the Cryogenic Engineering*. — 2014. — Vol. 1574. — Pp. 109 — 116.
17. Perez N.S. Mechanical Testing of Fibre-reinforced Polymer Matrix Composites at Cryogenic Temperatures / N.S. Perez, R.M. Shaw, M.R.L. Gower // *National Physical Laboratory*, 2022. — Report MAT 112. — P. 31.
18. Shi H. Effects of Cryogenic Temperature on Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites / H. Shi, Q. Lei, X. He, K. Yang, B. Sun, H. Sun // *18th European Conference on Composite Materials*. — 2018. — Vol. 24. — P. 6.
19. Meng J. Mechanical Properties and Internal Microdefects Evolution of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: Cryogenic Temperature and Thermocycling Effects / J. Meng, Y. Wang, H. Yang, P. Wang et al. // *Composite Science and Technology*. — 2020. — Vol. 191. — P. 14.
20. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVI. Конструкция и прочность судов из полимерных композиционных материалов. 2023. Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=43A718B7-356C-4B37-8FCC-624DAADFEA70&f=2-020101-174-16> (дата обращения 13.08.2024).
21. Филин В.Ю., Ильин А.В., Ларионов А.В., Назарова Е.Д. Обоснование требований МАКО и Регистра к выбору материалов корпусных конструкций, эксплуатируемых при низких климатических температурах. Часть 1 — сопротивление старту трещины // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72 — 73. — С. 48 — 58. — EDN AJUOKJ.
22. Бойко М.С. Расчет теплового потока в корпусе судна-газовоза на основе аналитических методов теории теплообмена / М.С. Бойко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70 — 71. — С. 88 — 100. — EDN DIFTRC.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroyki sudov dl'a perevozki szhizhenykh gazov nalivom. Chast' IV. Khranenie gruzha. 2023. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva*. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=D007A440-65B1-4CBE-B1C5-40FF92874B86&f=2-020101-176-4> (accessed 13.08.2024).
2. Resolution MSC.370(93). Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), 2014. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS370\(93\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS370(93).pdf) (accessed 13.08.2024).
3. The Application of Carbon Fiber Composites in Cryotank. Chapter 6. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/58970> (accessed 13.08.2024).
4. Fedonyuk N.N., Maslich E.A. *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v zarubezhnom sudostroenii* [Application of polymer composite materials in foreign shipbuilding]. SPb.: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2024.
5. BSE's LNG Bunker Tanker to Utilise Composite Fuel Tanks. URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/bses-lng-bunker-tanker-to-utilise-composite-fuel-tanks/> (accessed 13.08.2024).

6. Ceuster S.R. de. Composite Gas Carrier. Exploring the Technical and Financial Aspects Associated with the Production and Design of a Composite Gas Carrier: thesis for the degree MSc in Marine Technology in the specialization Ship Design. SDPO.17.007.m. TU Delft, 2017. URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5ba37b27-1b0f-4014-b8e2-00527a1d799d> (accessed 13.08.2024).
7. *Na forume «Arktika — Regiony» Rosatom predstavil proekt pervogo rossiyskogo gazovoza* [Rosatom presented the design of the first Russian gas carrier at the 'Arktika — Regiony' forum]. URL: <https://rosatom.ru/journalist/news/na-forume-arktika-regiony-rosatom-predstavil-proekt-pervogo-rossiyskogo-gazovoza/> (accessed 13.08.2024).
8. Choi I., Yu Y.H., Lee D.G. Cryogenic sandwich-type insulation board composed of E-glass/epoxy composite and polymeric foams. *Composite Structures*. — 2013. — Vol. 102. — Pp. 61 — 71.
9. Kutz P.W., Werner J., Otremba F. Testing of Composite Material for Transport Tanks for LNG. *Key Engineering Materials*. — 2019. — Vol. 809. — Pp. 625 — 629.
10. Ryzhkin A.E., Zadumov A.V., Fedonyuk N.N., Shaposhnikov V.M. RU 2526870, IPC B63B25/16, F17C3/02. *Termoizolyatsionnaya germetichnaya stenka emkosti iz polimernykh kompozitsionnykh materialov dl'a szhizhennogo prirodnogo gaza* [Thermo-insulating hermetic wall of the liquefied natural gas tank made of polymeric composite materials]. Russian Federation, assignee Publ. 27 Aug 2014.
11. Biryukova M.N., Blinov A.V., Zadumov A.V., Ryzhkin A.E., Soosaar D.Yu., Fedonyuk N.N., Shaposhnikov V.M. RU 2566588, IPC B63B25/16, F17C3/02, B32B37/00. *Sposob izgotovleniya blokov termoizolyatsionnoy germetichnoy stenki emkosti novogo tipa iz polimernykh kompozitsionnykh materialov dl'a szhizhennogo prirodnogo gaza* [Method of manufacturing of blocks of thermo-insulating hermetic wall of a new type of liquefied natural gas tank made of polymeric composite materials]. Russian Federation, assignee Publ. 27 Oct 2015.
12. Trofimov N.N., Kanovich M.Z., Kartashov E.M. et al. *Fizika kompozitsionnykh materialov* [Physics of composite materials]. Vol. 2. M.: Mir, 2005.
13. Zhang Y., Xu F., Zhang Ch., Wang J. et al. Tensile and interfacial properties of polyacrylonitrile-based carbon fiber after different cryogenic treated condition. *Composites. Part B. Engineering*. — 2016. — Vol. 99. — Pp. 358 — 365.
14. Perepelkin K.E. *Armiruyushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity* [Reinforcing fibers and fibrous polymeric composites]. — SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2009.
15. Burov L.A. *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v kriogenom oborudovanii* [Application of polymeric composites in cryogenic equipment]. M.: TsNITIKhIMNEFTEMASh, 1987.
16. Reed R.P., Madhukar M., Thaicharoenporn B. et al. Low-temperature mechanical properties of glass/epoxy laminates. *Joint Conference of the Transactions of the Cryogenic Engineering*. — 2014. — Vol. 1574. — Pp. 109 — 116.
17. Perez N.S., Shaw R.M., Gower M.R.L. Mechanical Testing of Fibre-reinforced Polymer Matrix Composites at Cryogenic Temperatures. *National Physical Laboratory Report MAT 112*, 2022.
18. Shi H., Lei Q., He X., Yang K., Sun B., Sun H. Effects of Cryogenic Temperature on Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites. *18th European Conference on Composite Materials*. — 2018. — Vol. 24. — P. 6.
19. Meng J., Wang Y., Yang H., Wang P. et al. Mechanical Properties and Internal Microdefects Evolution of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: Cryogenic Temperature and Thermocycling Effects. *Composite Science and Technology*. — 2020. — Vol. 191. — P. 14.
20. *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' XVI. Konstruktsiya i prochnost' sudov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov, 2023* [Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part XVI. Structure and strength of fiber-reinforced plastic ships]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=43A718B7-356C-4B37-8FCC-624DAADFEA70&f=2-020101-174-16> (accessed 13.08.2024).
21. Filin V. Yu., Il'in A.V., Larionov A.V., Nazarova E.D. *Obosnovanie trebovaniy MAKO i Registra k vyboru materialov korpusnykh konstruksiy, ekspluatiruemykh pri nizkikh klimaticheskikh temperaturakh. Chast' 1 — soprotivlenie startu treshchiny* [Substantiation of IACS and RS requirements for the selection of hull materials for structures operated at low climatic temperatures. Part 1 — crack start resistance]. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — Vol. 72 — 73. — Pp. 48 — 58.
22. Boyko M. S. *Rashchet teplovogo potoka v korpuse sudna-gazovoza na osnove analiticheskikh metodov teorii teploobmena* [Calculation of heat flow in gas carrier structure based on analytical methods of heat exchange theory]. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — Vol. 70 — 71. — Pp. 88 — 100.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.432, 629.5.03

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА МОРСКИХ СУДАХ

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

В статье приводятся данные о двигателях внутреннего сгорания, установленных в качестве главных двигателей на морских судах, построенных под техническим наблюдением Российского морского регистра судоходства в 2017 — 2022 годах. Отмечается тенденция к сокращению применения малооборотных двигателей внутреннего сгорания на судах отечественной постройки при увеличении доли средне- и высокооборотных дизелей. Анализируются причины этой тенденции в качестве которых предполагается следующее: рост экономичности и мощности среднеоборотных дизелей, состав строящегося в России флота, активный рост применения в качестве движителей винто-рулевых колонок (ВРК), отсутствие спроса на малооборотные дизели в других отраслях транспорта и энергетики.

Ключевые слова: судовые двигатели внутреннего сгорания, малооборотные дизельные двигатели, среднеоборотные дизельные двигатели, винто-рулевые колонки.

ANALYSIS OF CURRENT TRENDS IN THE USE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES ON SHIPS

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

The article provides data on internal combustion engines installed as main engines on ships built under the technical supervision of the Russian Maritime Register of Shipping in 2017 — 2022. There is a tendency to reduce the use of low-speed internal combustion engines on ships of domestic construction with an increase in the proportion of medium- and high-speed diesels. The reasons for this trend are analyzed, which are assumed to be as follows: increased efficiency and power of medium-speed diesels, the composition of the fleet under construction in Russia, the active growth in the use of screw steering columns as propellers, the lack of demand for low-speed diesels in other transport and energy sectors.

Keywords: marine internal combustion engines, low-speed diesel engines, medium-speed diesel engines, azimuth thrusters.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время руководством страны уделяется большое внимание развитию отечественного судоходства и судостроительной отрасли. Связано это с резко обострившейся необходимостью обеспечения независимости внешней торговли в условиях сложившейся геополитической обстановки. Обеспечение работы отечественного судостроения в условиях санкционного давления, то есть без поставок из-за рубежа тех систем и оборудования, которые не производятся в России, является новым вызовом для отрасли. Особенно непростая ситуация возникла с поставками судовых двигателей на отечественные верфи для строящихся и планируемых к постройке гражданских судов.

Брянский машиностроительный завод (БМЗ) был единственным в СССР производителем судовых малооборотных дизелей (МОД). За полвека производства судовых двигателей БМЗ выпустил около 1000 дизелей различных модификаций по лицензии фирмы MAN B&W и прекратил их производство в 2012 году. Но в последнее время в интернете и уважаемых журналах [1, 2, 3] появилось довольно много публикаций о необходимости срочной (в связи с санкциями) организации производства судовых МОД в Российской Федерации.

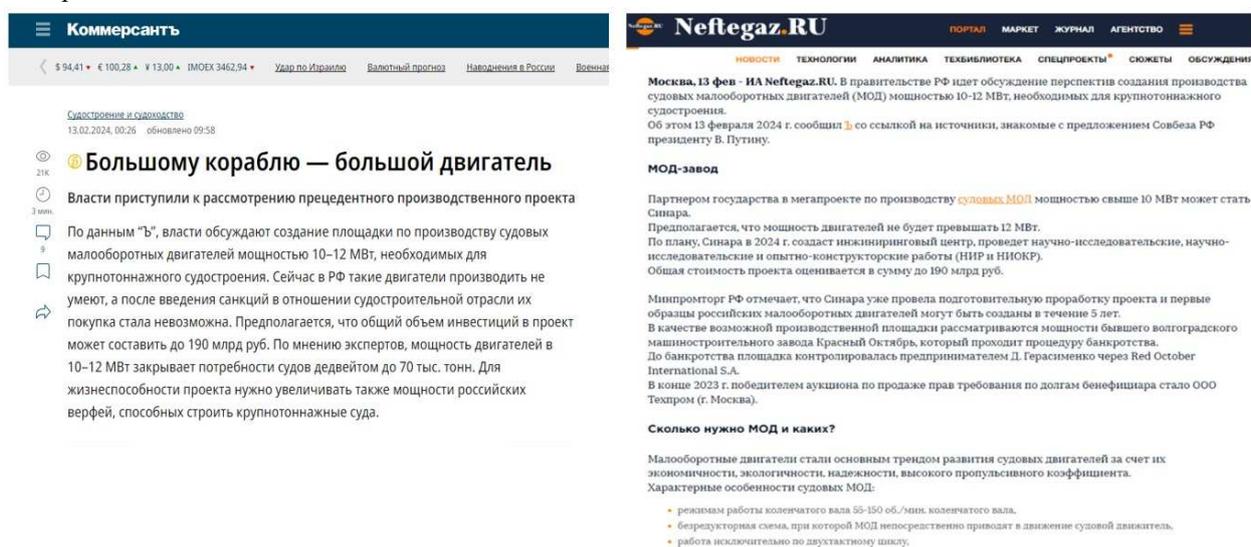


Рис. 1 Скриншоты с сайтов <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> [1] и <https://neftgaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/818427> [2]

Называются следующие цифры: пять лет на разработку проекта, стоимость проекта — 190 млрд руб. [1, 2]. Там же говорится, что по данным Минпромторга РФ до 2040 года потребуется 414 МОД мощностью 10 — 12 МВт, т. е. в среднем в год российскому судостроению потребуется 26 малооборотных двигателей. Предполагается, что мощность двигателей не будет превышать 12 МВт.

Названные цифры вызвали у автора некоторые сомнения, и было решено сопоставить их с текущей ситуацией в отечественном судостроении, опираясь на общедоступные данные из Регистровой книги. Таким образом, цель данной работы можно сформулировать как проведение оценки реальных потребностей отечественного судостроения в МОД на основе отслеживания тенденций развития судовой энергетики за последние годы.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СУДАХ, ПОСТРОЕННЫХ С КЛАССОМ РЕГИСТРА

Прежде чем перейти к рассмотрению данных об установленных на судах ДВС, стоит рассмотреть информацию, характеризующую объем построенных судов в нашей стране. Данные о построенных морских судах взяты из Регистровой книги, там же можно найти данные о главных двигателях всех морских судов.

На представленных на рис. 2 диаграммах показано количество морских судов, построенных в классе Регистра за последний 21 год. В среднем за этот период в год сдавалось 54 судна. Если брать последние 10 лет, то эта цифра несколько выше: в среднем 61 судно. Около 87 % от общего числа всех построенных судов

составили самоходные суда, т. е. суда, имеющие на борту как минимум один главный двигатель, что можно видеть на левой диаграмме рис. 2 (самоходные суда показаны оранжевым цветом). Большинство судов (примерно $\frac{3}{4}$ от общего количества) построено в России, что можно видеть на правой диаграмме рис. 2 (показаны зеленым цветом). Для сравнения, в 1980-е годы под надзором Регистра СССР ежегодно сдавалось в среднем около 100 судов.

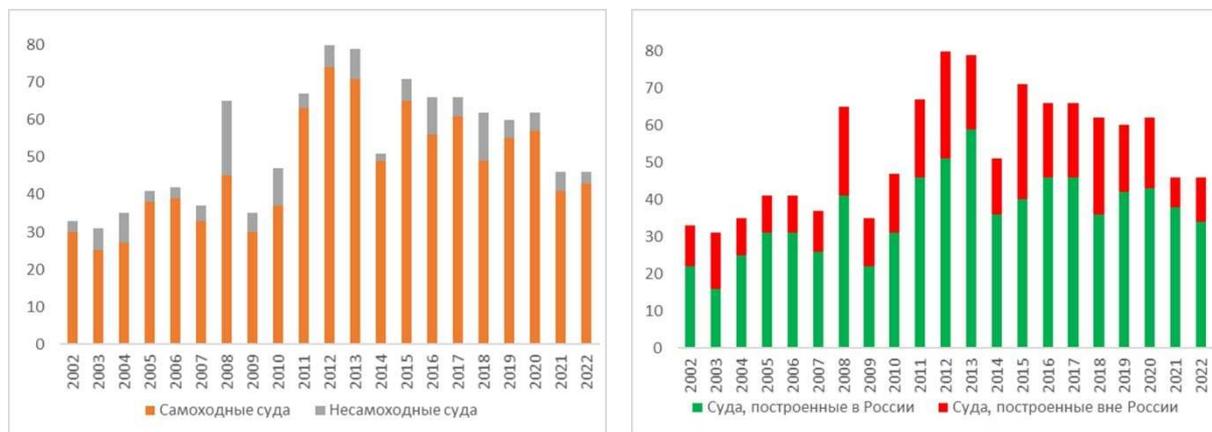


Рис. 2 Данные о морских судах, построенных в период между 2002 и 2022 годами под техническим наблюдением Регистра

В статье [3] дается оценка количества необходимых МОД, где, основываясь на данных примерно 40-летней давности делается вывод, что основным силовым агрегатом на транспортных судах должен стать судовой малооборотный крейцкопфный 2-тактный дизель, которым оснащались порядка 70% судов мирового транспортного морского флота и делается предположение, что примерно такое же соотношение типов силовых установок сохраняется в настоящий период времени.

2. ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ПОСТАВЛЕННЫЕ НА СУДА В 2017 — 2022 ГОДАХ

Для объективной оценки актуальности производства различных моделей ДВС для морских судов в связи с возникшими ограничениями поставок зарубежных двигателей произведена оценка потребностей судостроительной отрасли в двигателях за предыдущие шесть лет до начала применения санкций. Была произведена выборка из Регистровой книги с использованием базы данных «Флот» — собраны данные о судах, построенных за шесть лет с 2017 по 2022 год. В анализе рассматривались морские самоходные суда, заложенные после 2017 года и получившие документы Регистра до 2023 года.

Всего за указанный период Регистром были выданы документы на 342 построенных судна, но анализируемый период включает суда, заложенные после 01.01.2017. Поэтому, отсекая суда, заложенные до 2017 года, оставляем для анализа 294 судна. Из этих судов вычитаем суда несамоходные и суда, имеющие главную энергетическую установку отличную от дизельной. Остается 232 самоходных судна, построенные по 90 различным проектам судов, на которых в качестве главных двигателей установлено 479 дизельных двигателей с разными типами движителей и различными вариантами передачи мощности к движителям.

Отдельно хочется отметить, что большая часть рассматриваемых самоходных судов — 140 из 232 — построены на российских верфях.

Кроме 479 главных двигателей на построенные суда (включая несамоходные) было установлено 493 вспомогательных дизель-генератора (ВДГ) мощностью от 2 до 4615 кВт, 46 стояночных дизель-генераторов (СДГ) мощностью от 30 до 740 кВт и 103 аварийных дизель-генераторов (АДГ) мощностью от 53 до 828 кВт. Среди изготовителей дизель-генераторов особо выделяется шведская фирма АВ Volvo Penta, которая поставила 44 % от общего количества АДГ и СДГ, а российские производители занимают весьма скромное место. Данные по вспомогательным и аварийным дизель-генераторам могут быть использованы для приблизительной оценки необходимого количества таких машин. Так как всего за рассматриваемые шесть лет поставлено 642 дизель-генератора и если предположить, что в ближайшее время количество, размеры и назначение строящихся судов не будут претерпевать резких изменений, то потребность отрасли составит около 100 вспомогательных

двигателей в год. Так как все перечисленные дизель-генераторы не могут быть отнесены к МОД, то далее в настоящей статье мы будем рассматривать только главные двигатели.

За обозначенные шесть лет на судах с классом РС было установлено 479 главных судовых ДВС, 76 различных марок, 34 производителей, мощностью от 100 до 13378 кВт. Суммарная общая мощность составила 1 457 852 кВт. При этом из 479 главных двигателей только 10 были произведены в России, то есть около 2 %. Среди стран, из которых поставлялись судовые ДВС, Россия занимает скромное 9-е место. Как видно из рис. 3, большинство (82,5%) поставок происходило из стран, которые последнее время принято относить к «недружественным».

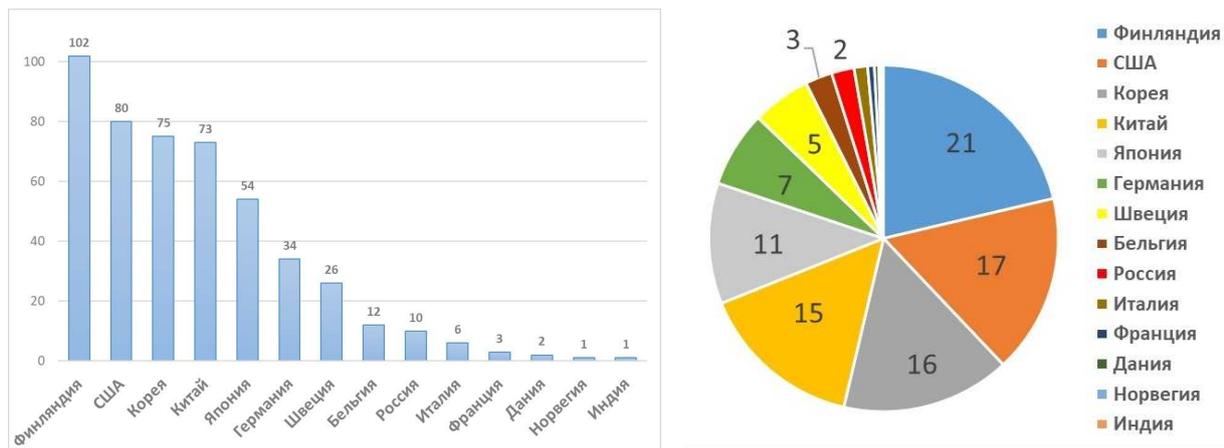


Рис. 3 Распределение по стране производства главных двигателей, установленных на судах, заложенных после 01.01.2017 и сданных до 2023 года (слева — количество двигателей, справа — % от общего количества установленных двигателей)

Почти 40 % двигателей (190 машин из 479) поставлено фирмой Wartsila и ее лицензиатами из разных частей света. Кроме Wartsila основными поставщиками являются Caterpillar (78 машин), Yanmar (50 машин), Volvo Penta (26 машин), Rolls-Royce (MTU) (22 машины), MAN (19 машин). Эти фирмы-производители совместно с лицензиатами охватывают более 80 % поставок, что показано на рис. 4.

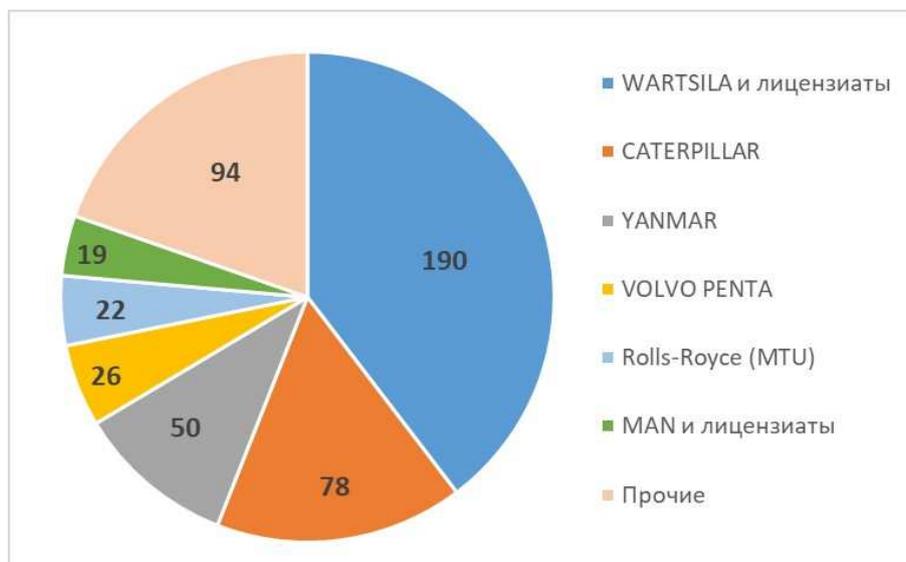


Рис. 4 Распределение главных двигателей по фирме-производителю

В табл. 1 приведены данные по 15 проектам судов, имеющим СЭУ с наибольшей суммарной мощностью главных двигателей. Наиболее мощной СЭУ обладают суда-газовозы с высоким ледовым классом и электродвижением.

Таблица 1

Суда с СЭУ наибольшей мощности

	Суммарная мощность ГД, кВт	Судов	Мощность ГД, кВт	Число ГД	Марка ГД	Страна постройки ГД	Примечание
1	64 350	10	11 700	4	W12V50DF	Корея	Электродвижение, ВРК, 3 × 15 000 кВт
			8775	2	W9L50DF	Корея	
2	34 000	1	9000	3	STX-MAN 18V32/40	Корея	Электродвижение, ВРК, 2 × 11 000 кВт
			7000	1	STX-MAN 14V32/40	Корея	
3	31 360	2	8920	2	W16V32E2	Китай	Электродвижение, ВРК, 2 × 14 000 кВт
			6720	2	W12V32E	Китай	
4	14 160	1	3540	4	MTU 20V4000M73L	Германия	2 ВРШ
5	13 778	9	13 778	1	W7X62DF	Корея	ВФШ цл
6	12 000	2	6000	2	W12V34DF	Финляндия	ВФШ
7	10 890	1	3630	3	10Д49	Россия	Электродвижение, ВФШ
8	8120	2	8120	1	MAN 14V32/44CR	Германия	ВРШ
9	8120	2	4060	2	MAN 7V32/44CR	Германия	ВРШ
10	7756	1	1939	4	MTU 16V2000M96L	Германия	водомет
11	6400	1	3200	2	8Z280-ET	США	2 ВРК
12	6000	2	6000	1	MAN 10L32/44CR	Германия	ВРШ
13	6000	1	3000	2	3512C	США	2 ВРК
14	6000	6	3000	2	12VDZC-1000-188-K C9	Бельгия	2 ВРШ
15	5220	1	2610	2	3512C	США	2 ВРК

В табл. 2 представлены данные по распределению построенных судов в зависимости от мощности СЭУ (суммарной мощности главных двигателей), эти же данные показаны в виде круговой диаграммы на рис. 5. В общей сложности на СЭУ с мощностью более 7 МВт, для которых имеет смысл рассматривать возможность применения МОД, приходится менее 13 % построенных судов, а самым востребованным оказался диапазон от 2000 до 3000 кВт, на который приходится 39 % всех построенных судов.

Таблица 2

Распределение количества дизельных двигателей в зависимости от мощности СЭУ

	Диапазон мощности СЭУ, кВт	Число судов	Число двигателей	Диапазон мощности использованных ДВС, кВт
1	Не более 500	22	41	От 100 до 246
2	От 500 до 1000	31	57	От 275 до 956
3	От 1000 до 2000	22	28	От 275 до 956
4	От 2000 до 3000	90	182	От 680 до 3000
5	От 3000 до 4000	18	36	От 1790 до 2000
6	От 4000 до 5000	4	6	От 2040 до 4800
7	От 5000 до 6000	13	25	От 2560 до 4800
8	От 6000 до 7000	1	2	3200
9	От 7000 до 8000	1	4	1939
10	От 8000 до 9000	4	6	4060 и 8120
11	От 9000 до 10 000	—	—	—
12	От 10 000 до 11 000	1	3	3630
13	От 11 000 до 12 000	2	4	6000
14	От 12 000 до 13 000	—	—	—
15	От 13 000 до 14 000	9	9	13 778
16	От 14 000 до 15 000	1	4	3540
17	От 15 000 до 30 000	—	—	—
18	Более 30 000	13	72	От 6720 до 11 700

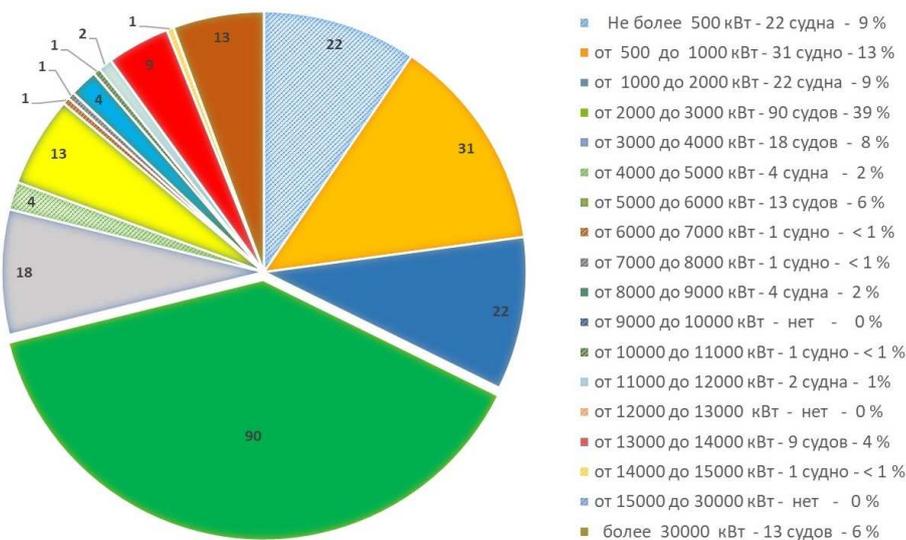


Рис. 5 Распределение судов по мощности СЭУ (суммарная мощность главных двигателей)

Таблица 3

Распределение в зависимости от мощности количества главных двигателей, установленных на судах, построенных в 2017 — 2022 гг.

	Диапазон мощности ГД, кВт	Число ГД	Диапазон номинальных частот, об/мин
1	Не более 500	83	От 1500 до 3500
2	От 500 до 1000	46	От 900 до 2300
3	От 1000 до 2000	212	От 310 до 2450
4	От 2000 до 3000	19	От 720 до 1970
5	От 3000 до 4000	20	От 720 до 1800
6	От 4000 до 5000	6	750
7	От 5000 до 6000	—	—
8	От 6000 до 7000	12	750
9	От 7000 до 8000	1	750
10	От 8000 до 9000	28	От 514 до 750
11	От 9000 до 10 000	3	720
12	От 10 000 до 11 000	—	—
13	От 11 000 до 12 000	40	750
14	От 12 000 до 13 000	—	—
15	От 13 000 до 14 000	9	86
ИТОГО		479	От 86 до 3500

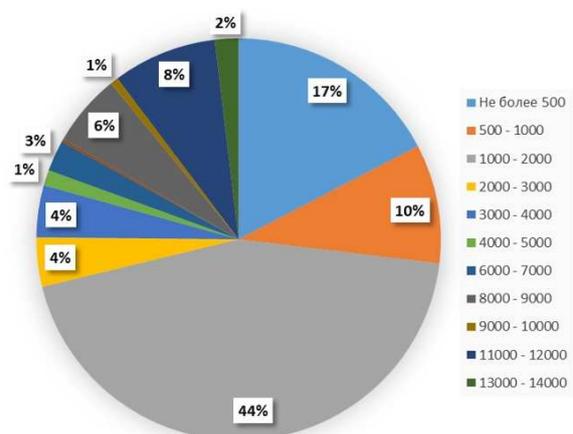
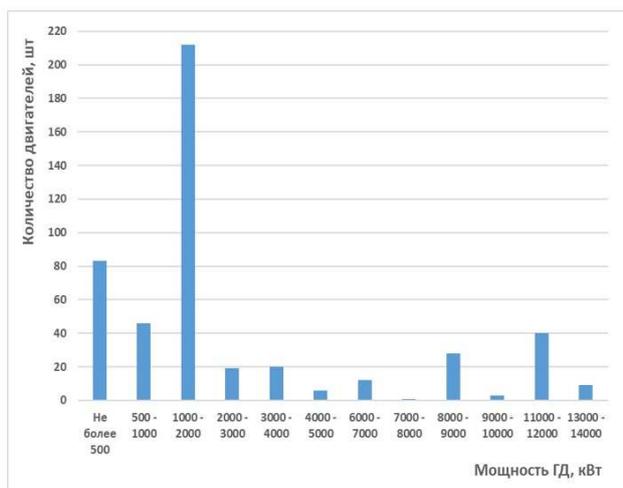


Рис. 6 Количество двигателей, установленных на судах в 2017 — 2022 гг. в зависимости от мощности (кВт) (слева — количество двигателей, справа — % от общего количества установленных двигателей)

Из табл. 3 следует, что самыми востребованными являются двигатели с мощностью в диапазоне от 1 до 2 МВт (212 машин), что можно видеть на рис. 6, где графически представлены данные табл. 3 — распределение в зависимости от мощности количества главных двигателей, установленных на судах, построенных за рассматриваемое время. Самым востребованным двигателем оказался двигатель фирмы Wartsila W6L20 мощностью 1200 кВт при номинальной частоте 1000 об/мин. Всего на судах за рассмотренный период установлено 87 двигателей этой марки.

В табл. 4 приводится полный перечень всех ДВС, установленных на судах, построенных за рассматриваемый период. Данные из табл. 4 представлены в виде диаграммы, приведенной на рис. 7, которая представляет данные в координатах «мощность — номинальная частота оборотов».

Таблица 4

Перечень двигателей внутреннего сгорания, установленных в качестве главных двигателей на морских судах, построенных в 2017 — 2022 гг.

	Производитель	Марка двигателя	Номинальная частота, об/мин	Мощность, кВт	Количество
Швеция					
1	AB Volvo Penta	D13 800 R5 / ZF325A	2300	588	2
2	AB Volvo Penta	D13C1-AMH	2400	441	4
3	AB Volvo Penta	D9-500 R4 / ZF286A	2600	368	2
4	AB Volvo Penta	D16MH	1800	441	2
5	AB Volvo Penta	D9-425 R3 / ZF286A	2200	313	2
6	AB Volvo Penta	D6 330A-F	3500	243	10
7	AB Volvo Penta	D4-300A-F	3500	221	4
Бельгия					
8	Anglo Belgian Corporation	12VDZC-1000-188-KC9	1000	3000	12
Норвегия					
9	Bergen Diesel AS	B33:45L8P	750	4800	1
США					
10	Caterpillar Inc.	3516C-HD	1500	1920	26
11	Caterpillar Inc.	3512C	1800	1120	16
12	Caterpillar Inc.	3508C	1200	746	1
13	Caterpillar Inc.	C32	1800	874	15
14	Caterpillar Inc.	C18	2100	500	8
15	Caterpillar Inc.	C12	2000	287	12
Дания					
16	MAN Energy Solutions	12V175D	1800	2040	2
Индия					
17	Weichai-MAN	MAN B&W 7L27/38	800	2555	1
Корея					
18	Hyundai Heavy Industries Co.	HYUNDAI-WINGD W7X62DF	86	13 778	9
19	STX Engine Co.	STX-MAN 14V32/40	750	7000	1
20	STX Engine Co.	STX-MAN 18V32/40	720	9000	3
21	Wartsila-Hyundai Engine Company	W12V50DF	750	11 700	40
22	Wartsila-Hyundai Engine Company	W9L50DF	514	8775	20
23	Hyundai	DD6AC	2150	246	2
Китай					
24	CSSC Wartsila Engine (Shanghai)	W16V32E	750	8960	4
25	CSSC Wartsila Engine (Shanghai)	W12V32E	750	6720	4
26	CSSC Wartsila Engine (Shanghai)	W6L34DF	720	3000	1
27	Weichai	8L27/38	800	2920	1
28	Ningbo C.S.I. Power & Machinery Group	G6300ZC28B	750	1618	10
29	CSSC Wartsila Engine (Shanghai)	W6L20	1000	1200	4
30	Cummins China	KT38-G	1500	1080	1
31	CNPC Jichai Power Company	L8190ZLC-1	1200	1003	2
32	Daihatsu Diesel	6DKM-20e	900	956	3
33	Zichai Power Company	6210ZLC-21	1000	882	2

Таблица 4 — окончание

	Производитель	Марка двигателя	Номинальная частота, об/мин	Мощность, кВт	Количество
34	Henan Diesel Engine Industry	TBD604BL6	1800	634	4
35	Weichai	CW6200ZC	1000	600	5
36	Cummins	К 19-М	2200	373	2
37	WeichaPower	WD12C375-21	2150	275	10
38	WeichaPower	WD10C312-18	1800	230	2
39	WeichaPower	WD10C278-21	2100	205	4
40	WeichaPower	WD10-C240-15	1500	176	2
41	WeichaPower	WD10C300-21	2100	220	4
42	WeichaPower	WD615.C-24	1600	230	6
43	Нет данных	Нет данных	в/о	100	2
Италия					
44	Wartsila Italia S.p.A.	W8L26F	1000	2600	4
45	Wartsila Italia S.p.A.	W6L26	1000	2040	2
Германия					
46	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 16V2000M72	2250	1440	4
47	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 16V2000M96	2450	1790	2
48	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 16V4000M63R	1800	2000	4
49	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 12V4000V53	1800	1140	2
50	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 16V 4000M65L	1970	2560	2
51	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 16V2000M96L	1800	1939	4
52	Rolls-Royce Solutions GmbH	MTU 20V4000M73L	1800	3540	4
53	MAN Energy Solutions SE	MAN 14V32/44CR	720	8120	2
54	MAN Energy Solutions SE	MAN 10L32/44CR	750	6000	2
55	MAN Energy Solutions SE	MAN 7L32/44CR	750	4060	4
56	MAN Truck & Bus SE	D2676 LE 432	2100	412	2
57	MAN Truck & Bus SE	D2676 LE 422	2100	478	2
Япония					
58	Yanmar Co., Ltd.	8Z 280-ET	720	2300	2
59	Yanmar Co., Ltd.	8EY26W	750	2210	1
60	Yanmar Co., Ltd.	6EY26W	750	1471	1
61	Yanmar Co., Ltd.	6EY22AW	900	1180	46
62	Yanmar Co., Ltd.	6AYM-WST	1900	485	6
63	Akasaka Diesels	AX33B	310	1618	3
64	Mitsubishi	S6U-C2MPTK	1100	749	1
Россия					
65	АО «Коломенский завод»	Д-49	1000	3630	3
66	ООО «Морские пропульсивные системы»	МПС-V8/920 (8ЧН17/19,5)	1800	895	2
67	ООО «Алтайский завод дизельных агрегатов»	ТМЗ-8481Р(1) типа 8ЧН14/14	1500	294	2
68	KAMAZ Cummins	6ISB 300	2600	203	2
69	ООО «РЕМДИЗЕЛЬ»	ДРА 176/1500(3,00)-РД1243	1500	176	1
Франция					
70	Moteurs Baudouin	12M26.2 A225 P2	1800	680	3
Финляндия					
71	Wartsila	W6L 20	1000	1200	87
72	Wartsila	W9L 20	1000	1800	4
73	Wartsila	W8L32	750	4640	1
74	Wartsila	W12V34DF	750	6000	4
75	Wartsila	W12V32E	750	6720	2
76	Wartsila	W16V32E2	750	8960	2

На рис. 7 представлено распределение ГД по мощности в зависимости от частоты вращения коленчатого вала ГД построенных судов. Из поставленных 479 главных судовых двигателей 74 (15,4 %) были двухтопливными, т. е. предназначены для работы на газовом топливе с воспламенением от впрыска в цилиндр жидкого пилотного топлива, на рис. 7 они показаны зеленым цветом. Необходимо отметить, что это самые мощные двигатели из числа применяемых на судах за рассмотренный период. Красным цветом на рис. 7 показаны ДВС российского производства.

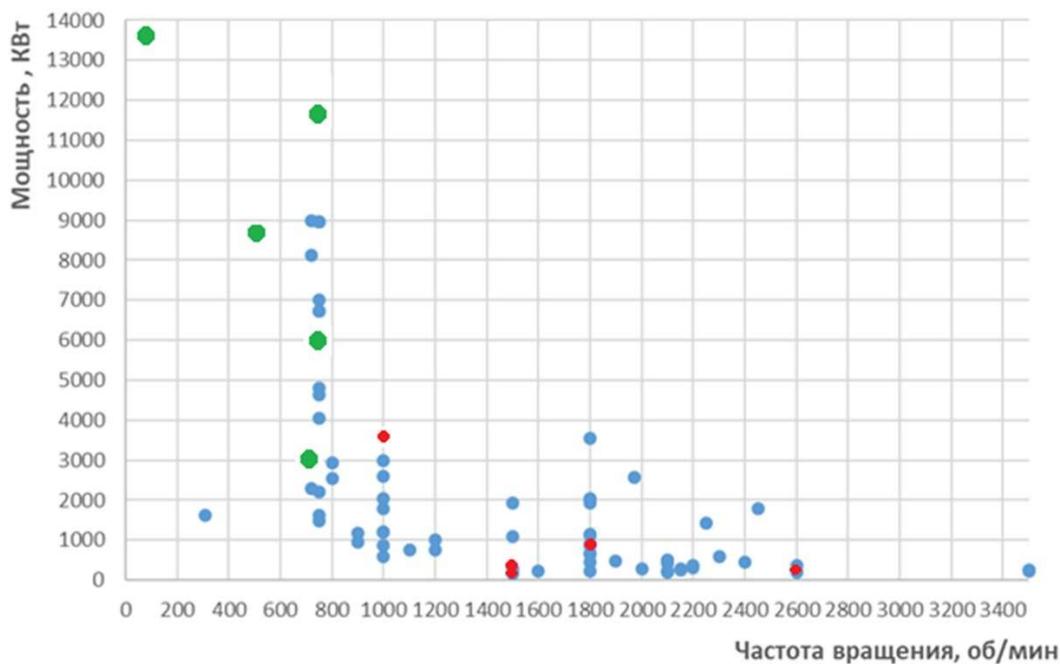


Рис. 7 Распределение мощности в зависимости от номинальной частоты вращения коленчатого вала ГД построенных судов

Все двигатели можно разделить на три основные группы, как это показано на рис. 8. Самой многочисленной группой (193 машины) явилась группа среднеоборотных двигателей мощностью до 4000 кВт в диапазоне номинальных частот от 700 до 1200 оборотов в минуту.

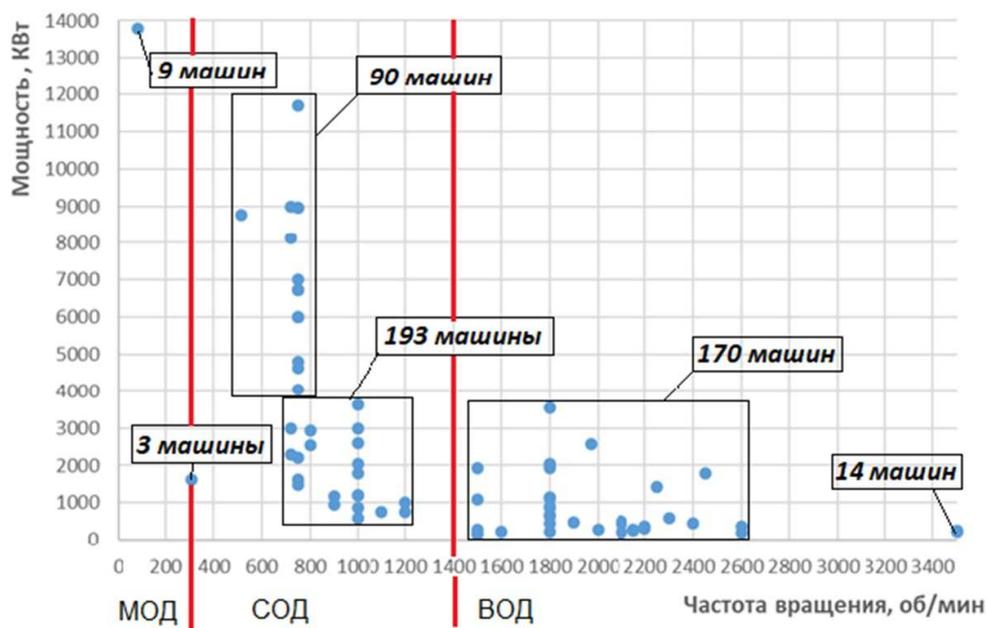


Рис. 8 Распределение по группам двигателей в зависимости от мощности и частоты вращения коленчатого вала ГД построенных судов

Согласно Правилам классификации и постройки морских судов (часть IX), приняты следующие определения: малооборотные двигатели (МОД) — двигатели с расчетной частотой вращения коленчатого вала $n_p < 300$ об/мин, среднеоборотные двигатели (СОД) — двигатели с расчетной частотой вращения коленчатого вала от 300 до 1400 об/мин, а высокооборотные двигатели (ВОД) — двигатели с расчетной частотой вращения коленчатого вала $n_p \geq 1400$ об/мин. Границы этих диапазонов на рис. 8 обозначены красными линиями, а в виде круговой диаграммы распределение поставленных двигателей по типам показано на рис. 9.

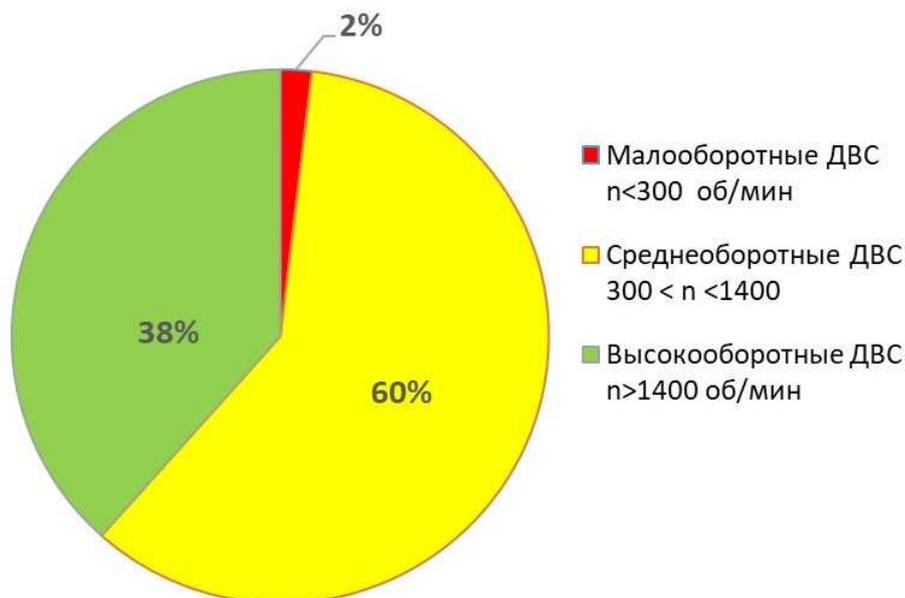


Рис. 9 Распределение по типам ДВС, установленных на судах с классом Регистра за период 2017 — 2022 гг.

Таким образом, из 479 главных судовых ДВС только 9 двигателей мощностью 13 388 кВт являются малооборотными, что составляет менее 2 % от общего числа двигателей и 4 % от числа судов, на которых они установлены. Можно сделать промежуточный вывод о том, что в отечественном судостроении произошло изменение тенденции применения МОД как основного типа главного двигателя на гражданских судах в пользу СОД. Почему приведенные данные так сильно отличаются от данных по судостроению 1980-х годов? Ниже приводятся некоторые предположения автора, объясняющие этот факт.

3. АНАЛИЗ ПРИЧИН ИЗМЕНЕНИЙ В СОСТАВЕ СЭУ ГРАЖДАНСКИХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СУДОВ

Энергетические установки с СОД и с механической или электрической передачей мощности на винт нашли применение на морских судах уже на протяжении столетия, но из-за высоких удельных расходов топлива, малой цилиндровой и агрегатной мощности, пониженных по сравнению с МОД надежности и долговечности СОД долгое время не могли конкурировать с малооборотными двухтактными крейцкопфными дизельными двигателями. Дизелестроительные фирмы на протяжении многих десятилетий работали над устранением этих недостатков. На резкое уменьшение доли МОД по сравнению с СОД и ВОД в отечественном судоходстве и судостроении оказали влияние факторы, которые во многом можно считать результатом этой работы, а также некоторые другие события, связанные с развитием судовой техники.

1. За последние 40 лет произошли серьезные изменения в экономичности среднеоборотных двигателей. Если раньше абсолютными и бесспорными чемпионами в части экономичности и расхода топлива были малооборотные ДВС, то теперь ситуация изменилась в пользу среднеоборотных. Так, например, среднеоборотный четырехтактный дизельный двигатель Wartsila 31 попал в Книгу мировых рекордов Гиннеса и удостоился звания самого экономичного в мире дизельного двигателя. Согласно данным организации World Record Academy, двигатель Wartsila 31 демонстрирует рекордно низкий показатель

потребляемого дизельного топлива — 165 г/(кВт·ч) [5]. Если для сравнения заглянуть в каталог ЦНИДИ 2009 года [6], то там обозначено, что Брянский машиностроительный завод (БМЗ) выпускал по лицензии фирмы MAN малооборотные дизельные двигатели с удельным расходом топлива 170 — 179 г/(кВт·ч). Надо сказать, что в спецификации на двигатель Wartsila 31, предоставляемой фирмой, указана иная цифра, чем в Книге рекордов Гиннеса, — 167,7 г/(кВт·ч), но это не меняет сути дела, и можно уверенно сказать, что производители современных СОД достигли экономичности МОД, сохранив при этом все преимущества по массогабаритным характеристикам и стоимости (последнее утверждение является смелым предположением автора, так как он не обладает актуальной информацией о ценах на судовые двигатели).

2. Долгое время неоспоримым подавляющим преимуществом МОД была возможность использовать тяжелое топливо, в отличие от СОД, которые, как правило, потребляли только дизельное дистиллятное топливо. В наши дни разница в цене тяжелого топлива и дизельного составляет 40 — 50 %, и этот фактор был наравне с экономичностью решающим при выборе типа двигателя. Но с конца 60-х годов прошлого столетия ведущими дизелестроительными фирмами велась интенсивная исследовательская и проектно-конструкторская работа по переводу среднеоборотных двигателей на дешевые тяжелые сорта топлива, и примерно на рубеже 90-х годов большинство производителей СОД смогли доработать свои двигатели для успешного использования тяжелых сортов топлива и это преимущество МОД было утрачено.

3. Существенно повысилась предлагаемая мощность судовых среднеоборотных двигателей. В рассматриваемой выборке самый мощный установленный на судах за рассматриваемый период СОД имеет мощность 12 700 кВт, и всего было установлено 40 таких машин. При этом самый мощный установленный МОД имел мощность 13 388 кВт (то есть мощности примерно равны), и всего их было только девять штук. Еще раз заглянув в каталог ЦНИДИ [6], можно определить, что наибольший по мощности отечественный МОД производства БМЗ, обозначенный 8L70ME-C, имел мощность 24 880 кВт. В каталоге фирмы Wartsila для наибольшего по мощности СОД 16V46TS указана мощность 20 800 кВт. Таким образом, можно считать, что, хотя цилиндровая мощность СОД по-прежнему более чем в два раза меньше, чем у МОД, в диапазоне машин до 20 МВт они будут конкурировать. При этом СОД будет иметь существенные преимущества по массогабаритным характеристикам (по массе в 2,5 — 3 раза).

4. Выигрыш в массогабаритных характеристиках СОД, помимо преимуществ при размещении двигателя в машинном отделении, дает существенные выгоды при транспортировке его на верфь и монтаже двигателя на судне. Размеры и масса среднеоборотных двигателей обычно позволяют перевозить их по железной дороге без разборки, что недоступно для МОД. Если производство МОД не находится на берегу моря или крупной реки, то нет возможности отгрузки двигателя на специально зафрахтованное судно или понтон, и МОД приходится разбирать и повторно собирать на верфи или непосредственно на судне. Помимо дополнительных затрат и увеличения трудоемкости монтажа двигателя, это приводит к потере качества стендовой сборки предприятия-изготовителя и, как показывает опыт эксплуатации МОД производства БМЗ (по данным ЦНИИМФ), повторная сборка существенно отрицательно сказывалась на надежности и частоте отказов двигателей.

5. В отечественном судостроении постоянно увеличивается доля судов, конструкция, назначение и особенности эксплуатации которых не позволяют или делают нерациональным применение МОД в качестве главного двигателя. Прежде всего к таким судам следует отнести ледоколы и суда с высоким ледовым классом (Arc 5 и выше), которые предполагают СЭУ с электродвижением. Из построенных в 2017 — 2022 годах электродвижение имеют 8,6 % судов. Поскольку сочетание МОД и электрической передачи мощности на винт является нерациональным, применение МОД для судов с высоким ледовым классом представляется малоперспективным.

6. Малооборотные двигатели были широко распространены в судостроении 1980-х годов в сочетании с винтами фиксированного и регулируемого шага. Но начиная с 1990-х годов широкое применение получило строительство судов с новым типом движителя — винторулевой колонкой (ВРК), который не может сочетаться с МОД. Тенденция по увеличению доли ВРК на строящихся судах замечена автором ранее и была более подробно показана в работе [7], где приводятся данные об изменении применяемых типов движителей среди судов, находящихся в эксплуатации на конец 2017 года.

На рис. 10 показано изменение доли различных типов движителей, применяемых на судах с классом Регистра, построенных за последние 60 лет. Из рисунка четко прослеживается тенденция уменьшения доли судов с использованием винтов фиксированного и регулируемого шага, а следовательно, и судов, на которых возможно применение МОД. Итоговой иллюстрацией этой тенденции могут служить данные о распределении построенных в 2017 — 2022 годах морских судов по типам применяемых движителей, что представлено в табл. 5.

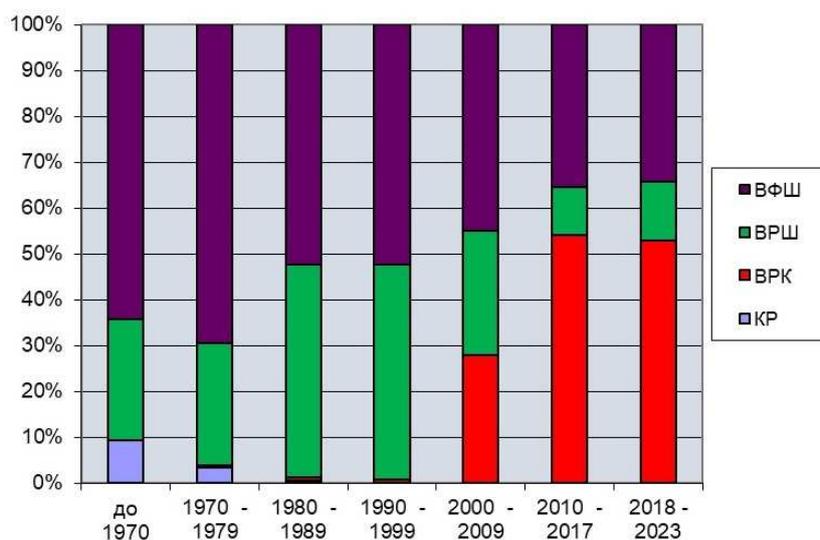


Рис. 10 Распределение судов с классом Регистра по типам движителей в зависимости от года закладки киля.
ВФШ — винт фиксированного шага; ВРШ — винт регулируемого шага;
ВРК — винторулевая колонка; КР — крыльчатый движитель

Таблица 5

Распределение судов, построенных в 2017 — 2022 гг., по типу движителя

Тип движителя	Число судов	%
Винторулевая колонка (ВРК)	122	52,6
Винт регулируемого шага (ВРШ)	30	12,9
Винт фиксированного шага (ВФШ)	79	34,1
Водомет (ВМ)	1	0,4
Итого	232	100

Стремительный рост доли судов с ВРК можно объяснить целым рядом дополнительных полезных свойств, которые получает судно: повышение управляемости, компактное расположение СЭУ на судне, массогабаритные характеристики, простота технического обслуживания. Это сочетается с целым рядом преимуществ, которые получает верфь-строитель, так как трудоемкость механомонтажных работ по сравнению с классической СЭУ значительно уменьшается, исключается монтаж дейдвудного устройства, гребных винтов и линии валопровода, отсутствует рулевое устройство. То есть по вопросу применения ВРК произошло редкое совпадение интересов судовладельцев и верфей, строящих для них суда. В результате резко вырос спрос на ВРК и существенно снизилось применение МОД.

7. Введенные ИМО в МК МАРПОЛ требования по энергоэффективности судов приводят к уменьшению расчетной скорости и, как следствие, требуемой мощности СЭУ на новых судах [8 — 10]. Эта тенденция способствует более широкому применению СОД, так как при уменьшении мощности преимущества СОД становятся очевиднее.

8. Еще одной важной причиной уменьшения доли применения МОД в мировом судостроении является очень узкий сектор применения таких машин. Помимо морского гражданского флота, МОД не используются нигде. В то же время среднеоборотные двигатели могут найти и находят применение в военно-морском флоте, а также как тепловозные и энергетические двигатели. Высокооборотные ДВС находят еще более широкое применение: кроме ВМФ, они применяются как тракторные, танковые, автомобильные, дизель-электростанции и т. п. В результате развития судовых ДВС и острой конкурентной борьбы на мировом рынке остались лишь три производителя судовых МОД-дизелей и их лицензиаты: MAN, Wartsila (Sulzer) и Mitsubishi. Область применения МОД на судах непрерывно сужается, и если тенденции не изменятся, то весьма вероятно, что производство МОД может полностью прекратиться, как это произошло с паровыми машинами, или их применение может остаться в каком-нибудь специализированном секторе, как это произошло с паровыми турбинами, которые теперь применяются только на судах с атомной паропроизводящей установкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве вывода можно сказать, что на основе анализа представленных данных организация производства малооборотных ДВС для удовлетворения нужд отечественного судостроения не представляется целесообразной, так как в предполагаемом диапазоне мощностей СЭУ до 12 МВт применение среднеоборотных двигателей перспективнее. Гораздо актуальнее развитие отечественного производства морских среднеоборотных двигателей в направлении увеличения мощности, надежности и экономичности.

Одновременно важным направлением отечественного дизелестроения может стать доработка для применения на судах российских среднеоборотных и высокооборотных ДВС общепромышленного и транспортного назначения. Зачастую необходимые доработки двигателей возможны с минимальными затратами, и специалисты Регистра готовы оказывать консультации отечественным изготовителям ДВС и проектным организациям, с тем чтобы на отечественных судах увеличивалось число двигателей, изготовленных в Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дятел Т. Большому кораблю — большой двигатель / Т. Дятел // Коммерсантъ. — № 26 от 13.02.2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> (дата обращения 09.09.2024).
2. Чижевский А. В России планируется создать производство судовых малооборотных двигателей для крупнотоннажного судостроения / А. Чижевский // Neftegaz.ru. — 13 февраля 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://neftgaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/818427> (дата обращения 09.09.2024).
3. Васькевич Ф. Главные и вспомогательные двигатели / Ф. Васькевич // Морской флот. — 2023. — № 2. — С. 30 — 33.
4. Безюков О.К. Состояние и перспективы судового двигателестроения в России / О.К. Безюков, В.А. Жуков // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 41 — 54.
5. Барановский В. В. Тенденции развития энергетических установок многоцелевых надводных кораблей отечественного и зарубежных флотов (Часть 1) / В. В. Барановский // Газотурбинные технологии. — 2021. — № 3(178). — С. 34 — 41.
6. Дизельные и газовые двигатели: каталог / ред.-сост. А.А. Сидоров. — СПб.: ЦНИДИ, 2009. — 200 с.
7. Шурпяк В. К. Современные тенденции выбора судовых движителей / В.К. Шурпяк, А.В. Серов // Актуальные проблемы морской энергетики: м-лы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 21 — 22 февраля 2019 года / СПбГМТУ. — СПб.: СПбГМТУ, 2019. — С. 109 — 113.
8. Шурпяк В.К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В.К. Шурпяк, М.С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70 — 71. — С. 29 — 36. — EDN QYFSKP.
9. Толмачев С.А. Перспективы введения мер рыночного характера по сокращению выбросов парниковых газов с судов / С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70 — 71. — С. 4 — 12. — EDN KECUTR.
10. Буянов А.С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А.С. Буянов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70 — 71. — С. 13 — 28. — EDN QJKBC.

REFERENCES

1. Diatel T. *Bol'shому korabliu — bol'shoy dvigatel'* [Big ship — big engine]. Kommersant. — № 26. — 02/13/2014. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> (accessed 09.09.2024).
2. Chizhevsky A. *V Rossii planiruetsya sozdat' proizvodstvo sudovykh malooborotnykh dvigateley dlia krupnotonnazhnogo sudostroeniya* [In Russia, it is planned to create a production of low-speed marine engines for large-tonnage shipbuilding]. Neftegaz.ru. URL: <https://neftgaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/818427> (accessed 09.09.2024).
3. Vaskevich F. *Glavnye i vspomogatel'nye dvigateli* [Main and auxiliary engines]. Marine Fleet. — 2023. — № 2. — Pp. 30 — 33.
4. Bezyukov O.K., Zhukov V.A. *Sostoyanie i perspektivy sudovogo dvigatelestroeniya v Rossii* [The state and prospects of marine engine building in Russia]. Vestnik AGTU. Ser.: Marine Engineering and Technology. — 2017. — № 2.
5. Baranovsky V.V. *Tendentsii razvitiya energeticheskikh ustanovok mnogotselnykh nadvodnykh korablye otechestvennogo i zarubezhnykh flotov (Chast' 1)* [Trends in the development of power plants of multipurpose surface ships of domestic and foreign fleets (Part 1)]. Gas turbine technologies. — 2021. — № 3(178). — Pp. 34 — 41.
6. *Dizelnye i gazovye dvigateli: katalog* [Diesel and gas engines: catalogue] / ed. and comp. by A.A. Sidorov. — St. Petersburg: TSNIDI, 2009. — 200 p.
7. Shurpyak V.K., Serov A.V. *Sovremennyye tendentsii vybora sudovykh dvizhiteley* [Modern trends in the choice of ship propulsion systems]. Actual problems of marine energy: Materials of the Eighth International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, February 21 — 22, 2019. St. Petersburg State Marine Technical University, 2019. — Pp. 109 — 113.
8. Shurpyak V.K., Bogdanov M.S. *Analiz potrebleniya al'ternativnykh vidov topliva na morskikh sudakh* [Analysis of the consumption of alternative fuels on sea-going ships]. Nauchno-tekhnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — № 70 — 71. — Pp. 29 — 36. — EDN QYFSKP.

9. Tolmachev S.A. *Perspektivy vvedeniya mer rynochnogo kharaktera po sokrashcheniyu vybrosov parnikovykh gazov s sudov* [Perspectives of the introduction of market-based measures to reduce greenhouse gas emissions in the shipping sector]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — № 70 — 71. — Pp. 4 — 12. — EDN KECUTR.
10. Buyanov A.S., Reutsky A.S. *Formirovanie metodologicheskogo podhoda k protsessu opredeleniya uglerodnogo sleda transportnoy uslugi s ispol'zovaniem koeffitsientov energoeffektivnosti sudna* [Formation of a methodology for determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2023. — № 70 — 71. — Pp. 13 — 28. — EDN QJIKBC.

УДК 621.838.21

МУФТА САМОВКЛЮЧЕНИЯ С МАГНИТНЫМ МЕХАНИЗМОМ ФАЗИРОВАНИЯ

В.А. Гулый, канд. техн. наук, ООО «КБ «Автоматика», Санкт-Петербург, e-mail: gbavladimir@yandex.ru
А.А. Смирнов, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, e-mail: smir70@mail.ru
П.В. Фетисов, директор Филиала «НТЦ СПб» ПАО «ОДК-САТУРН», Санкт-Петербург, e-mail: ya.fetisovpavel@yandex.ru

В работе представлен материал, в котором предложена новая конструкция и представлена оценка моментной характеристики муфты самовключения, имеющей существенные преимущества по сравнению с импортными муфтами аналогичного назначения. В предлагаемой муфте механизм фазирования полумуфт выполнен бесконтактным с применением системы постоянных магнитов, обеспечивающих установку зубцов против впадин вращающихся зубчатых полумуфт в процессе включения муфты.

Ключевые слова: муфта самовключения, постоянные магниты, фазирование, зубчатое зацепление, крутящий момент.

SELF-COUPLING WITH MAGNETIC PHASING MECHANISM

V.A. Guly, PhD, "Avtomatika" Design Bureau LLC, St. Petersburg, e-mail: gbavladimir@yandex.ru
A.A. Smirnov, PhD, St. Petersburg State Maritime Technical University, e-mail: smir70@mail.ru
P.V. Fetisov, Director of the Branch "STC SPB" PJSC "ODK-SATURN", St. Petersburg, e-mail: ya.fetisovpavel@yandex.ru

The paper presents a material in which a new design is proposed and an assessment of the torque characteristics of the self-coupling is presented, which has significant advantages over imported couplings of a similar purpose. In the proposed coupling, the half-coupling phasing mechanism is made contactless using a system of permanent magnets that ensure the installation of teeth against the depressions of rotating toothed half-couplings in the process of self-coupling.

Key words: self-coupling, permanent magnets, phasing, gearing, torque.

ВВЕДЕНИЕ

В активно развивающейся области отечественного энергомашиностроения, связанной с созданием мощных газотурбинных двигателей (ГТД) для комплектации компрессорных и электрогенераторных установок, актуальным является создание самосинхронизирующихся муфт сцепления на ходу (далее будем использовать термин «муфта самовключения» — МС), подключения-отключения пусковых двигателей либо двигателей валоповорота ГТД.

Для главных судовых энергоустановок, имеющих в своем составе многодвигательные приводы судовых движителей, одним из основных является требование наличия в установках муфт самовключения, позволяющих подключать и отключать на ходу к линии валопровода двигателя разных типов в зависимости от режимов эксплуатации судна.

Можно назвать множество иных областей применения самосинхронизирующихся муфт самовключения.

Здесь стоит отметить, что в мире есть авторитетные компании — создатели и производители подобных муфт, патенты на которые получены еще в 1950-х годах. Одна из самых распространенных муфт, часто называемых «муфтами SSS Clutches», запатентована и поставляется в течение многих десятилетий английской компанией SSS Gears Limited [1].

Настоящая статья посвящена рассмотрению технических решений и некоторым аспектам расчетных методик подобных муфт, но имеющих существенное отличие от муфт SSS Clutches.

Учитывая остро стоящую задачу импортозамещения во всех отраслях народного хозяйства России, инженерную основу статьи составляет запатентованная в Российской Федерации обгонная магнитная муфта [2], в которой для реализации требования самосинхронизации полумуфт используется встроенная система постоянных магнитов.

Для наглядного представления основного отличия предлагаемой к рассмотрению конструкции муфты самовключения от исполнения известной зарубежной подобной муфты [3] на рис. 1 представлены их конструктивные схемы.

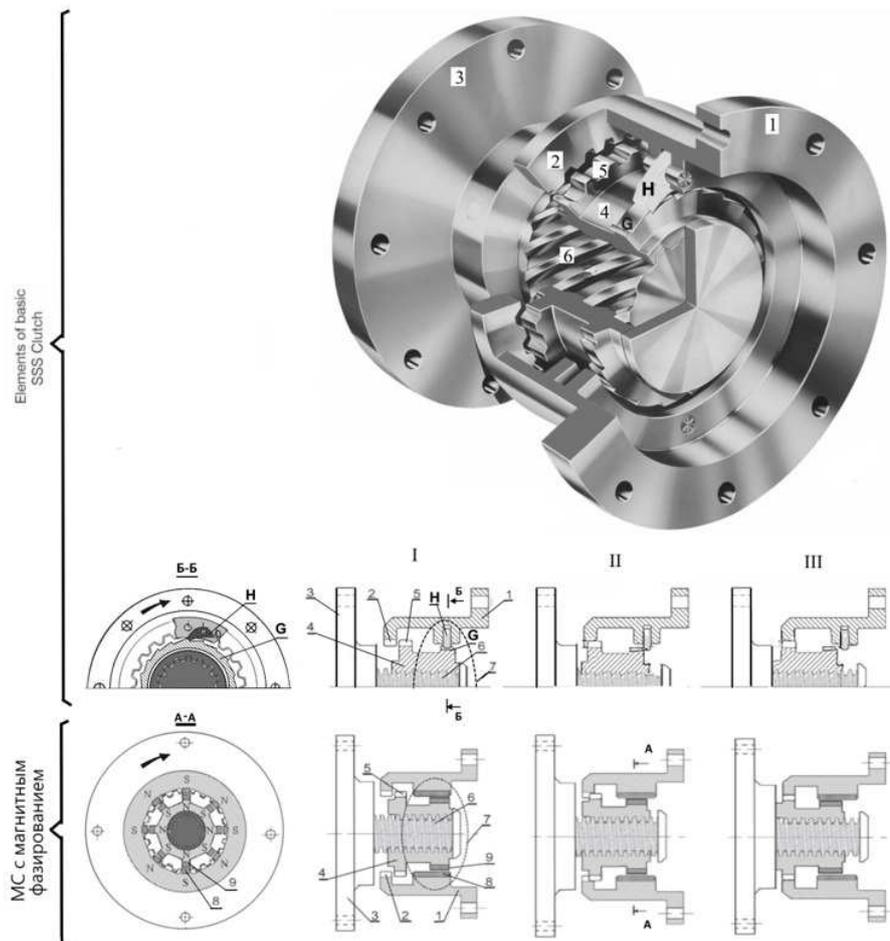


Рис. 1 Конструктивные схемы муфт самовключения:

- 1 — первый зубчатый элемент сцепления; 2 — зубчатый венец; 3 — второй элемент сцепления; 4 — промежуточный элемент;
 5 — зубчатый венец; 6 — винтовая передача; 7 — механизм фазирования; 8, 9 — постоянные магниты;
 G — звездочка и H — собачка храпового механизма;
 I — расцепленное состояние муфты; II — муфта в процессе включения; III — муфта в полностью включенном состоянии

Элементы конструкции, которые присутствуют в обеих муфтах и выполняют одинаковую функцию, на рис. 1 обозначены одинаковыми позиционными номерами.

Рассматриваемые МС имеют по две ступени, одна из которых является силовой ступенью с зубчатой прямозубой передачей, а вторая выполняет фазирующую роль и обеспечивает автоматическую установку зубцов и впадин прямозубой передачи друг против друга в процессе включения муфты.

Как видно из рис. 1, оба исполнения МС содержат первый зубчатый элемент сцепления 1, снабженный зубьями силового сцепления 2, второй элемент сцепления 3 и промежуточный элемент 4, также снабженный зубьями силового сцепления, сопрягаемыми с зубьями 2.

Со вторым элементом сцепления 3 посредством винтовой передачи с ограничением винтового перемещения относительно второго элемента сцепления 2 соединен указанный выше промежуточный элемент 4, который своим зубчатым венцом 5, перемещаясь до упора в элемент 1 по винтовой передаче 6 вдоль оси муфты, обеспечивает замыкание силовой зубчатой ступени МС.

Теперь заострим внимание на отличии рассматриваемых двух исполнений МС, которое заключается в реализации в муфтах механизма фазирования 7.

В конструкции муфты типа SSS Clutches механизм фазирования 7 выполнен в виде традиционного механического храпового механизма, собачки H которого инициируют совместно со звездочкой G угловое

фазирование зубчатых венцов первого зубчатого элемента 1 и промежуточного элемента 4, обеспечивающее угловое совпадение зубцов и впадин синхронно вращающихся сцепляемых элементов муфты.

Очевидно, что механическое исполнение фазировочного узла сопряжено со всеми недостатками, присущими подвижным контактным устройствам: технологическая сложность изготовления храпового механизма и обеспечение стабильной работы собачек механизма, необходимость дозирования подачи смазки к механизму при работе муфты в расцепленном режиме и значительной разнице в частотах вращения полумуфт, усталостные явления в храповом механизме, необходимость точной регулировки движения собачек, обеспечивающих попадание зубцов во впадины силового зубчатого зацепления.

В предлагаемой к рассмотрению МС механизм фазирования выполнен бесконтактным с применением постоянных магнитов, закрепленных на первом зубчатом элементе 1 сцепления и закрепленных на промежуточном элементе 4. Для терминологического отличия назовем рассматриваемую муфту сцепления «МС с магнитным фазированием», что отмечено на рис. 1, при этом далее в статье магнитный механизм фазирования сокращенно обозначим как ММФ.

Магнитный механизм фазирования муфты самовключения с постоянными магнитами состоит из двух вращающихся частей МС, каждая из которых содержит магнитные элементы с чередующейся на рабочих поверхностях полярностью. Магнитные полюсы, противоположные рабочим поверхностям, замкнуты ферромагнитными корпусами. ММФ относится к активным переменно-полюсным магнитным системам [4].

Конструктивная схема МС с ММФ, применительно к которой мы приведем далее некоторые результаты теоретического исследования, не вошедшего в рамки настоящей статьи, представлена на рис. 2. Для практической реализации ММФ рассмотрено использование широко распространенных постоянных анизотропных магнитов из феррита бария [5] как относительно дешевых, создающих значительные силы магнитного взаимодействия магнитных пар и имеющих высокую, до 10 лет и более, длительность стабильности магнитных характеристик.

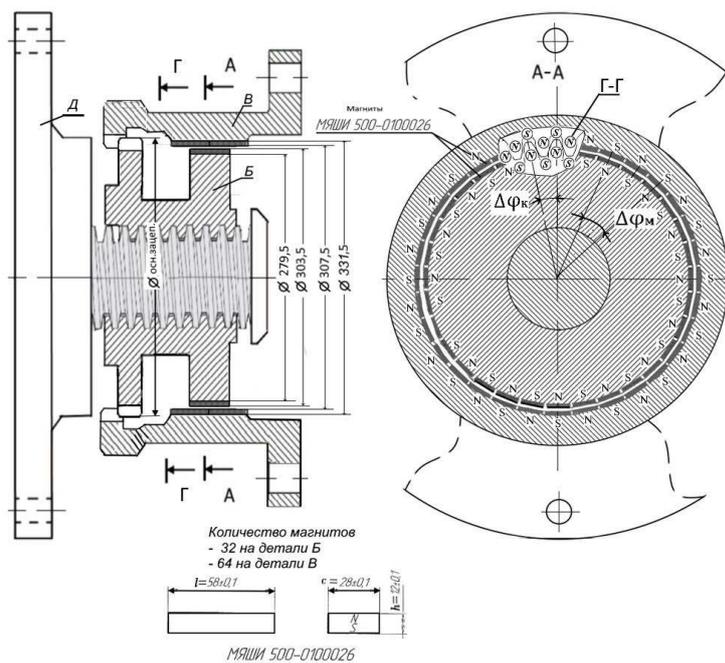


Рис. 2 Расчетная схема МС с ММФ

Кратко опишем процесс функционирования МС с ММФ для оценки излагаемого в расчетно-теоретической части статьи.

Предположим, что в исходном расцепленном состоянии элемент В сцепления вращается, а элемент Д сцепления неподвижен. При этом промежуточный элемент Б упирается в торцевой упор винта винтовой передачи и также находится в неподвижном состоянии. Закрепленные по окружности на элементе В постоянные магниты, входящие в состав ММФ, вращаются вместе с первым элементом В (назовем эти магниты внешними) и обегают неподвижные магниты элемента Д (назовем эти магниты внутренними). Магнитные силы притяжения между разнополюсными внутренними и внешними магнитами S и N на рис. 2,

возникающие в зазоре между магнитами, недостаточны для обеспечения передачи крутящего момента от элемента В к элементу Д.

Если теперь второй элемент Д муфты ускорится в том же направлении вращения, что и первый элемент В, и достигает частоты вращения элемента В, при котором осуществляется синхронное вращение элементов В и Д, внутренние и внешние магниты входят в силовое магнитное взаимодействие, которого достаточно для установки разнополюсных магнитов (N и S) друг против друга, как это показано на сечении А-А рис. 2. При этом расположенные друг против друга магниты N и S, инициируют ориентацию зубчатых венцов элементов В и Б таким образом, чтобы зубцы венца Б установились напротив впадин между зубцами венца В.

При дальнейшем возрастании частоты вращения второго элемента Д промежуточный элемент Б, удерживаемый магнитными силами магнитов механизма фазирования в режиме синфазного вращения с вращающимся элементом В муфты, начинает по винтовой передаче поступательное движение в сторону упора на втором элементе Д муфты. При достижении упора на втором элементе Д муфты промежуточным элементом Б, его зубцы точно входят во впадины между зубцами зубчатого контрвенца элемента В муфты. Процесс включения муфты автоматического сцепления на этом завершается.

Процесс автоматического отключения муфты происходит при затормаживании второго элемента Д сцепления, при котором промежуточный элемент Б двигаясь вдоль винта винтовой передачи выводит из зацепления зубчатые венцы основного зацепления. Муфта МС при этом оказывается в отключенном состоянии.

Расчетная задача применительно к ММФ состоит в определении основных параметров конструкции ММФ, силовая характеристика которой обеспечивает фазирование элементов МС.

Для расчетно-проектной оценки возможного варианта ММФ применительно к МС, обеспечивающей работу в энергоустановках с потоками мощности, достигающими сотен киловатт и более, проведен расчет конструкции ММФ, построенной на базе магнитной системы, использованной в конструкции герметичной магнитной муфты с номинальным крутящим моментом 700 Нм [6], созданной под руководством автора изобретения [2] для комплектации одного из перемешивающих химических аппаратов. Собственно расчет (в рамках настоящей статьи не приводится), выполненный путем перерасчета реальной магнитной системы с учетом фактического значения крутящего момента магнитной муфты, полученного при проведении стендовых испытаний, показал, что расчетное значение крутящего момента ММФ с ориентировочными размерами, указанными на рис. 2, составляет не менее 1000 Нм.



ВЫВОД

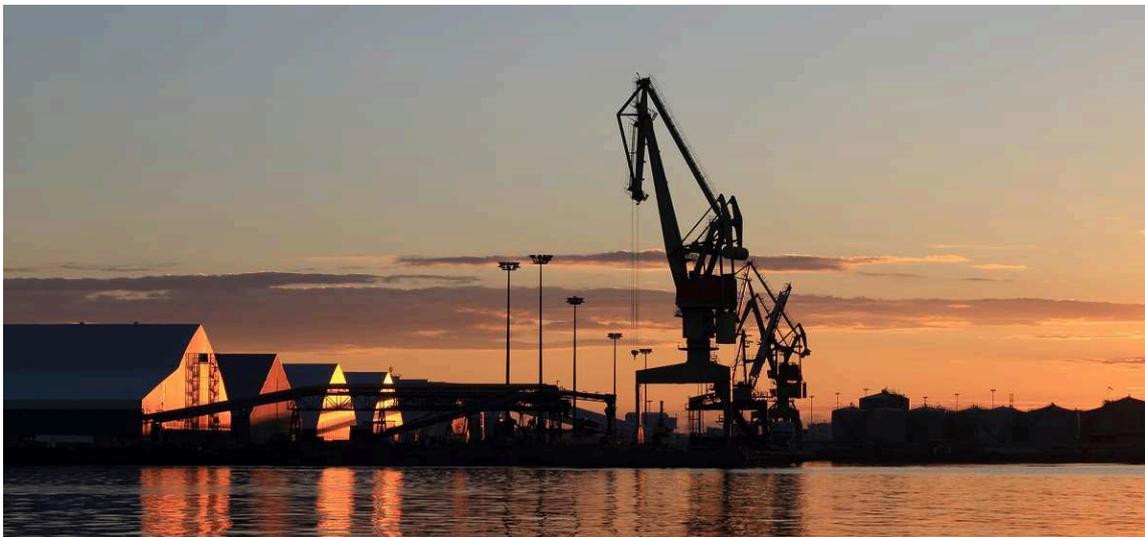
Предлагаемая в статье муфта самовключения с магнитным механизмом фазирования позволяет решить задачу обеспечения энергоустановок надежными муфтами самовключения, имеющими существенные преимущества по сравнению с импортными муфтами типа SSS Clutches.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент GB866978A, F16D23/10, Великобритания, «Храповые муфты». S.S.S. GEARS Ltd. 19 августа 1957 г. [7 ноября 1956 г.], № 34082/56. Авторы: Гарольд Синклер и Филип Джон Шорт. Текущий правопреемник: компания SSS GEARS Ltd.
2. Патент RU 2797 308 C1, F16D41/00, F16D27/01, Российская Федерация, 02 июня 2023 г. Автор и патентообладатель: Гулый Владимир Александрович.
3. Патент 3 106 276, Великобритания, «Синхронные самовключающиеся муфты». Автор: Герберт Артур Клементс, Уэйбридж, Англия; представитель S.S.S. Gears Limited Айлворт, Мидлсекс, Англия, британская компания. Подано 6 февраля 1961 года, серия № 87,212. Приоритет по заявке Великобритании от 22 февраля 1960 г.
4. Вишневский Н.Е. Машины и аппараты с герметичным электроприводом / Н.Е. Вишневский, Н.П. Глуханов, И.С. Ковалев. — Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.), 1977.
5. Постоянные магниты: справочник / под редакцией Ю.М. Пятин. М.: Энергия, 1980.
6. Евразийский экономический союз, декларация о соответствии № RU-Д-RU-АД09.В.00363, Паспорт МЯШИ 500-0000000ПС.

REFERENCES

1. Patent GB866978A, F16D23/10, Great Britain, "Ratchet couplings". S.S.S. GEARS Ltd. August 19, 1957 [November 7, 1956], No. 34082/56. Authors: Harold Sinclair and Philip John Short. The current legal successor is SSS GEARS Ltd.
2. Patent RU 2797 308 C1, F16D41/00, F16D27/01, Russian Federation, June 02, 2023. Author and patent holder: Gulyy Vladimir Alexandrovich.
3. Patent 3 106 276, United Kingdom, SYNCHRONOUS SELF-SHIFTING CLUTCHES. Author: Herbert Arthur Clements, Weybridge, England, assignor to S.S.S. Gears Limited, Isleworth, Middlesex, England, a British company. Filed Feb. 6, 1961, ser. No. 87,212 Claims priority, application Great Britain Feb. 22, 1960.
4. Vishnevsky N.E., Glukhanov N.P., Kovalev I.S. Machines and apparatus with hermetic electric drive. L.: Mashinostroenie, 1977.
5. Permanent magnets: reference book / ed. by Yu.M. Pyatin. Moscow: Energiya. 1980.
6. Eurasian Economic Union, declaration of conformity No. RU-Д-RU-АД09.В.00363, Passport of МЯШИ 500-0000000PS.



ГРУЗОПОДЪЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 656.073.23

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОГО ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Ивановская, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, e-mail: invkerch@yandex.ru

В.А. Жуков, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

Грузоподъемное оборудование морского судна играет важную роль в эксплуатации судна, выполнении его технологических операций. К такому роду оборудования относятся различные виды кранов, лебедок, конвейеров, лифтов и т. д. В большинстве случаев в их работе наблюдаются нестационарные процессы, которые непосредственно влияют на работоспособность оборудования. Среди судового грузоподъемного оборудования краны, швартовные, траловые и якорные лебедки имеют наибольшее количество отказов. Это связано с имеющей место нестационарностью нагружения, к которой относятся влияние гидrometeorологических факторов, зацепы о неровности дна, переменные характеристики буксируемого и поднимаемого груза. Для повышения надежности такого оборудования предлагается применение гидравлической адаптивной системы управления. В работе представлены этапы математического моделирования, лежащие в основе разработки такой системы управления, а также алгоритм управления, необходимый для ее программной реализации.

Ключевые слова: грузоподъемное оборудование, нестационарные процессы, система управления, алгоритм управления.

MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF THE DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR MARINE LIFTING EQUIPMENT

A.V. Ivanovskaya, PhD in Engineering, Associate Professor, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, e-mail: invkerch@yandex.ru

V.A. Zhukov, DSc, Associate Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru

The lifting equipment of a marine vessel plays an important role in the operation of the vessel, the performance of its technological operations. This kind of equipment includes various types of cranes, winches, conveyors, elevators, etc. In most cases, non-stationary processes are observed in their work, which directly affect the operability of the equipment. Cranes, mooring, trawl and anchor winches have the highest number of failures among marine lifting equipment. This is due to the unsteadiness of loading, which includes the influence of hydrometeorological factors, catching on the roughnesses of the bottom, variable characteristics of the towed and lifted cargo. To increase the reliability of such equipment, the use of a hydraulic adaptive control system is proposed. The paper presents the stages of mathematical modeling underlying the development of such a control system, as well as the control algorithm necessary for its software implementation.

Keywords: lifting equipment, non-stationary processes, control system, control algorithm.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей эксплуатации морского судна является использование оборудования и устройств обеспечения грузоподъемных работ. Научные исследования, направленные на повышение эффективности эксплуатации грузоподъемного оборудования, относятся к проблеме создания методологических основ оптимального использования средств транспорта, технической эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, изучения закономерностей изменения технического состояния средств транспорта, разработки технических средств с повышенным уровнем надежности, создания условий для высокоэффективного использования транспорта с обеспечением требований охраны труда и окружающей среды [1 — 2].

Одной из проблем, которая возникает при технической эксплуатации судового грузоподъемного оборудования, является потеря груза после обрыва троса при проведении грузоподъемных работ и ремонтно-монтажных работ в машинном отделении судна. Следствием таких аварий являются экономические потери, вызванные простоем судна во время ликвидации последствий и затратами на ремонт оборудования и элементов судна в случае их повреждения, а также человеческие жертвы и экологические катастрофы [3 — 5].

Согласно проведенному статистическому анализу, повышенному износу и выходу из строя подвержены швартовные, траловые и якорные лебедки, работа которых осуществляется в условиях переменности нагружения [6]. К таким условиям можно отнести влияние гидрометеорологических факторов, зацепы груза о неровности поверхностей дна, изменение параметров груза. Отдельное внимание следует уделять грузоподъемному оборудованию рыбопромысловых судов в виду достаточной длины троса (до 1000 м) и значительной массы буксируемого и поднимаемого груза, что также непосредственно влияет на остойчивость судна и работу энергетической установки. Необходимость улучшения динамических свойств такого оборудования также продиктована отсутствием его дублирования на судне и, как следствие, большими экономическими потерями в случае его выхода из строя из-за невозможности продолжать процесс добычи гидробионтов.

Целью работы является разработка методологических основ для создания современного грузоподъемного оборудования с повышенным уровнем надежности на примере траловой лебедки.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Проектирование технических средств основано на научно обоснованных математических моделях, адекватно описывающих динамические процессы и их характеристики (рис. 1).

Для судового грузоподъемного оборудования первичным источником энергии является главный или вспомогательный двигатель. Затем передача энергии осуществляется через электромеханический либо гидромеханический привод. С точки зрения эксплуатации электро- и гидропривод имеют равнозначные достоинства и недостатки. Выбор привода зависит от условий работы, предъявляемых требований. Однако проведенные исследования показали, что гидромеханический привод обладает наилучшими динамическими характеристиками [7]. Поэтому целесообразно использовать при создании траловой лебедки именно гидропривод. Среди различных видов гидроприводов и их систем управления оптимальным является гидропривод с регулируемым управлением по чувствительности к нагрузке (рис. 2) [8 — 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Особенностью предлагаемого гидравлического привода траловой лебедки является введение дополнительного гидромотора ГМ2, к которому, как и к основному гидромотору ГМ1, подведены магистрали: напорная и сливная, связанные с механизмом подъема через редуктор (рис. 3). При номинальном нагружении работает только основной гидромотор. Однако при внезапном росте нагружения давление на входе гидросистемы достигает значения P_4 , превышающего номинальное P_1 , срабатывает устройство управления УУ, вследствие чего рабочая жидкость поступает в рабочую камеру гидромотора ГМ2 и включает его параллельно гидромотору ГМ1. Возможность управления крутящим моментом на валу барабана и скоростью подъема достигается за счет регулирования расхода и давления рабочей жидкости.

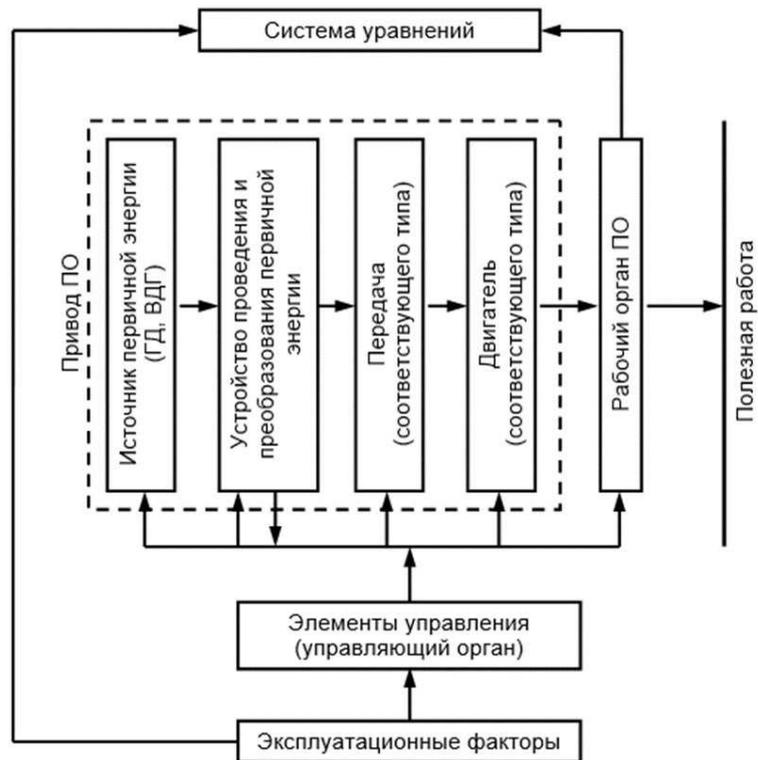


Рис. 1 Принцип моделирования эксплуатационных режимов грузоподъемного оборудования

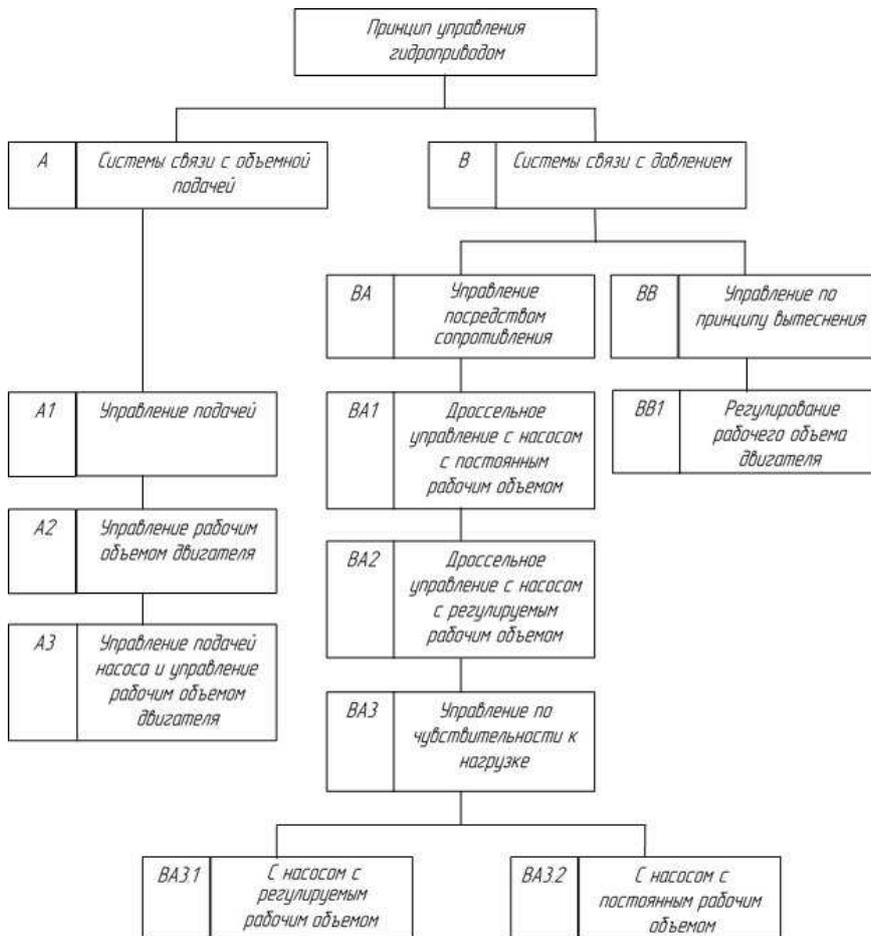


Рис. 2 Гидростатические концепции приводов

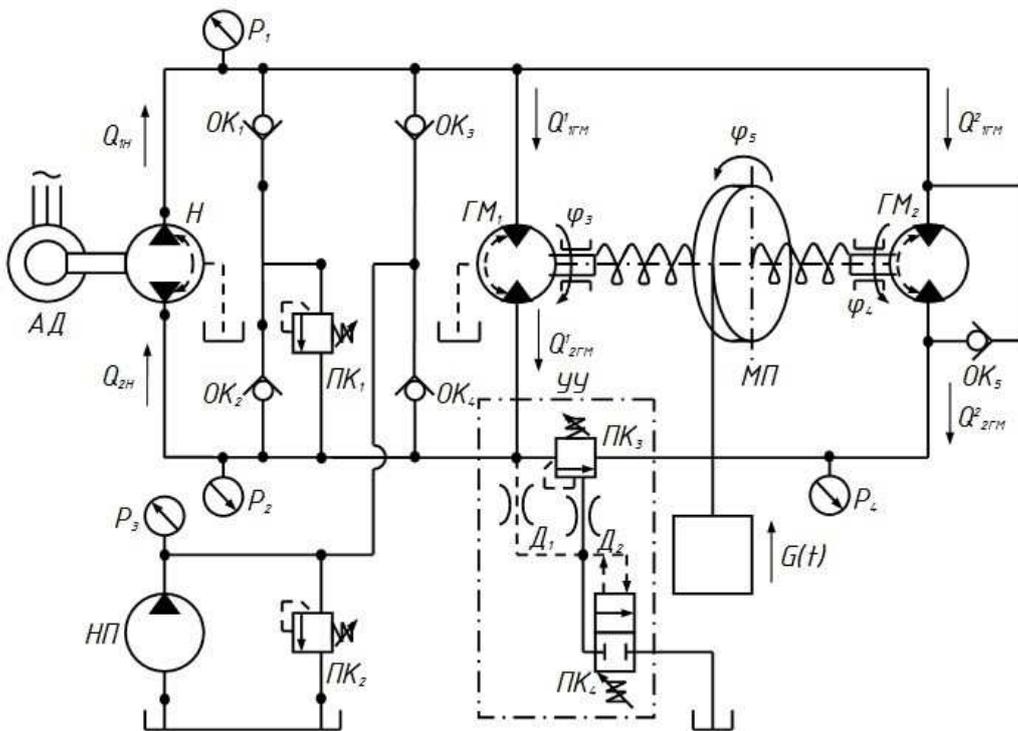


Рис. 3 Схема гидропривода траловой лебедки:

ГМ1, ГМ2 — основной и резервный гидромоторы; МП — механизм подъема; Н — насос;
 АД — асинхронный двигатель; ПК1, ПК2 — предохранительный и перепускной клапаны;
 ОК1, ОК2, ОК3, ОК4, ОК5 — обратные клапаны; НП — подпиточный насос; УУ — устройство управления

Математическую модель траловой лебедки с адаптивной системой управления составим для трехмассовой динамической модели (рис. 4), где 1 — навивочный барабан, 2 — шкив, 3 — траловая система, вес которой переменный $Q = Q(t)$ [10, 11]. Барабан приводится во вращение гидроприводом, в состав которого входит гидромотор ГМ1, создающий вращающий момент $M_{вр}$, изменяющийся по закону

$$M_{вр} = M_{01} - \chi\omega,$$

где M_{01} и χ — положительные постоянные, характеризующие гидромотор и передачу;
 ω — угловая скорость барабана.

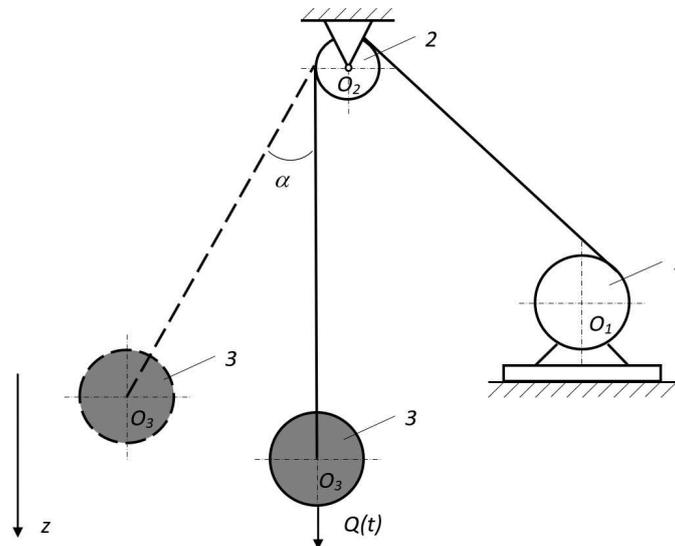


Рис. 4 Расчетная схема системы «лебедка — траловая система»

Моменты инерции барабана и шкива относительно их осей вращения равны I_1 и I_2 ; радиус барабана R , радиуса блока r .

Буксировка и/или подъем тросовой системы характеризуются переменностью нагружения: изменение массы и гидродинамического сопротивления, зацепы о преграды и неровности дна. Поэтому для обеспечения постоянной скорости и безостановочного процесса целесообразно использовать адаптивную систему управления. Тогда данный технологический процесс целесообразно разделить на три этапа:

- первый этап — разгон и выход на установившееся движение при постоянной массе Q_0 ;
- второй этап — рост нагрузки со стороны тросовой системы до значения, превышающего номинальное;
- третий этап — выравнивание движения за счет подключения второго гидромотора ГМ2.

В основе математической модели системы гидропривода тросовой лебедки лежит теорема об изменении кинетической энергии в дифференциальной форме

$$dK/dt = N^e + N^i, \quad (1)$$

где N^e и N^i — мощности всех внешних и внутренних сил, приложенных к системе.

В это уравнение не входят силы натяжения, и мощность реакции троса и других внутренних сил равна нулю, и, соответственно, $N^i = 0$.

Общая кинетическая энергия системы является суммой кинетических энергий входящих в нее элементов: барабана, шкива и тросовой системы — K_1 , K_2 и K_3 соответственно.

Барабан и шкив вращаются вокруг неподвижных осей, поэтому

$$K_1 = \frac{1}{2} I_1 \omega^2, \quad K_2 = \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} I_2 \frac{R^2}{r^2} \omega^2,$$

где ω_2 — угловая скорость шкива.

Тросовая система движется прямолинейно и поступательно со скоростью $v = R\omega$, отсюда его кинетическая энергия равна

$$K_3 = \frac{1}{2} \frac{Q(t)}{g} R^2 \omega^2.$$

Тогда общая кинетическая энергия системы будет

$$K = \frac{1}{2} I_{\text{пр}} \omega^2,$$

где $I_{\text{пр}} = I_1 + I_2 \frac{R^2}{r^2} + \frac{Q}{g} R^2$ — приведенный к оси вращения барабана момент инерции системы.

Мощность внутренних сил определим как сумму мощностей:

- силы тяжести тросовой системы

$$N_1 = Q \cdot v = Q \cdot v \cos(\pi - \alpha).$$

Так как длина троса имеет большую длину, то можно принять отклонение $\alpha = 0$, тогда получим

$$N_1 = -Q \cdot v = -QR\omega;$$

- сил, создающих вращающий момент:

$$N_2 = M_{\text{вр}} \omega = (M_{01} - \chi \omega) \omega.$$

Таким образом,

$$N^e = (M_{01} - \chi \omega - QR) \omega.$$

Учитывая все вышесказанное, получим дифференциальное уравнение движения системы «лебедка — тросовая система»

$$I_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_{01} - \chi \omega - QR. \quad (2)$$

Определим закон изменения угловой скорости барабана от времени, предварительно разделив переменные и проинтегрировав обе части. Так для первого этапа при $Q = Q_0$ получим

$$\frac{M_{01} - \chi\omega - Q_0R}{I_{\text{пр}0}d\omega} = dt - \frac{I_{\text{пр}0}}{\chi} \ln(M_{01} - \chi\omega - Q_0R) = t + C.$$

При начальных условиях для данного этапа $\omega = 0$, $t = 0$ постоянная интегрирования будет

$$C = -\frac{I_{\text{пр}0}}{\chi} \ln(M_{01} - Q_0R).$$

Тогда

$$-\frac{I_{\text{пр}0}}{\chi} \ln(M_{01} - \chi\omega - Q_0R) = t - \frac{I_{\text{пр}0}}{\chi} \ln(M_{01} - Q_0R)$$

или

$$\ln \frac{M_{01} - \chi\omega - Q_0R}{M_{01} - Q_0R} = -\frac{\chi}{I_{\text{пр}0}} t.$$

Отсюда

$$1 - \frac{\chi\omega}{M_{01} - Q_0R} = e^{-(\chi/I_{\text{пр}0})t}.$$

Следовательно, угловая скорость будет равна

$$\omega = \left(\frac{M_{01} - Q_0R}{\chi} \right) \left(1 - e^{-(\chi/I_{\text{пр}0})t} \right).$$

А траловая система движется с линейной скоростью

$$v = R \left(\frac{M_{01} - Q_0R}{\chi} \right) \left(1 - e^{-(\chi/I_{\text{пр}0})t} \right).$$

Через некоторый промежуток времени член $(1 - e^{-(\chi/I_{\text{пр}0})t})$ становится ничтожно малым, и движение траловой системы будет осуществляться практически с постоянной скоростью

$$v = R \left(\frac{M_{01} - Q_0R}{\chi} \right).$$

Дифференциальное уравнение движения траловой системы в проекции на ось z , направленную вертикально вниз, имеет вид

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dv}{dt} = T_1 - Q_0,$$

отсюда натяжение троса будет

$$T_1 = Q_0 \left(1 + \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} \right).$$

Учитывая выражение для скорости

$$\frac{dv}{dt} = R \left(\frac{M_{01} - Q_0R}{\chi} \right) \left(1 - e^{-(\chi/I_{\text{пр}0})t} \right),$$

получим

$$T_1 = Q_0 \left(1 + \frac{R}{g} \frac{M_{01} - Q_0R}{\chi} e^{-(\chi/I_{\text{пр}0})t} \right). \quad (3)$$

Процесс разгона двигателя является переходным и длится до тех пор, пока угловая скорость не достигнет 0,95 своего номинального значения. Тогда продолжительность переходного процесса будет

$$t = -\frac{I_{\text{пр}0}}{\chi} \ln(1 - \omega/\omega_{\text{уст}}) = \frac{I_{\text{пр}0}}{\chi} \ln 20 \approx \frac{3I_{\text{пр}0}}{\chi}.$$

Следовательно, установившееся натяжение троса должно быть равным

$$T_1 = Q_0 \left(1 + \frac{R}{g} \frac{M_{01} - Q_0 R}{\chi} e^{-3} \right)$$

и не превышать номинальное $T_1 < T_{\text{ном}}$.

На втором этапе за счет изменения нагружения возникает нестационарность процесса буксировки и/или подъема траловой системы. Одним из возможных условий начала второго этапа является изменение массы груза $m_3(t) = m_3^0 (1 + kt)$. С учетом этого суммарная кинетическая энергия будет

$$K = \frac{1}{4} m_{\text{пр}} R^2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2,$$

где $m_{\text{пр}} = m_1 + m_2 + 2m_3^0 (1 + kt)$ — приведенная масса системы, в которой m_1, m_2 — массы барабана и шкива соответственно.

$$\frac{1}{4} R^2 \left[2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{d^2\varphi}{dt^2} m_{\text{пр}} + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 2m_3^0 k \right] = \left[M_{01} - \chi \frac{d\varphi}{dt} - m_3^0 (1 + kt) g R \right] \frac{d\varphi}{dt}$$

или

$$\frac{1}{2} R^2 \left[m_{\text{пр}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + m_3^0 k \frac{d\varphi}{dt} \right] = M_{01} - \chi \frac{d\varphi}{dt} - m_3^0 (1 + kt) g R.$$

Приведя подобные члены, получим дифференциальное уравнение движения системы «лебедка — траловая система»

$$m_{\text{пр}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(m_3^0 k + \frac{2}{R^2} \chi \right) \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2}{R^2} M_{01} - \frac{2}{R} m_3^0 (1 + kt) g. \quad (4)$$

Учитывая, что линейная скорость движения траловой системы равна $v = \omega R = \frac{d\varphi}{dt} R$ и уравнение движения груза в проекции на ось z : $m_3^0 (1 + kt) \frac{dv}{dt} = T_2 - m_3^0 (1 + kt) g$, получим зависимость для силы натяжения троса на втором этапе

$$T_2 = m_3^0 (1 + kt) \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} R + g \right). \quad (5)$$

Условием перехода на третий этап является превышение силы натяжения до значения выше номинального $T_2 \geq T_{\text{ном}}$. После этого происходит автоматическое подключение второго гидромотора ГМ2 для выравнивания нагрузки и предотвращения обрыва троса, поломки и выхода из строя лебедки. В этом случае увеличивается вращающий момент, поступающий от гидропривода на барабан

$$M_{\text{вп}} = M_{01} + M_{02} - \chi \omega.$$

Тогда дифференциальное уравнение движения системы «лебедка — траловая система» будет иметь вид

$$m_{\text{пр}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(m_3^0 k + \frac{2}{R^2} \chi \right) \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2}{R^2} (M_{01} + M_{02}) - \frac{2}{R^2} m_3^0 (1 + kt) g. \quad (6)$$

Силу натяжения определим аналогично выражению (5)

$$T_3 = m_3^0 (1 + kt) \left(\frac{d^2\varphi}{dt^2} R + g \right).$$

Условие окончания данного этапа $T_3 < T_{\text{ном}}$. Далее в течение всего технологического процесса работа лебедки осуществляется на втором и третьем этапах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черейский И.З. Деятельность ИМО, МАКО и OCIMF по разработке требований к судовому швартовному и буксирному оборудованию и их внедрение в нормативные документы РС / И.З. Черейский, М.О. Соколов, С.В. Бродянс // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 60 — 61. — С. 29 — 36. — EDN IJQLOV.
2. Николаев Н.И. К вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации / Н.И. Николаев, Э.Л. Мышинский, М.В. Гриценко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 60 — 61. — С. 84 — 90. — EDN XAJJMX.
3. Те А.М. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств / А.М. Те. — Владивосток, 2014. — 86 с.
4. Антипов В.В. Математическое обеспечение и аппаратная реализация задач управления комплексом «рыбопромысловое судно — орудия лова» / В.В. Антипов, В.Ю. Бобрович, В.К. Болховитинов, А.А. Болисов // Морской вестник. — 2011. — № 4 (40). — С. 45 — 49.
5. Карпенко В.П. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства: учебное пособие / В.П. Карпенко, С.С. Торбан. — М.: Агропромиздат, 1990. — 464 с.
6. Ивановская А.В. Статистический анализ отказов элементов палубного оборудования рыбопромыслового судна / А.В. Ивановская, Н.П. Клименко, В.В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 440 — 448. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.
7. Ивановская А.В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна / А.В. Ивановская, В.А. Жуков, В.В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 875 — 886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.
8. Разработка изменений к требованиям РС по освидетельствованию рыболовных судов на основе анализа международных нормативных документов / А.А. Петров, Е.А. Морозова, М.С. Шилкина, Д.С. Мостовщиков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62 — 63. — С. 14 — 20. — EDN JMTBQO.
9. Ивановская А.В. Основные направления повышения эксплуатационной безопасности рыбопромыслового судна / А.В. Ивановская, С.Г. Чёрный, В.А. Жуков // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2022: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 09 — 10 ноября 2022 года / ФГБУН «Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук». — СПб.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022. — Т. 1. — С. 197 — 200.
10. Ivanovskaya A. Mathematical Modeling of Operating Modes of Deck Equipment for Fishing Vessels / A. Ivanovskaya, V. Zhukov // Transportation Research Procedia. — 2021. — Vol. 54. — Pp. 104 — 110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.
11. Ивановская А.В. Моделирование расчетных нагрузок, действующих со стороны траловой системы на лебедку рыбопромыслового судна / А.В. Ивановская, В.А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 935 — 944. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944.

REFERENCES

1. Chereysky I.Z., Sokolov M.O., Brodyans S.V. *Deyatel'nost' IMO, MAKO i OCIMF po razrabotke trebovaniy k sudovomu shvartovnomu i buksirnomu oborudovaniyu i ikh vnedrenie v normativnye dokumenty RS* [IMO, IACS and OCIMF Activity in the Development of Shipboard Mooring and Towing Equipment Requirements and their Implementation into RS Rules]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2020. — № 60 — 61. — Ss. 29 — 36. — EDN IJQLOV.
2. Nikolaev N.I., Myshinsky E.L., Gricenko M.V. *K voprosu ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh tekhnicheskikh sredstv morskikh sudov po parametram vibratsii* [Estimation of Ship's Equipment Technical Condition by Vibration Parameters]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2020. — № 60 — 61. — Ss. 84 — 90. — EDN XAJJMX.
3. Te A.M. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem i ustroystv* [Operation of ship auxiliary machinery, systems and devices]. Vladivostok, 2014.
4. Antipov V.V., Bobrovich V.Yu., Bolkhovitinov V.K., Bolisov A.A. *Matematicheskoe obespechenie i apparatnaya realizatsiya zadach upravleniya kompleksom «rybopromyslovoe sudno — orudiya lova»* [Mathematical support and hardware implementation of control tasks of the 'fishing vessel — fishing gear' complex]. Morskoy vestnik. — 2011. — № 4(40). — Pp. 45 — 49.
5. Karpenko V.P., Torban S.S. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya protsessov promyshlennogo rybolovstva* [Mechanization and automation of industrial fishery processes]. M.: Agropromizdat, 1990.
6. Ivanovskaya A.V., Klimenko NP, Popov V.V. *Statistichesky analiz otkazov elementov palubnogo oborudovaniya rybopromyslovogo sudna* [Statistical analysis of fishing vessel deck equipment elements failures]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2022. — T. 14. № 3. — Ss. 440 — 448. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.
7. Ivanovskaya A.V., Zhukov V.A. *Issledovanie dinamiki privodov gruzopodyemnykh ustroystv rybopromyslovogo sudna* [Studying dynamics of hoisting apparatus drives of a fishing vessel]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2021. — T. 13. № 6. — Ss. 875 — 886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.
8. Petrov A.A., Morozova E.A., Shilkina M.S., Mostovshnikov D.S. *Razrabotka izmeneniy k trebovaniyam RS po osvidetelstvovaniyu rybolovnykh sudov na osnove analiza mezhdunarodnykh normativnykh dokumentov* [Development of amendments to the RS requirements for certification of fishing vessels based on the analysis of international normative documents]. Nauchno-tehnichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2021. — № 62 — 63. — S. 14 — 20. — EDN JMTBQO.
9. Ivanovskaya A.V., Cherny S.G., Zhukov V.A. *Osnovnye napravleniya povysheniya ekspluatatsionnoy bezopasnosti rybopromyslovogo sudna* [Main directions of increasing the operational safety of the fishing vessel]. Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2022: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. T. 1. — SPb.: Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN, 2022. — Ss. 197 — 200.
10. Ivanovskaya A.V., Zhukov V.A. *Mathematical Modeling of Operating Modes of Deck Equipment for Fishing Vessels*. Transportation Research Procedia. — 2021. — Vol. 54. — Pp. 104 — 110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.
11. Ivanovskaya A.V., Zhukov V.A., Popov V.V. *Modelirovanie raschetnykh nagruzok, dejstvuyushchikh so storony tralovoy sistemy na lebedku rybopromyslovogo sudna* [Simulation of design loads, acting from the side of the trawl system on the fishing vessel winch]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2020. — T. 12. № 5. — Ss. 935 — 944. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944.



ПОДВОДНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

УДК 621.644.07

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА БУРДОНА И КОНЦЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ РАСЧЕТАХ ВИБРАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Д.В. Мясин, ООО «Подводные технологии и ремонт — Центр передового опыта», Санкт-Петербург, e-mail: d.myasyn@starcoe.com

А.И. Уланов, ООО «Подводные технологии и ремонт — Центр передового опыта», Санкт-Петербург, e-mail: a.ulanov@starcoe.com

А.Р. Филатов, канд. техн. наук, ООО «Подводные технологии и ремонт — Центр передового опыта», Санкт-Петербург, e-mail: a.filatov@starcoe.com

Объектами исследования являются морские подводные трубопроводы. Для обеспечения условий их безаварийной и длительной эксплуатации выполняются расчеты прочности, устойчивости и вибрации. В соответствии с требованиями Правил [1] и [2] учитывается ряд факторов и нагрузок, воздействующих на трубопровод, где обязательным является учет концевой эффекта, но требования к учету эффекта Бурдона отсутствуют. Цель состоит в сопоставлении влияния эффекта Бурдона и концевой эффекта на спектр собственных частот свободных пролетов. Для достижения поставленной цели с помощью метода конечных элементов выполнено численное моделирование свободных пролетов различной кривизны при использовании конечных элементов двух типов: пластинчатого SHELL и трубчатого PIPE. Первый позволяет напрямую учесть эффект Бурдона с концевым эффектом или без него, в то время как второй — только концевой эффект. В результате расчета статической задачи при действии внутреннего давления получена сходимость пластинчатой и трубчатой моделей по максимальным эквивалентным напряжениям, однако наблюдается большая разница по прогибам, опорным реакциям и коэффициентам запаса устойчивости, причем трубчатая модель существенно завышает последние, что говорит о нерациональности ее применения при оценке устойчивости трубопроводов высокого давления. В результате расчета модальных задач как с учетом, так и без учета начальных напряжений от внутреннего давления выявлена тенденция завышения значений собственных частот трубчатой моделью, хотя и с разницей, укладывающейся в инженерные 10 %. Поскольку применение пластинчатых конечных элементов связано с заметным повышением вычислительной сложности, что не всегда оправдано и технически осуществимо, рекомендуется в каждом конкретном случае обосновывать выбор типа элементов, что возможно как за счет сопоставительных расчетов, так и за счет коэффициентов запаса. В целом выявлено, что концевой эффект не является эквивалентной заменой эффекта Бурдона при расчетах устойчивости и вибрации трубопроводов, хотя и позволяет упростить выполнение последних за счет использования трубчатых конечных элементов.

Ключевые слова: подводный трубопровод, свободный пролет, линейная устойчивость, вихревая вибрация, усталость, эффект Бурдона, концевой эффект.

COMPARISON OF THE BOURDON EFFECT AND THE END CAP EFFECT IN PIPELINE VIBRATION ANALYSIS

D.V. Myasin, Subsea Technologies and Repair — Centre of Excellence LLC, St. Petersburg,
e-mail: d.myasin@starcoe.com

A.I. Ulanov, Subsea Technologies and Repair — Centre of Excellence LLC, St. Petersburg,
e-mail: a.ulanov@starcoe.com

A.R. Filatov, PhD, Subsea Technologies and Repair — Centre of Excellence LLC, St. Petersburg,
e-mail: a.filatov@starcoe.com

The objects of research are offshore subsea pipelines. Strength, stability and vibration calculations are performed to ensure conditions for their trouble-free and long-term operation. In accordance with the requirements of Rules [1] and [2], a number of factors and loads affecting the pipeline are considered, where it is necessary to take into account the end cap effect, but there are no requirements for taking into account the Bourdon effect. The purpose is to compare the influence of the Bourdon effect and the end cap effect on the free span natural frequency spectrum. For this purpose, using the finite element method, numerical modeling of free spans of various curvatures was performed using two types of finite elements: plate SHELL and tubular PIPE. The former allows to take into account the Bourdon effect directly with or without the end cap effect, while the latter allows to take into account only the end cap effect. As a result of the static structural analysis under the action of internal pressure, the convergence of the plate and tubular models in terms of maximum equivalent stress was obtained, but there is a large difference in deformations, support reactions and buckling eigenvalues, and the tubular model significantly overestimates the latter, which indicates the inadmissibility of its use in assessing global buckling of high pressure pipelines. As a result of the modal analysis, both taking into account and without taking into account the initial stresses from internal pressure, a tendency was revealed for the tubular model to overestimate the values of natural frequencies, although with a difference that fits within the engineering 10 %. Since the use of shell finite elements is associated with a noticeable increase in computational costs, which is not always justified and technically feasible, it is recommended in each specific case to justify the choice of the type of elements, which is possible both through comparative calculations and through safety factors. In general, it has been revealed that the end cap effect is not an equivalent replacement for the Bourdon effect when calculating pipeline buckling and vibration, although it makes it possible to simplify the implementation of the latter through the use of pipe finite elements.

Keywords: subsea pipeline, free span, eigenvalue buckling, vortex induced vibration, fatigue, Bourdon effect, end cap effect.

ВВЕДЕНИЕ

Подводные трубопроводы подвержены воздействию морского течения и волнения, которые на участках со свободными пролетами приводят к возникновению вихревой вибрации — вынужденных колебаний свободных пролетов, связанных с поочередным срывом вихрей при обтекании их водой поперек оси трубопровода (см. рис. 1). При вибрации свободных пролетов трубопровод испытывает переменные напряжения, что порождает накопление в нем усталостных повреждений. Поэтому как зарубежные классификационные общества, например DNV [1], так и Российский морской регистр судоходства [2] предусматривают расчет вихревой вибрации при оценке целостности трубопроводов в части их усталостной прочности.

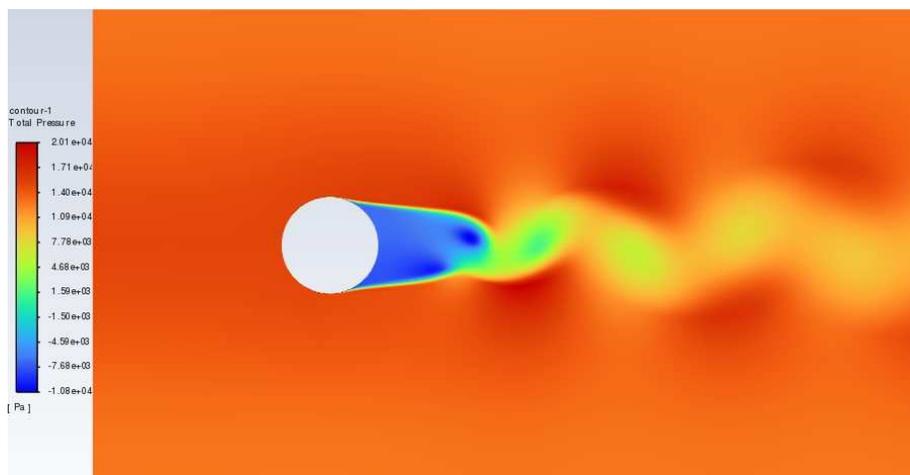


Рис. 1 Дорожка Кармана, полученная в результате расчета двумерной задачи обтекания цилиндра

Известно, что напряженно-деформированное состояние влияет на спектр собственных частот конструкции, следовательно, в расчетах вибрации свободных пролетов должны учитываться нагрузки, которые испытывает трубопровод, в частности внутреннее давление. Последнее приводит к возникновению эффекта Бурдона (манометрического эффекта) — явления, при котором на изогнутую трубу, находящуюся под внутренним давлением, действует дополнительная боковая сила, направленная наружу, ввиду неуравновешенности сил из-за большей площади на внешнем радиусе, чем на внутреннем (см. рис. 2). Очевидно, что при эффекте Бурдона боковая сила препятствует возвращению трубы в исходное состояние, что должно сказаться на вибрации свободных пролетов в сторону снижения их собственных частот.

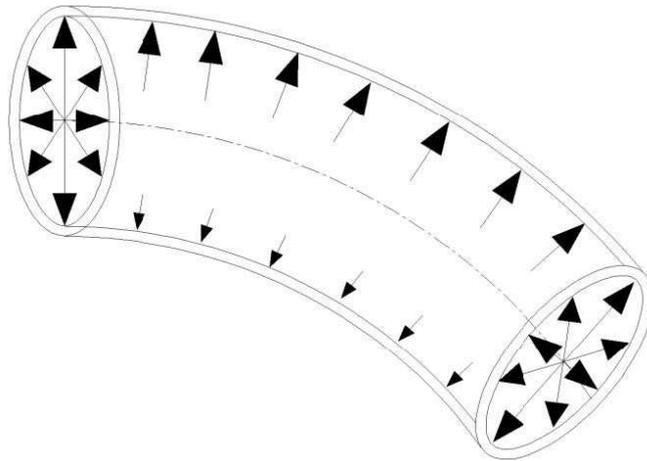


Рис. 2 Эффект Бурдона

Правила Регистра предусматривают расчеты прочности свободных пролетов на основе их численного моделирования [2]. При этом зачастую встречаются многопролетные участки, имеющие последовательности из нескольких свободных пролетов с расстояниями между ними, заметно меньшими длин пролетов (см. рис. 3). В таких случаях ввиду взаимного влияния соседних пролетов друг на друга вибрацию следует считать для всего многопролетного участка, суммарная длина которого может достигать 1 км и более. На практике численное моделирование подобного участка выполняется с помощью специальных трубчатых конечных элементов (КЭ) типа PIPE (это балочные элементы, дополненные возможностями добавления массы внутреннего флюида, его давления и температуры, а также внешней изоляции или обетонирования) и редко с помощью пластинчатых КЭ типа SHELL, поскольку их применение требует намного больших вычислительных ресурсов по сравнению с PIPE.

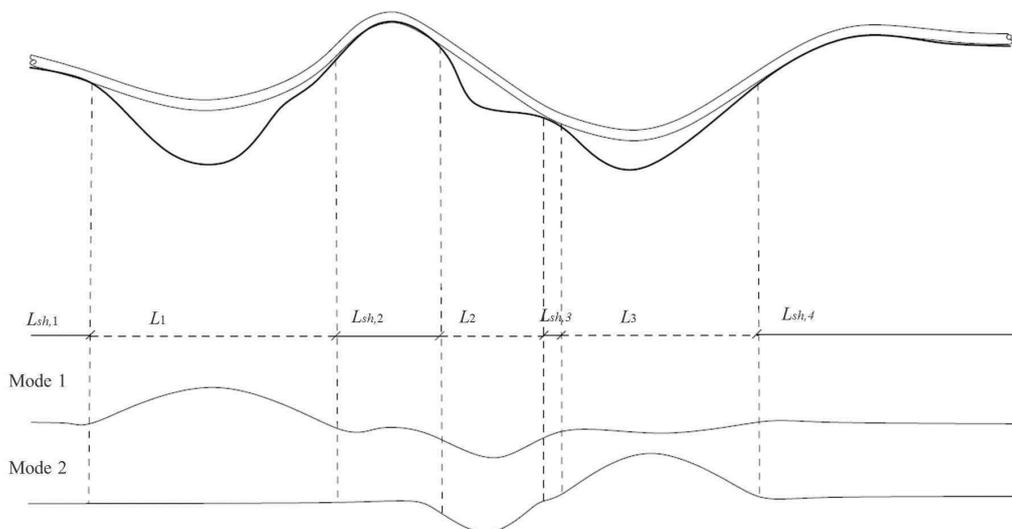


Рис. 3 Участок трубопровода с тремя последовательными свободными пролетами [3]

КЭ типа PIPE не учитывают эффект Бурдона, вместо этого в них предусмотрен учет так называемого концевой эффекта — появления осевой силы от действия внутреннего давления (сжимающей, если оба конца закреплены, и растягивающей, если хотя бы один из концов свободен). Заметим, что для трубопроводов, лежащих на грунте, концевая осевая сила компенсируется трением трубопровода о грунт, так что через несколько десятков километров ее воздействие на свободный пролет полностью пропадает. При этом Рекомендации DNV [3] предусматривают учет эффективной осевой силы [4], включающей в себя концевую силу, при расчетах собственных частот свободных пролетов вне зависимости от их удаления от концов трубопровода. Однако в работе [5] экспериментально показано, что в прямолинейной трубе с запаянными и зафиксированными торцами наличие внутреннего давления приводит к повышению значений первой (главной) собственной частоты, в то время как формула из Рекомендации DNV [3] предсказывает ее понижение.

Целью настоящей работы является сопоставление влияния эффекта Бурдона и концевой эффект на спектр собственных частот свободного пролета трубопровода.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- построены каркасные и поверхностные модели свободных пролетов с тремя различными значениями кривизны их изгиба;
- выполнено численное моделирование статической прочности, устойчивости и вибрации свободных пролетов при действии внутреннего давления в трубопроводе;
- сопоставлены результаты каркасной модели, учитывающей только концевой эффект, и поверхностной модели, напрямую моделирующей только эффект Бурдона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для тестовых расчетов выбраны свободные пролеты длиной $L=100$ м, которая заведомо больше максимально допустимой [6], с тремя значениями кривизны k : 0 (прямолинейный), 0,001 и 0,002 м^{-1} (см. рис. 4). Параметры трубопровода были приняты аналогично примеру из приложения А Рекомендаций DNV [7] (см. табл. 1). Для численного моделирования использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном комплексе Ansys. Для каждого свободного пролета были построены две конечноэлементные модели (КЭМ):

- каркасная с применением трубчатых КЭ типа PIPE288;
- поверхностная с применением пластинчатых КЭ типа SHELL181.

Во всех КЭМ характерный размер КЭ составил 100 мм. Материал трубы был принят линейным упругим.

Таблица 1

Параметры трубопровода [8]

Внешний диаметр D_o , мм	Материал	Модуль Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν	Плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Предел текучести σ_s , МПа
812,8	Сталь X65	207	0,3	7850	450



Рис. 4 Геометрические модели свободных пролетов (сверху вниз): прямолинейный, с кривизной 0,001 м^{-1} и с кривизной 0,002 м^{-1}

На обоих концах свободного пролета были заданы граничные условия (ГУ) свободного опирания (см. рис. 5a). В качестве нагрузки рассматривалось только внутреннее давление $p_i=20$ МПа (см. рис. 5b). Помимо этого, для прямолинейного свободного пролета дополнительно рассмотрен вариант учета силы тяжести: задание ускорения свободного падения g на первом шаге статической задачи с последующим приложением внутреннего давления p_i на втором шаге статической задачи.

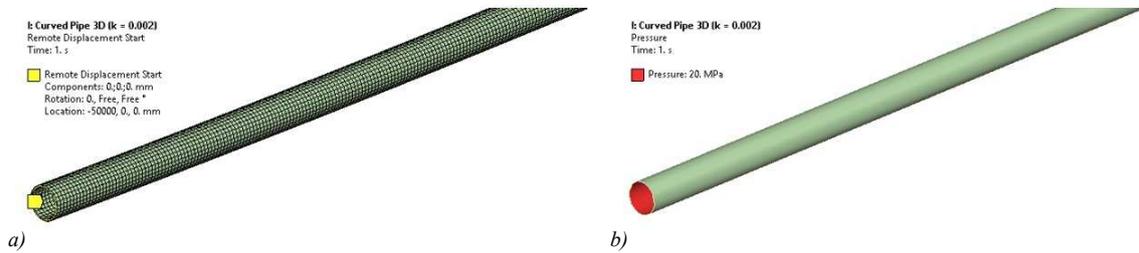


Рис. 5 ГУ свободной опоры на концах свободного пролета (a); приложение внутреннего давления (b)

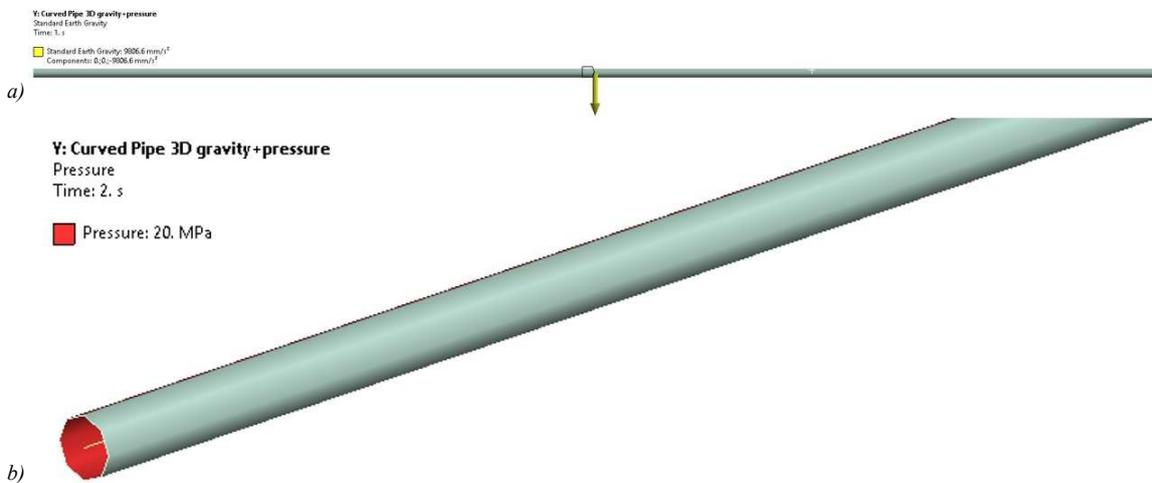


Рис. 6 Дополнительный вариант расчета прямолинейного свободного пролета:
a) — задание ускорения свободного падения g на первом шаге статической задачи;
b) приложение внутреннего давления на втором шаге статической задачи

Решение каждой задачи проводилось в два этапа: сначала выполнялся статический расчет, далее его результаты передавались в модальный расчет в качестве начальных напряжений. При этом статические расчеты выполнялись с учетом геометрической нелинейности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе были выполнены расчеты статической прочности и устойчивости свободных пролетов с кривизной $0, 0,001$ и $0,002 \text{ м}^{-1}$, результаты которых приведены в табл. 2, а для прямолинейного пролета в варианте без учета гравитации показаны на рис. 7. Как видно, по максимальным эквивалентным напряжениям разница между трубчатой и пластинчатой КЭМ невелика (за исключением случая свободного пролета с учетом гравитации), однако само напряженное состояние в этих моделях принципиально разное, что обуславливает большую разницу в прогибах, реакциях опор и коэффициентах запаса линейной устойчивости. В программном комплексе Ansys коэффициент запаса устойчивости рассчитывался согласно линейной теории Эйлера (Eigenvalue Buckling), что соответствует аналитической методике вычисления по Рекомендациям DNV [9].

Пластинчатая КЭМ находится в состоянии осевого растяжения (это видно по реакции в опоре) как в силу эффекта Пуассона:

$$\sigma_h = \frac{p_i D_i}{2t} \Rightarrow \sigma_a = \nu \sigma_h \Rightarrow F_a = \sigma_a A = \nu \frac{p_i D_i}{2t} \pi (D_o - t) t \approx \nu p_i \frac{\pi D_i^2}{2} > 0, \quad (1)$$

где σ_h — окружные напряжения;
 D_i — внутренний диаметр трубы;
 t — толщина стенки;
 σ_a — осевые напряжения;
 F_a — осевая сила от эффекта Пуассона;
 A — площадь поперечного сечения трубы;

так и в силу эффекта Бурдона:

$$\Delta F = \alpha p_i D_i (R + r_i - R + r_i) = \alpha p_i D_i^2, \quad (2)$$

где α — угловой размер свободного пролета;
 R — радиус кривизны свободного пролета;
 r_i — внутренний радиус трубы.

Трубчатая КЭМ находится в состоянии осевого сжатия (это тоже видно по реакции в опоре) именно в силу концевое эффекта:

$$R = -p_i A_i = -p_i \frac{\pi D_i^2}{4}, \quad (3)$$

где A_i — площадь проходного сечения трубы.

Прибавляя (3) к (1), получаем сжимающую осевую силу F_x в трубчатой КЭМ:

$$F_x = F_a + R = 2\nu p_i \frac{\pi D_i^2}{4} - p_i \frac{\pi D_i^2}{4} = -(1 - 2\nu) p_i A_i < 0. \quad (4)$$

Именно в силу вышеописанных причин коэффициенты запаса линейной устойчивости λ получились существенно различными, причем чем выше кривизна свободного пролета, тем больше погрешность δ трубчатой КЭМ (рис. 8), которая определялась по формуле

$$\delta = \frac{u_{pipe} - u_{shell}}{u_{shell}}, \quad (5)$$

где u_{pipe} — расчетная величина, полученная трубчатой КЭМ;
 u_{shell} — расчетная величина, полученная пластинчатой КЭМ.

Таблица 2

Результаты статических расчетов свободных пролетов

Кривизна κ , м ⁻¹	КЭМ	Реакция опоры ¹⁾ , кН	Прогиб Δz , мм	Максимальное напряжение σ_{eq} , МПа	Коэффициент запаса устойчивости λ
0,001 ²⁾ (g)	SHELL	14116	1330,0	240,84	4,238
	PIPE	6637	1337,3	212,30	5,010
	δ	—	+0,5 %	-11,9 %	+18,2 %
0	SHELL	5888,3	0	193,37	0,454
	PIPE	-3398,7	0	193,14	0,714
	δ	—	0 %	-0,1 %	+57,3 %
0,001	SHELL	9978,0	294,85	187,50	1,468
	PIPE	-222,2	231,82	190,77	7,554
	δ	—	-21,4 %	+1,7 %	+415 %
0,002	SHELL	8371,2	119,30	187,40	1,889
	PIPE	-69,3	129,02	190,06	27,048
	δ	—	+8,1 %	+1,4 %	+1332 %

¹⁾ «+» растяжение, «-» сжатие.

²⁾ Кривизна, полученная в результате приложения гравитации к прямолинейному свободному пролету.

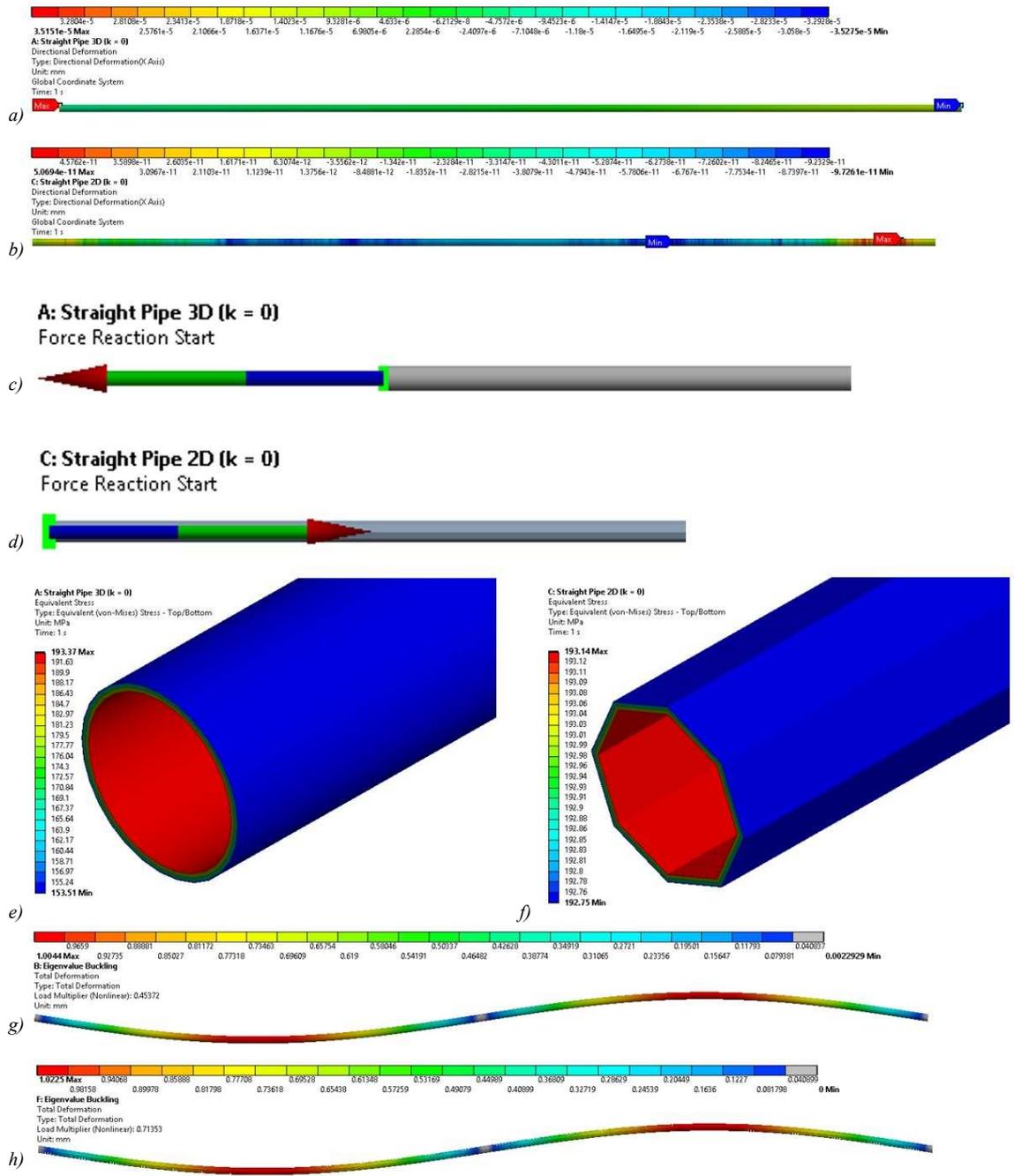


Рис. 7 Результаты статического расчета прямолинейного свободного пролета в варианте без гравитации: осевые перемещения (a — пластинчатая КЭМ, b — трубчатая КЭМ), реакция опоры (c — пластинчатая КЭМ, d — трубчатая КЭМ), эквивалентные напряжения (e — пластинчатая КЭМ, f — трубчатая КЭМ) и формы потери устойчивости (g — пластинчатая КЭМ, h — трубчатая КЭМ)

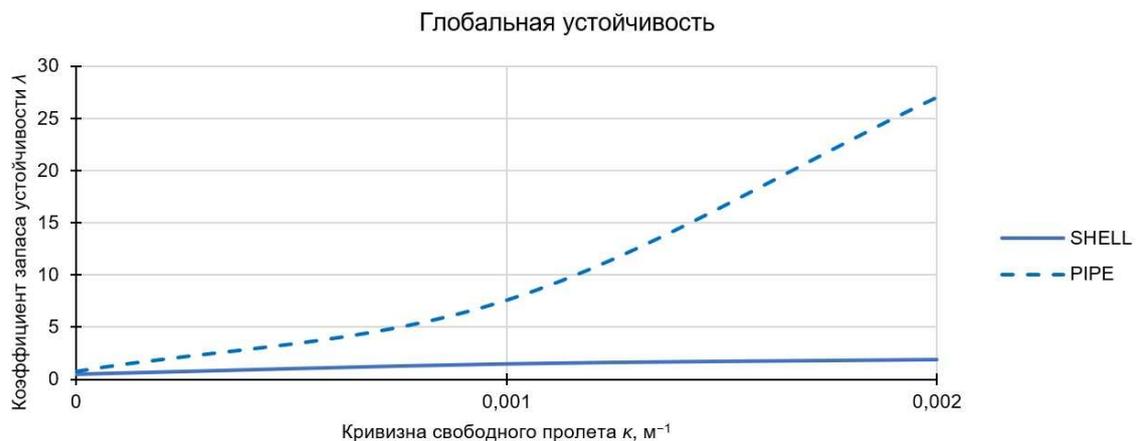


Рис. 8 Коэффициент запаса линейной устойчивости свободных пролетов разной кривизны

На втором этапе с целью установления соответствия трубчатой и пластинчатой КЭМ сначала были выполнены модальные расчеты свободных пролетов без внутреннего давления. Результаты этих расчетов приведены в табл. 3 и показаны на рис. 9, 10. Как видно, обе КЭМ дают практически одинаковые значения собственных частот вне зависимости от кривизны свободного пролета. При этом, хотя погрешность трубчатой КЭМ очень мала и не превышает 1 %, она во всех вариантах выдает чуть более высокие значения, что свидетельствует о систематическом характере ошибки и скорее всего связано большей степенью идеализации трубчатых КЭ.

Таблица 3

Результаты модальных расчетов свободных пролетов без внутреннего давления

Кривизна κ , м ⁻¹	КЭМ	f_{1L} , Гц	f_{CF1} , Гц	f_{1L2} , Гц	f_{CF2} , Гц	f_{1L3} , Гц	f_{CF3} , Гц
0,001 (g)	SHELL	0,51976	0,84443	1,2867	1,2861	2,4225	2,4241
	PIPE	0,52084	0,84506	1,2918	1,2912	2,4363	2,4378
	δ	+0,2 %	+0,1 %	+0,4 %	+0,4 %	+0,6 %	+0,6 %
0	SHELL	0,21954	0,21954	0,87763	0,87763	1,9726	1,9726
	PIPE	0,22090	0,22090	0,88301	0,88301	1,9845	1,9845
	δ	+0,6 %	+0,6 %	+0,6 %	+0,6 %	+0,6 %	+0,6 %
0,001	SHELL	0,21850	0,76089	0,87456	0,87437	1,9662	1,9839
	PIPE	0,22035	0,76160	0,88191	0,88172	1,9825	2,0000
	δ	+0,8 %	+0,1 %	+0,8 %	+0,8 %	+0,8 %	+0,8 %
0,002	SHELL	0,21734	1,4009	0,87322	0,87246	1,9646	2,0835
	PIPE	0,21869	1,4028	0,87859	0,87783	1,9764	2,0938
	δ	+0,6 %	+0,1 %	+0,6 %	+0,6 %	+0,6 %	+0,5 %

Далее выполнялись модальные расчеты свободных пролетов с напряжениями от внутреннего давления, результаты которых приведены в табл. 4 и показаны на рис. 11, 12. Нулевые значения первых собственных частот прямолинейного свободного пролета объясняются его потерей устойчивости (см. табл. 2). В данном случае разница между пластинчатой и трубчатой КЭМ становится более заметной: в некоторых вариантах погрешность последней превышает 10 %. Хотя и наблюдается зависимость от кривизны свободного пролета, все же в большинстве вариантов трубчатая КЭМ завышает значения собственных частот, что является ошибкой в опасную сторону, поскольку амплитуда и, как следствие, напряжения при вихревой вибрации в целом тем выше, чем выше приведенная скорость V_R , которая обратно пропорциональна собственной частоте f [2, 3]:

$$V_R = \frac{V_c + V_w}{fD}, \quad (6)$$

где V_c — средняя скорость морского течения поперек оси трубопровода;
 V_w — существенная скорость волнового движения частиц воды поперек оси трубопровода;
 D — внешний (гидродинамический) диаметр трубопровода.

Таблица 4

Результаты модальных расчетов свободных пролетов с внутренним давлением

Кривизна κ , м^{-1}	КЭМ	f_{H1} , Гц	f_{CF1} , Гц	f_{H2} , Гц	f_{CF2} , Гц	f_{H3} , Гц	f_{CF3} , Гц
0,001 (g)	SHELL	0,47373	0,90300	1,2166	1,2158	2,3400	2,3416
	PIPE	0,48323	0,91047	1,2325	1,2317	2,3670	2,3689
	δ	+2,0 %	+0,8 %	+1,3 %	+1,3 %	+1,2 %	+1,2 %
0	SHELL	0	0	0,48976	0,48976	1,6441	1,6441
	PIPE	0	0	0,56996	0,56996	1,7088	1,7088
	δ	0 %	0 %	+16,4 %	+16,4 %	+3,9 %	+3,9 %
0,001	SHELL	0,23115	0,92407	0,88786	0,88741	1,9803	1,9999
	PIPE	0,20299	0,88351	0,86567	0,86528	1,9673	1,9867
	δ	-12,2 %	-4,4 %	-2,5 %	-2,5 %	-0,7 %	-0,7 %
0,002	SHELL	0,17273	1,4437	0,83263	0,83174	1,9252	2,0624
	PIPE	0,21358	1,4619	0,87412	0,87315	1,9729	2,1034
	δ	+23,6 %	+1,3 %	+5,0 %	+5,0 %	+2,5 %	+2,0 %

Вибрация вдоль потока (в горизонтальной плоскости) без внутреннего давления

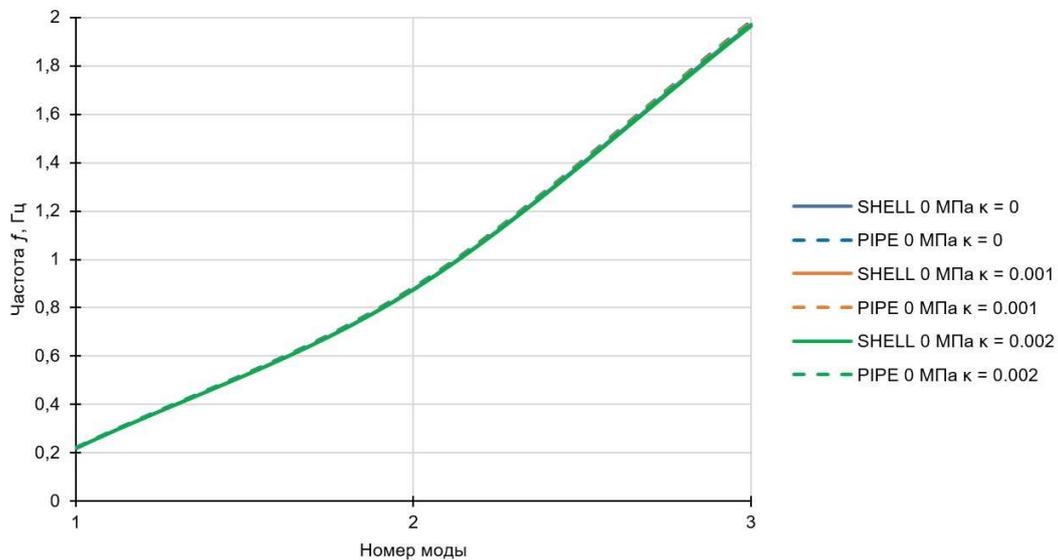


Рис. 9. Частоты 1, 2 и 3 мод вибрации свободных пролетов вдоль потока при отсутствии внутреннего давления

Вибрация поперек потока (в вертикальной плоскости) без внутреннего давления

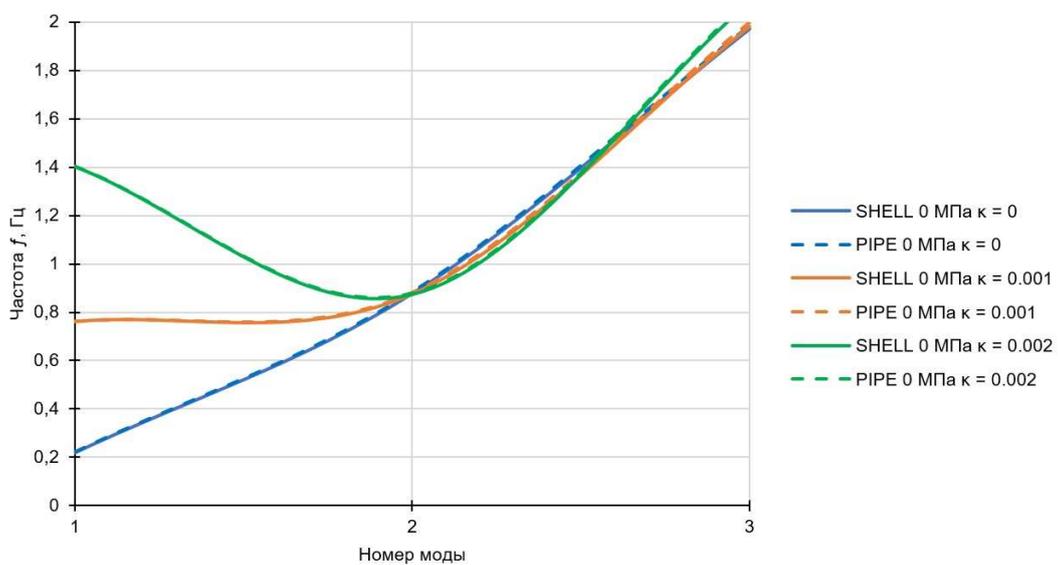


Рис. 10 Частоты 1, 2 и 3 мод вибрации свободных пролетов поперек потока при отсутствии внутреннего давления

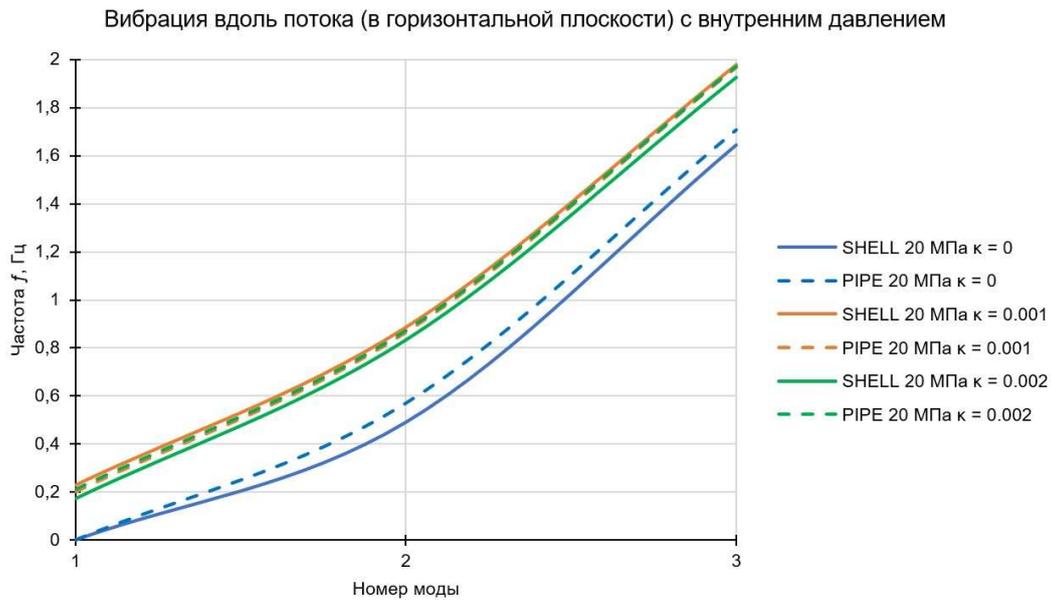


Рис. 11 Частоты 1, 2 и 3 мод вибрации свободных пролетов вдоль потока при наличии внутреннего давления

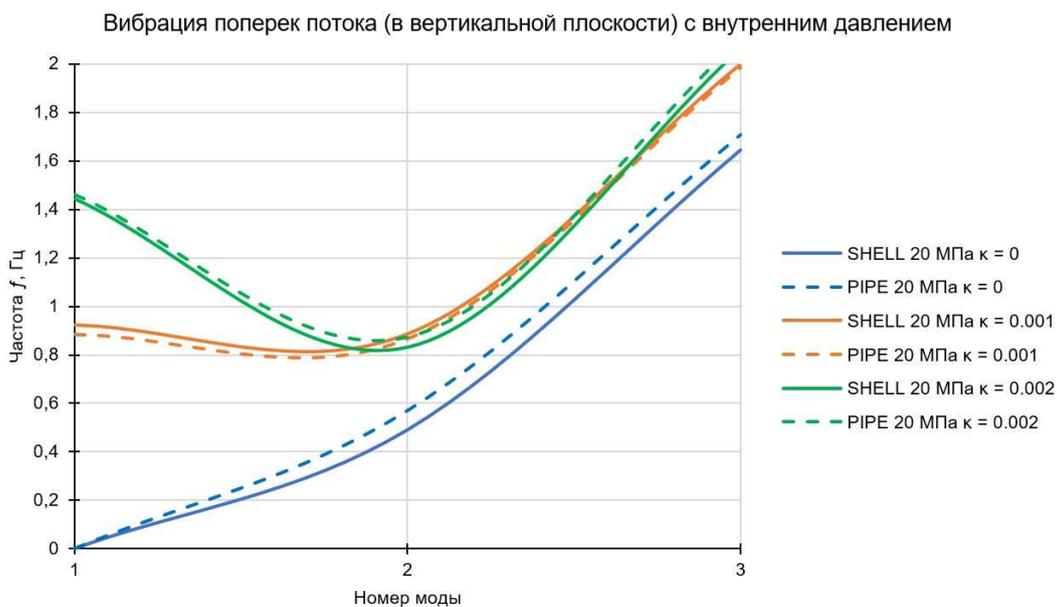


Рис. 12 Частоты 1, 2 и 3 мод вибрации свободных пролетов поперек потока при наличии внутреннего давления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью МКЭ выполнено численное моделирование статической прочности и устойчивости, а также вибрации свободных пролетов трубопровода с различной кривизной как при отсутствии, так и при наличии начальных напряжений от внутреннего давления. Для сравнения использовались два типа КЭМ: поверхностная из пластинчатых КЭ типа SHELL и каркасная из трубчатых КЭ типа PIPE. Первая напрямую моделирует эффект Бурдона, в то время как вторая может учесть только концевой эффект.

Результаты расчетов статических задач при действии внутреннего давления показали хорошую сходимость по максимальным эквивалентным напряжениям (погрешность между трубчатой и пластинчатой КЭМ составила порядка 1 %), однако наблюдается существенная разница по прогибам, реакциям опор и

коэффициентам запаса линейной устойчивости, возникающая вследствие разной физической природы эффекта Бурдона и концевго эффекта. Трубчатая КЭМ существенно завышает коэффициенты запаса устойчивости, поэтому ее применение для оценки устойчивости трубопровода [9] нерационально.

Результаты расчетов модальных задач при отсутствии внутреннего давления показали очень хорошую сходимость пластинчатой и трубчатой КЭМ вне зависимости от кривизны свободного пролета, однако последняя выдает чуть более высокие значения собственных частот, что, по всей видимости, связано с большей степенью идеализации трубчатых КЭ.

Результаты расчетов модальных задач при наличии внутреннего давления показали уже более заметное расхождение пластинчатой и трубчатой КЭМ. Хотя почти во всех вариантах погрешность последней не превышает инженерные 10 %, у нее присутствует общая тенденция завышения значений собственных частот, что является ошибкой в опасную сторону, поскольку приводит к занижению амплитуд и напряжений вихревой вибрации. Поэтому рекомендуется в каждом конкретном случае обосновывать выбор типа КЭМ, что возможно как за счет выполнения сопоставительных расчетов [10, 11], так и за счет применения коэффициентов запаса.

Результаты расчетов в целом показывают, что эффект Бурдона играет существенную роль при оценке статической устойчивости и вихревой вибрации свободных пролетов трубопроводов высокого давления, а учет концевго эффекта в таких расчетах не является его эквивалентной заменой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DNV-ST-F101 Submarine pipeline systems, Edition August 2021.
2. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2022.
3. DNV-RP-F105 Free spanning pipelines, Edition June 2017.
4. Fyrileiv O. Influence of pressure in pipeline design — effective axial force / O. Fyrileiv, L. Collberg // Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAЕ 2005). — 2005. — Pp. 629 — 636.
5. Massa A.L. The Influence of Internal Pressure on Pipeline Natural Frequency / A.L. Massa, N.S. Galgoul, N.O. Guevara, A.C. Fernandes, F.M. Coelho, S.F. da Silva Neto // Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ 2009). — 2009. — Pp. 559 — 566.
6. Авдонкин А.С. Сравнительный анализ достоверности методик определения максимальной длины свободных пролетов морских подводных трубопроводов / А.С. Авдонкин, Я.М. Любомиров, Б.А. Ярцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2016. — № 44 — 45. — С. 96 — 101.
7. DNV-RP-F101 Corroded pipelines, Edition September 2019.
8. Carino Rody P.H., Kenedi P.K., Calas Lopes Pacheco P.M. Cladded Pipes Stress Analysis / P.H. Carino Rody, P.K. Kenedi, P.M. Calas Lopes Pacheco // Proceedings of the 25th National Congress on Maritime Transportation, Ship and Offshore Construction, 2014.
9. DNV-RP-F110 Global buckling of submarine pipelines, Edition September 2019.
10. ГОСТ Р 57700.24-2020 Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис. М.: Стандартинформ, 2020.
11. ГОСТ Р 57700.25-2020 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации. М.: Стандартинформ, 2020.

REFERENCES

1. DNV-ST-F101 Submarine pipeline systems, Edition August 2021.
2. Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2022.
3. DNV-RP-F105 Free spanning pipelines, Edition June 2017.
4. Fyrileiv O., Collberg L. Influence of pressure in pipeline design — effective axial force. Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAЕ 2005). 2005. Pp. 629 — 636.
5. Massa A.L., Galgoul N.S., Guevara N.O., Fernandes A.C., Coelho F.M., da Silva Neto S.F. The Influence of Internal Pressure on Pipeline Natural Frequency // Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAЕ 2009). 2009. Pp. 559 — 566.
6. Avdonkin A.S., Lyubomirov Ya.M., Yartsev B.A. *Sravnitelny analiz dostovernosti metodik opredeleniya maksimalnoy dliny svobodnykh pereletov morskikh truboprovodov* [Comparative Analysis of Reliability Methods for Determination of the Maximum Length of Free Spans of Subsea Pipelines]. Nauchno-tekhichesky sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 2016 — No. 44 — 45. — Pp. 96 — 101.
7. DNV-RP-F101 Corroded pipelines, Edition September 2019.
8. P.H. Carino Rody, P.K. Kenedi, P.M. Calas Lopes Pacheco. Cladded Pipes Stress Analysis. Proceedings of the 25th National Congress on Maritime Transportation, Ship and Offshore Construction, 2014.
9. DNV-RP-F110 Global buckling of submarine pipelines, Edition September 2019.
10. GOST R 57700.24-2020 Computer models and simulation. Validation basis. 2020. (In Russ.)
11. GOST R 57700.25-2020 Computer models and simulation. Computer models and simulation. Validation procedures. 2020 (In Russ.)



ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ

УДК 656.61; 504.05; 34.096

ПРОБЛЕМАТИКА ВНЕДРЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНВЕНЦИИ О КОНТРОЛЕ СУДОВЫХ БАЛЛАСТНЫХ ВОД И ОСАДКОВ И УПРАВЛЕНИИ ИМИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Н.М. Яковлев, студент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», e-mail: NYakovlev1@yandex.ru

Ю.Д. Смирнов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», e-mail: smirnov_yud@pers.spmi.ru

Необработанные балластные воды грузовых судов несут опасность биологического загрязнения акваторий. Данная проблема приобрела актуальность для России в связи с присоединением к Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года. При анализе российского законодательства были выявлены возможности для улучшения нормативной базы, конкретизирующей положения данной Конвенции. Существующие локальные нормативные акты могут лечь в основу федерального законодательства, которое позволит повысить эффективность юридического механизма, регулирующего управление балластными водами, а также конкретизировать ответственность за нарушение требований Конвенции. В результате исследования были рассмотрены способы формирования федеральных и локальных нормативных актов, регулирующих управление балластными водами, описаны варианты установления ответственности за их нарушения, а также определены пути создания системы мониторинга балластных вод и портовых акваторий.

Ключевые слова: инвазивные виды, нормативная база, ответственность, Конвенция BWM, экологический мониторинг, загрязнение, балластные воды, юридические аспекты, законы, Арктика.

ISSUES OF IMPLEMENTATION OF THE REQUIREMENTS OF THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE CONTROL AND MANAGEMENT OF SHIPS' BALLAST WATER AND SEDIMENTS IN THE RUSSIAN FEDERATION

N.M. Yakovlev, student, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
e-mail: NYakovlev1@yandex.ru

Yu.D. Smirnov, PhD, associate professor, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
e-mail: smirnov_yud@pers.spmi.ru

Untreated ballast water from cargo ships poses a risk of biological pollution of water areas. This problem has become relevant for Russia in connection with its accession to the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments of 2004. When analyzing Russian legislation, opportunities were identified for improving the regulatory framework specifying the provisions of this Convention. Existing local regulations can form the basis for federal legislation, which will improve

the efficiency of the legal mechanism regulating ballast water management, as well as specify responsibility for violating the requirements of the Convention. As a result of the study, methods for developing federal and local regulations governing ballast water management were considered, options for establishing responsibility for their violations were described, and ways to create a monitoring system for ballast water and port waters were identified.

Keywords: *invasive species, regulatory framework, responsibility, BWM Convention, environmental monitoring, pollution, ballast water, legal aspects, laws, Arctic.*

ВВЕДЕНИЕ

Первое место в мировом грузообороте принадлежит морскому транспорту. Согласно расчетам Конференции ООН по торговле и развитию в период с 1980 по 2023 год совокупная провозная способность мирового флота возросла примерно с 670 млн до 2,27 млрд тонн дедвейта [1]. При этом, тенденция к росту провозной способности наблюдается с 1992 года по настоящее время [1]. За счет интенсивного развития морской транспорт стал мощным источником негативного воздействия на окружающую среду, одним из факторов которого является биологическое загрязнение акваторий балластными водами. Балластной водой называется вода с взвешенным в ней веществом, принятая на борт для контроля дифферента, крена, осадки, остойчивости или напряжений судна [2].

При заполнении балластных танков в них попадают живые организмы (планктон, мелкая рыба, бактерии и т. д.), которые затем перевозятся на большие расстояния от естественного места обитания. При сбросе балластных вод в другом порту эти организмы оказываются в нехарактерной среде обитания, где могут стать инвазивными биологическими видами. Наиболее яркими примерами биологического загрязнения акваторий являются вселение китайского мохнорукого краба (лат. *Eriocheir sinensis*) в европейские акватории (1912) [3], вселение гребневика *Mnemiopsis leidyi* в Черное море (1-я пол. 1980-х) [4], распространение речной дрейссены в системе Великих озер Северной Америки и внедрение амурской морской звезды в экосистему побережий Австралии. Все эти случаи приводили к сокращению видового разнообразия водных экосистем и существенным экономическим потерям в рыбном хозяйстве. В целях предотвращения перемещения инвазивных видов Международная морская организация (International Marine Organization, IMO) приняла в 2004 году Международную конвенцию о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими (Ballast Water Management Convention, далее — Конвенция BWM). Данный нормативный акт вступил в силу 8 сентября 2017 года. Россия ратифицировала его 24 мая 2012 года [5]. Таким образом, проблема балластных вод является актуальной для России. Целью данной работы является оценка юридических аспектов проблемы балластных вод в России, выявление проблем в законодательстве и предложение способов их решения. В задачи исследования входит анализ существующей российской нормативной базы в области управления балластными водами, а также определение ответственности, предусмотренной за нарушение требований Конвенции BWM.

1. АНАЛИЗ РОССИЙСКОЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ, РЕГУЛИРУЮЩЕЙ УПРАВЛЕНИЕ БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ

О проблеме балластных вод в России говорили еще до принятия Конвенции BWM. В исследовании Л.Д. Барина и др. (1996) отмечалась необходимость решения вопросов, связанных с контролем качества сбрасываемых балластных вод, тем более в прибрежной зоне [6]. Подчеркивалась необходимость подходить к решению экологических проблем комплексно на основе введения в отрасли актов нормативного и правового регулирования, внесения дополнений к существующим Международным конвенциям и правилам Российского морского регистра судоходства, в частности по сбросу неочищенных балластных вод в прибрежных зонах [6].

На сегодняшний день главным международным нормативным актом по управлению балластными водами и осадками является Конвенция BWM. Она задает основные принципы управления балластными водами без указания конкретных способов их соблюдения. Обязанность конкретизации данных принципов в законодательстве берет на себя каждое государство, присоединившееся к Конвенции BWM. Таким образом, ратифицировав Конвенцию BWM, Россия взяла на себя обязательства разработать нормативную базу, способствующую достижению целей Конвенции BWM согласно п. 2 ст. 4. За нарушение установленных требований в Российском законодательстве должны быть предусмотрены санкции, как требует ст. 8 Конвенции BWM. Также, согласно ст. 7, в российских портах должны находиться инспекторы организации,

уполномоченной осуществлять проверку соблюдения требований Конвенции BWM и связанных с ней национальных нормативных актов.

На данный момент основным федеральным законом, регулирующим торговое мореплавание России, является Кодекс торгового мореплавания (КТМ) [7]. С момента ратификации Россией Конвенции BWM до настоящего времени не было принято каких-либо дополнений к КТМ, нацеленных на управление балластными водами. В экологических законах, связанных с использованием водного транспорта (а именно ФЗ № 7 «Об охране окружающей среды» [8], ФЗ «О континентальном шельфе РФ» [9], ФЗ «Об исключительной экономической зоне РФ» [10], ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне РФ» [11]), а также в УК РФ [12], КоАП РФ [13] и ГК РФ [14 — 17] отсутствует какая-либо информация о балластных водах, биологическом загрязнении и инвазивных биологических видах. В Постановлении Правительства РФ от 28 марта 2012 г. № 256 [18], которым Россия ратифицировала Конвенцию BWM, также отсутствуют какие-либо национальные правила, конкретизирующие ее положения. Сброс неочищенных сточных вод с водного транспорта является нарушением ст. 92 и 116 СанПиН 2.1.3684-21 [19]. Также, согласно статье 116 приведенного документа, запрещается сброс в воду морей необеззараженных сточных вод в районах водопользования рекреационных зон и пляжей [19]. Но при этом нет уточнения, относятся ли данные требования к балластным водам.

Частично правила управления балластными водами, нацеленные на соблюдение принципов Конвенции BWM, принимаются на уровне обязательных постановлений по морским портам Российской Федерации. Как правило, в постановлениях по каждому морскому порту РФ присутствует статья «Правила обеспечения экологической безопасности, соблюдения карантина в морском порту». Например, в «Обязательных постановлениях по Большому порту Санкт-Петербург» эта статья имеет номер VII. В ней отмечаются морские районы, где можно набрать балластные воды, которые затем разрешается откачать в акватории порта [20].

Наиболее проработанная нормативная база по применению Конвенции BWM действует в морском порту Новороссийск. В 2017 году администрация морских портов Черного моря выпустила План комплексного применения Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими в морском порту Новороссийск [21]. В нем проведен анализ перемещения балластных вод по порту и описан контроль соответствия их стандартам D-1 и D-2 Конвенции BWM, а также описаны мероприятия по реализации программы «Глобалласт», разработанной ИМО [21]. Кроме того, в морском порту Новороссийск были определены места, критичные для сброса крупных объемов балластных вод [21].

Вышеописанные факты свидетельствуют о возможности улучшения российского законодательства, касающегося управления балластными водами. Для этого следует, в первую очередь, разработать и закрепить единую нормативную базу, обязательную для соблюдения на всей территории Российской Федерации. Это можно сделать путем издания поправок к КТМ или другим вышеприведенным законам, регулирующим водный транспорт. Также необходимо ввести обязательную разработку плана комплексного применения Конвенции BWM, аналогично имеющемуся в порту Новороссийск. Локальные нормативные акты в каждом порту должны разрабатываться с учетом особенностей местных климатических, гидрохимических и гидробиологических условий. Они не должны быть мягче нормативов, закрепленных в федеральных законах, но могут быть жестче их, если это целесообразно для местных условий. Также необходимо определить организации, уполномоченные на контроль соблюдения нормативов в области управления балластными водами.

2. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ, ПРЕДУСМОТРЕННАЯ ЗА НАРУШЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ КОНВЕНЦИИ BWM

В ст. 250 и 252 УК РФ предусматривается уголовная ответственность за загрязнение поверхностных вод [12]. Однако в законодательстве не уточняется, является ли загрязнением сброс живых организмов. Ст. 248 УК РФ устанавливает уголовную ответственность за нарушение правил безопасности при обращении с биологическими агентами или токсинами, если это повлекло причинение вреда здоровью человека, распространение эпидемий или эпизоотий либо иные тяжкие последствия [12]. Теоретически, данная статья может быть применена к сбросу неочищенных балластных вод, если будет доказано, что инвазия чужеродного организма, повлекшая за собой тяжкие последствия, была спровоцирована конкретным судном в конкретное время. Однако доказать подобное на практике затруднительно.

В ст. 8.13 и 8.45 КоАП РФ устанавливается административная ответственность за несоблюдение требований к охране водных объектов, которое может повлечь их загрязнение [13]. Как правило, данные статьи касаются химического или механического загрязнения водных объектов. Биологическое загрязнение балластными водами в законодательстве не определено.

На данный момент в новостях Федеральной службы по надзору в сфере природопользования фигурирует единственный случай привлечения к административной ответственности капитана судна «Oneriva 42» в соответствии с ч. 4 ст. 8.13 КоАП РФ за сброс загрязненных балластных вод в реку, который привел к изменению цветности природной воды и ее загрязнению [22]. В данном случае также идет речь только о химическом или механическом загрязнении акватории.

Исходя из рассмотренных санкций за загрязнение водных ресурсов можно сделать вывод, что на данный момент за сброс загрязненных балластных вод и биологическое загрязнение акватории ответственность не конкретизирована. При разработке законодательства в области управления балластными водами необходимо дать определение биологическому загрязнению акватории, а также приравнять сброс неочищенных балластных вод к загрязнению окружающей среды. В зависимости от тяжести последствий сброса неочищенных балластных вод для человека и окружающей среды должна быть предусмотрена административная, либо уголовная ответственность.

3. МОНИТОРИНГ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНВАЗИВНЫХ ВИДОВ И КАЧЕСТВА БАЛЛАСТНЫХ ВОД

Разработка нормативной базы и установление ответственности за нарушение законодательства в области управления балластными водами являются основными, но не единственными мерами применения Конвенции ВВМ. Поскольку даже грамотно проработанная нормативная база и передовые инженерно-технические решения не будут полностью исключать вероятность биологического загрязнения акваторий, необходимо проводить экосистемный мониторинг акваторий портов, а также мониторинг качества сбрасываемых балластных вод. По состоянию на февраль 2024 г. Российский морской регистр судоходства признал техническую компетенцию на анализ балластных вод у двух российских организаций: ФГБУ «ЧерАзтехмордирекция» (Экоаналитическая лаборатория, г. Таганрог) [23] и ООО «Судовые энергетические установки» (Ростовская область, г. Аксай) [24].

Морской порт Новороссийск обладает опытом проведения экосистемного мониторинга акватории. «С 2004 года по договору о научно-практическом сотрудничестве с Южным научным центром РАН (Ростов-на-Дону) реализуется программа экосистемного мониторинга акватории морского порта по показателям биоразнообразия в местах сброса балластных вод» [21].

Формирование системы мониторинга распространения инвазивных видов следует начинать с организации гидрохимических и гидробиологических наблюдений в акваториях всех российских портов. По возможности необходимо провести ретроспективный анализ вселения инвазивных видов в акватории каждого порта. Эти мероприятия позволят сформировать базы данных, характеризующих развитие местных экосистем, на основании которых можно будет делать выводы об эффективности применяемых методов и нормативов в сфере управления балластными водами. Также следует установить наиболее уязвимые к биологическому загрязнению зоны в пределах акватории каждого порта, в которых целесообразно проводить более детальные гидробиологические наблюдения. Систему мониторинга качества балластных вод следует начинать с организации аккредитованных экоаналитических лабораторий, имеющих свидетельство о признании Российским морским регистром судоходства, в каждом российском порту. Данная мера позволит сократить время получения результатов анализа проб, что, с одной стороны, позволит сократить время принятия решения о сбросе балластных вод, а с другой стороны — повысить достоверность результатов анализа.

Особое внимание стоит уделить экосистемному мониторингу арктических акваторий. «Для России развитие Арктики является стратегически значимой задачей ближайших десятилетий...» [25]. В связи с глобальным изменением климата в Арктике наблюдается сокращение ледового покрова, что оказывает положительное влияние на развитие грузоперевозок по Северному морскому пути. «Активно увеличиваются объемы и количество перевозок по Северному морскому пути, что потенциально повышает риски аварийных ситуаций в сложных навигационных условиях» [26]. В 2023 году был поставлен исторический рекорд объемов грузоперевозок по Северному морскому пути — 36,254 млн тонн [27]. Среди всех портов Северного морского пути выделяются 10 крупных: Мурманск, Архангельск, Нарьян-Мар, Сабетта, Игарка, Дудинка, Диксон, Тикси, Певек и бухта Провидения [28]. В таблице приведены характеристики их пропускной способности и площади акваторий.

Характеристики основных портов Северного морского пути

Порт [28]	Пропускная способность грузовых терминалов, тыс. т/год	Площадь акватории, км ²
Сабетга [29]	30 317,8	1177
Мурманск [30]	26 611,2	53,7
Архангельск [31]	11 532,9	1120
Дудинка [32]	1885	30,22
Нарьян-Мар [33]	500	0,7
Певек [34]	330	8,9
бухта Провидения [35]	320,4	0,02
Диксон [36]	120	0,182
Тикси [37]	67,0	0,036
Игарка [38]	58,9	—

На фоне глобального потепления условия обитания в арктических акваториях становятся схожими с условиями других регионов, что способствует выживанию и распространению инвазивных видов в Арктике [39]. В связи с этим необходимо внедрять инновационные технологии в области экологического мониторинга, позволяющие контролировать состояние шельфовых экосистем вблизи всех российских северных портов. «В практическом плане Арктика представляет собой уникальный объект для развития внутренних инновационных процессов» [40]. Исходя из таблицы, порты с большой пропускной способностью не всегда имеют большую акваторию. Например, морской порт Мурманск обладает схожей пропускной способностью с портом Сабетга, но при этом площадь его акватории почти в 22 раза меньше. Следовательно, формирование системы биологического мониторинга следует начинать с портов, обладающих наибольшей пропускной способностью и наименьшей площадью акватории, поскольку вероятность успешного вселения инвазивных видов в них выше.

ВЫВОДЫ

В ходе исследования российского законодательства в области управления балластными водами установлены возможности его улучшения путем закрепления некоторых локальных нормативных актов по применению Конвенции BWM на федеральном уровне, а также конкретизации ответственности за нарушения требований Конвенции BWM в целях повышения эффективности их пресечения. Немаловажной является организация мониторинга балластных вод и распространения инвазивных видов для обеспечения компетентных органов актуальной информацией об эффективности применяемых мероприятий. Для реализации описанных возможностей предлагается установить единые, обязательные для исполнения на всей территории России национальные правила по применению Конвенции BWM путем издания дополнений к КТМ или иным федеральным законам, регулирующим морской транспорт. Для учета особенностей местных условий необходимо в обязательном порядке разработать локальные нормативные акты, регулирующие управление балластными водами в каждом порту, по образцу нормативной базы порта Новороссийск. Также необходимо конкретизировать уголовную и административную ответственность за нарушение законодательства в области управления балластными водами. В целях выявления нарушений требований Конвенции BWM и их последствий необходимо организовать в каждом порту аккредитованные экоаналитические лаборатории, а также разработать и внедрить методики проведения экосистемного мониторинга акваторий портов, в особенности, в арктической зоне РФ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (шифр № FSRW-2024-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор морского транспорта. 2023 год. Общий обзор. Конференция Организации объединенных наций по торговле и развитию. — Женева, 2023. — С. 9 — 10. [Электронный ресурс]. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023overview_ru.pdf (дата обращения 11.02.2024).
2. Международная морская организация. Конвенции. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года : BWM Convention : принята IMO 13 февр. 2004 г. — 4 Albert Embankment, London SE1 7SR, United Kingdom, 2004. — 127 с.
3. Дроздов В.В. Разработка и анализ показателей трансграничного биологического загрязнения балластными водами судов экосистемы Балтийского моря / В.В. Дроздов, Г.Т. Фрумин, А.В. Косенко, А.С. Боев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2012. — № 26. — С. 172 — 189.
4. Востоков С.В. Гребневик *Vergee cf. ovata* в Каспийском море. Начало нового этапа эволюции Каспийской экосистемы? / С.В. Востоков, А.А. Гаджиев, А.С. Востокова, Н.И. Рабазанов // Юг России: экология, развитие. — 2020. — Т.15, № 4. — С. 21 — 35.
5. Status of IMO Treaties. — 29 September 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/About/Conventions/StatusOfConventions/Status%20-%202021.pdf> (дата обращения 11.02.2024).
6. Барина Л.Д. Влияние судоходства на изменение биологического разнообразия / Л.Д. Барина, Л.С. Кейзер, Г.А. Лемеш // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 1996. — № 19. — С. 200 — 203.
7. Российская Федерация. Законы. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации : Федеральный закон N 81-ФЗ : Принят Государственной Думой 31 марта 1999 г. : одобрен Советом Федерации 22 апреля 1999 г. : ред. от 1 января 2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901732423> (дата обращения 28.02.2024).
8. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды : Федеральный закон N 7-ФЗ : Принят Государственной Думой 20 декабря 2001 г. : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г. : ред. от 1 января 2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения 28.02.2024).
9. Российская Федерация. Законы. О континентальном шельфе Российской Федерации : Федеральный закон N 187-ФЗ : Принят Государственной Думой 25 октября 1995 г. ред. от 19 октября 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9014792> (дата обращения 28.02.2024).
10. Российская Федерация. Законы. Об исключительной экономической зоне Российской Федерации : Федеральный закон N 191-ФЗ : Принят Государственной Думой 18 ноября 1998 г. : одобрен Советом Федерации 2 декабря 1998 г. : ред. от 28 июня 2022 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901722706> (дата обращения 28.02.2024).
11. Российская Федерация. Законы. О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации : Федеральный закон N 155-ФЗ : Принят Государственной Думой 16 июля 1998 г. : одобрен Советом Федерации 17 июля 1998 г. : ред. от 19 октября 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901714424> (дата обращения 28.02.2024).
12. Российская Федерация. Законы. Уголовный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон N 63-ФЗ : Принят Государственной Думой 24 мая 1996 г. : одобрен Советом Федерации 5 июня 1996 г. : ред. от 25 декабря 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/ (дата обращения 12.02.2024).
13. Российская Федерация. Законы. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях : Федеральный закон N 195-ФЗ : Принят Государственной Думой 20 декабря 2001 г. : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г. : ред. от 05.01.2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807667> (дата обращения 12.02.2024).
14. Российская Федерация. Законы. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть первая : Федеральный закон N 51-ФЗ : Принят Государственной Думой 21 октября 1994 г. : ред. от 1 октября 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9027690> (дата обращения 28.02.2024).
15. Российская Федерация. Законы. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть вторая : Федеральный закон N 14-ФЗ : Принят Государственной Думой 22 декабря 1995 г. : ред. от 12 сентября 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9027703?marker=7D20K3> (дата обращения 28.02.2024).
16. Российская Федерация. Законы. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть третья : Федеральный закон N 146-ФЗ : Принят Государственной Думой 1 ноября 2001 г. : одобрен Советом Федерации 14 ноября 2001 г. : ред. от 4 августа 2023 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901799839/titles/64U0IK> (дата обращения 28.02.2024).
17. Российская Федерация. Законы. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть четвертая : Федеральный закон N 230-ФЗ : Принят Государственной Думой 24 ноября 2006 г. : одобрен Советом Федерации 8 декабря 2006 г. : ред. от 30 января 2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902019731> (дата обращения 28.02.2024).
18. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 марта 2012 г. N 256 «О присоединении Российской Федерации к Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902338489> (дата обращения 28.02.2024).
19. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177> (дата обращения 27.03.2024).
20. Приказ № 45829 от 3 мар. 2017 г. об утверждении Обязательных постановлений в морском порту «Большой порт Санкт-Петербург» / Министерство транспорта Российской Федерации. — 54 с.
21. План комплексного применения международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управления ими в морском порту Новороссийск. Утвержден руководителем ФГБУ «Администрация морских портов Черного моря» В.В. Ерыгиним 25.11.2017. Согласован капитаном морского порта Новороссийск Е.В. Тузинкевичем 24.11.2017. — Новороссийск, 2017. — 46 с.
22. Росприроднадзор выявил факт загрязнения акватории р. Дон в районе морского порта Азов [Электронный ресурс]. URL: https://rpn.gov.ru/news/rosprirodnadzor_vyyavil_fakt_zagryazneniya_akvatorii_r_don_v_rayone_morskogo_porta_azov/?sphrase_id=1251677 (дата доступа 24.02.2024).

23. Свидетельство о признании испытательной лаборатории №17.60014.185. Дата выдачи: 14.07.2017. Утверждено руководителем Новороссийского филиала Российского морского регистра судоходства Есипенко И.В. [Электронный ресурс]. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getIndustry?d=E4D33633-8CC5-6401-8C28-F0F2D66492F4> (дата доступа 12.02.2024).
24. Свидетельство о признании испытательной лаборатории №19.70190.185. Дата выдачи: 21.08.2019. Утверждено руководителем Новороссийского филиала Российского морского регистра судоходства Есипенко И.В. [Электронный ресурс]. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getIndustry?d=463A704D-5F60-6D34-7BCB-B0116DA0E8E4> (дата доступа 12.02.2024).
25. Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 463 — 479. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
26. Васильева Ж.В. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории / Ж.В. Васильева, М.В. Васеха, В.С. Тюляев // Записки Горного института. — 2023. — Т. 264. — С. 856 — 864. DOI: 10.31897/PMI.2023.14.
27. Исторический рекорд Севморпути: объем грузоперевозок за 2023 год превысил 36,254 млн тонн [Электронный ресурс]. URL: <https://rosatom.ru/journalist/news/-istoricheskiy-rekord-sevmorputi-obem-gruzoperevozok-za-2023-god-prevysil-36-254-mln-tonn/> (дата обращения 03.04.2024).
28. Вехи большого пути. Северный морской путь и его главные порты [Электронный ресурс]. URL: <https://arctic-russia.ru/article/vekhi-bolshogo-puti/> (дата обращения 29.02.2024).
29. Морской порт Сабетта [Электронный ресурс]. URL: https://rosatomport.ru/port_sabetta (дата обращения 03.04.2024).
30. Мурманский филиал. Морские порты [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/mur_seaports/ (дата обращения 03.04.2024).
31. Архангельский филиал. Морские порты [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/arh_seaports/ (дата обращения 03.04.2024).
32. Морской порт Дудинка [Электронный ресурс]. URL: https://rosatomport.ru/port_dudinka (дата обращения 03.04.2024).
33. Морской порт Нарьян-Мар [Электронный ресурс]. URL: <https://polartrans.ru/information/morskoj-port-naryan-mar.html> (дата обращения 03.04.2024).
34. Северо-Восточный бассейновый филиал. Морские порты [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/vaf_seaports/ (дата обращения 03.04.2024).
35. Распоряжение № СГ-167-р от 29 апр. 2014 г. О внесении сведений о морском порте Провидения в Реестр морских портов Российской Федерации / Федеральное агентство морского и речного транспорта. — 5 с.
36. Морской порт Диксон [Электронный ресурс]. URL: <https://polartrans.ru/information/morskoj-port-dikson.html> (дата обращения 03.04.2024).
37. Морской порт Тикси [Электронный ресурс]. URL: <https://polartrans.ru/information/morskoj-port-tiksi.html> (дата обращения 03.04.2024).
38. Порт Игарка [Электронный ресурс]. URL: <https://ecoshp.ru/blog/port-igarka/> (дата обращения 03.04.2024).
39. Xinli Qi. Environmental impacts of Arctic shipping activities: a review / Xinli Qi, Zhenfu Li, Changping Zhao, Qiqi Zhang, Yutao Zhou // Ocean & Coastal Management. — 2024. — Vol. 247. 106936. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106936.
40. Алексеева М.Б. Системная диагностика стратегии развития промышленности Арктики / М.Б. Алексеева, В.Ф. Богачев, М.А. Горенбургов // Записки Горного института. — 2019. — Т. 238. — С. 450-458. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.450.

REFERENCES

1. Maritime Transport Review. 2023. General review. United Nations Conference on Trade and Development. — Geneva, 2023. — Pp. 9 — 10. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023overview_ru.pdf (accessed 11.02.2024).
2. International Maritime Organization. Convention. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004, accepted IMO 13 Feb. 2004. — 4 Albert Embankment, London SE1 7SR, United Kingdom, 2004. — 127 p.
3. Drozdov V.V., Frumin G.T., Kosenko A.V., Boev A.S. *Razrabotka i analiz pokazateley transgranichnogo biologicheskogo zagryazneniya ballastnymi vodami sudov ekosistemy Baltijskogo morya* [Development and analysis of indicators of transboundary biological pollution from ballast water of ships in the Baltic Sea ecosystem] // Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. — 2012. — № 26. — Pp. 172 — 189.
4. Vostokov S.V., Gadzhiev A.A., Vostokova A.S., Rabazanov N.I. *Grebnevik Beroe cf. ovata v Kaspiyskom more. Nachalo novogo etapa evoljutsii Kaspiyskoy ekosistemy?* [Ctenophore *Beroe cf. ovata* in the Caspian Sea. The beginning of a new stage in the evolution of the Caspian ecosystem?] // Yug Rossii: ecology, razvitie. — 2020. — Т. 15, № 4. — Pp. 21 — 35.
5. Status of IMO Treaties. — 29 September 2021. URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/About/Conventions/StatusOfConventions/Status%20-%202021.pdf> (accessed 11.02.2024).
6. Barinova L.D., Kejzer L.S., Lemesh G.A. *Vliyaniye sudokhodstva na izmeneniye biologicheskogo raznoobraziya* [Impact of shipping on changes in biodiversity] // Nauchno-tekhnicheskyy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. — 1996. — № 19. — Pp. 200 — 203.
7. Russian Federation. Laws. Code of Merchant Shipping of the Russian Federation: Federal Law N 81-FZ : Adopted by the State Duma on March 31, 1999 : approved by the Federation Council on April 22, 1999 : ed. from January 1, 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901732423> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
8. Russian Federation. Laws. On environmental protection: Federal Law N 7-FZ : Adopted by the State Duma on December 20, 2001 : approved by the Federation Council on December 26, 2001 : ed. from January 1, 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
9. Russian Federation. Laws. On the continental shelf of the Russian Federation: Federal Law N 187-FZ : Adopted by the State Duma on October 25, 1995, ed. dated October 19, 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9014792> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
10. Russian Federation. Laws. On the exclusive economic zone of the Russian Federation: Federal Law N 191-FZ : Adopted by the State Duma on November 18, 1998 : approved by the Federation Council on December 2, 1998 : ed. dated June 28, 2022. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901722706> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
11. Russian Federation. Laws. On internal sea waters, the territorial sea and the contiguous zone of the Russian Federation: Federal Law N 155-FZ : Adopted by the State Duma on July 16, 1998 : approved by the Federation Council on July 17, 1998 : ed. dated October 19, 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901714424> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)

12. Russian Federation. Laws. Criminal Code of the Russian Federation: Federal Law N 63-FZ : Adopted by the State Duma on May 24, 1996 : approved by the Federation Council on June 5, 1996 : ed. dated December 25, 2023. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/ (accessed 12.02.2024). (In Russ.)
13. Russian Federation. Laws. Code of the Russian Federation on Administrative Offences: Federal Law N 195-FZ : Adopted by the State Duma on December 20, 2001 : approved by the Federation Council on December 26, 2001 : ed. from 01/05/2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807667> (accessed 12.02.2024). (In Russ.)
14. Russian Federation. Laws. Civil Code of the Russian Federation. Part one: Federal Law N 51-FZ : Adopted by the State Duma on October 21, 1994 : ed. from October 1, 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9027690> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
15. Russian Federation. Laws. Civil Code of the Russian Federation. Part two: Federal Law N 14-FZ : Adopted by the State Duma on December 22, 1995 : ed. dated September 12, 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9027703?marker=7D20K3> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
16. Russian Federation. Laws. Civil Code of the Russian Federation. Part three: Federal Law N 146-FZ : Adopted by the State Duma on November 1, 2001 : approved by the Federation Council on November 14, 2001 : ed. dated August 4, 2023. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901799839/titles/64U0IK> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
17. Russian Federation. Laws. Civil Code of the Russian Federation. Part four: Federal Law N 230-FZ : Adopted by the State Duma on November 24, 2006 : approved by the Federation Council on December 8, 2006 : ed. dated January 30, 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902019731> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
18. Resolution of the Government of the Russian Federation of March 28, 2012 N 256 'On the accession of the Russian Federation to the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments of 2004'. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902338489> (accessed 28.02.2024). (In Russ.)
19. SanPiN 2.1.3684-21. 'Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soil, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures': approved by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 N 3. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177> (accessed 03.27.2024). (In Russ.)
20. Order No. 45829 dated March 3. 2017 on approval of Mandatory Regulations in the seaport 'Big Port of St. Petersburg' / Ministry of Transport of the Russian Federation. — 54 p. (In Russ.)
21. Plan for the integrated application of the international convention on the control and management of ships' ballast water and sediments in the seaport of Novorossiysk. Approved by the head of the Federal State Budgetary Institution 'Administration of Black Sea Seaports' V.V. Erygin on November 25, 2017. Agreed by the captain of the seaport of Novorossiysk E.V. Tuzinkevich on November 24, 2017. — Novorossiysk, 2017. — 46 p. (In Russ.)
22. Rosprirodnadzor revealed the fact of pollution of the river water area. Don in the area of the Azov seaport. URL: https://rpn.gov.ru/news/rosprirodnadzor_vyavil_fakt_zagryazneniya_akvatorii_r_don_v_rayone_morskogo_porta_azov/?sphrase_id=1251677 (accessed 24.02.2024). (In Russ.)
23. Certificate of recognition of the testing laboratory No. 17.60014.185. Date of issue: 07/14/2017. Approved by the head of the Novorossiysk branch of the Russian Maritime Register of Shipping Esipenko I.V. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getIndustry?d=E4D33633-8CC5-6401-8C28-F0F2D66492F4> (accessed 12.02.2024). (In Russ.)
24. Certificate of recognition of the testing laboratory No. 19.70190.185. Date of issue: 08/21/2019. Approved by the head of the Novorossiysk branch of the Russian Maritime Register of Shipping Esipenko I.V. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getIndustry?d=463A704D-5F60-6D34-7BCB-B0116DA0E8E4> (accessed 12.02.2024). (In Russ.)
25. Cherepovitsyn A.E., Tsvetkov P.S., Evseeva O.O. *Kritichesky analiz metodicheskikh podkhodov k otsenke ustoychivosti arkticheskikh neftegazovykh proektov* [Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects]. Journal of Mining Institute. — 2021. — Vol. 249. — Pp. 463 — 479. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
26. Vasileva Z.V., Vasekha M.V., Tyulyaev V.S. *Otsenka effektivnosti sorbentov dl'a reagirovaniya na avariynye razlivy nefiti v arkticheskoy akvatorii* [Evaluation of the efficiency of sorbents for accidental oil spill response in the Arctic waters]. Journal of Mining Institute. — 2023. — Vol. 264. — Pp. 856 — 864. DOI: 10.31897/PMI.2023.14.
27. Historical record of the Northern Sea Route: the volume of cargo transportation in 2023 exceeded 36,254 million tons. URL: <https://rosatom.ru/journalist/news/-istoricheskiy-rekord-sevmorputi-obem-gruzoperevozok-za-2023-god-prevysil-36-254-mln-tonn/> (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
28. Milestones of the long journey. Northern Sea Route and its main ports. URL: <https://arctic-russia.ru/article/vekhi-bolshogo-puti/> (accessed 29.02.2024). (In Russ.)
29. Seaport of Sabetta. URL: https://rosatomport.ru/port_sabetta (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
30. Murmansk branch. Sea ports. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/mur_seaports/ (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
31. Arkhangelsk branch. Sea ports. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/arf_seaports/ (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
32. Seaport of Dudinka. URL: https://rosatomport.ru/port_dudinka (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
33. Seaport Naryan-Mar. URL: <https://polartrans.ru/information/morskoj-port-naryan-mar.html> (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
34. North-Eastern Basin Branch. Sea ports. URL: https://www.rosmorport.ru/filials/vaf_seaports/ (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
35. Order No. CF-167-p dated April 29. 2014 On entering information about the seaport of Provideniya into the Register of seaports of the Russian Federation / Federal Agency for Maritime and River Transport. — 5 p. (In Russ.)
36. Dixon seaport. URL: <https://polartrans.ru/information/morskoj-port-dikson.html> (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
37. Tiksi seaport. URL: <https://polartrans.ru/information/morskoj-port-tiksi.html> (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
38. Port of Igarka. URL: <https://ecoshp.ru/blog/port-igarka/> (accessed 03.04.2024). (In Russ.)
39. Xinli Qi, Zhenfu Li, Changping Zhao, Qiqi Zhang, Yutao Zhou. Environmental impacts of Arctic shipping activities: A review. *Ocean & Coastal Management*. — 2024. — Vol. 247. 106936. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106936.
40. Alekseeva M.B., Bogachev V.F., Gorenburgov M.A. *Sistemnaya diagnostika strategii razvitiya promyshlennosti Arktiki* [System diagnostics of the Arctic industrial development strategy]. *Zapiski Gornogo Instituta*. — 2019. — Vol. 238. — Pp. 450 — 458. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.450.

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]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed on 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 sistem"* [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 (kuteynikov.ma@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. 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-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtп.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>
<https://cdo.smolgu.ru/>

Фото для обложки журнала предоставлено Мажириным Ильей Аркадьевичем,
инженером-инспектором Дальневосточного филиала РС

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 75

Редакционная коллегия журнала

Редактор *Е.П. Чебучева*
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*
Дизайн концепции *М.В. Ведмеденко*

Подписано в печать 30.08.2024. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства
191181, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А
www.rs-class.org/ru/