

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ЭКОЛОГИЯ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА
СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

ГАЗОВОЗЫ ДЛЯ СПГ
ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В КОРПУСЕ СУДНА

СЖИЖЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ГАЗ КАК ТОПЛИВО
РАЗРАБОТКА ПРАВИЛ РЕГИСТРА



№ 70/71
ИЮЛЬ
2023

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

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.А. Кутейников

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

ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Электронная версия журнала доступна по адресу:

www.rs-class.org.

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

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

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

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

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor-in-Chief

Mikhail Kuteynikov

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

ISSN 2223-7097

Editorial board

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

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

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

Andrey Grigoriev – Candidate of Technical Science, Admiral

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

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

NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

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

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

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

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

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

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

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

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

Subscription index is 87730 in Pressinform catalog.

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

www.rs-class.org.

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

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

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

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 70/71

RESEARCH BULLETIN BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

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

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

Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

2.5.18 – Проектирование и конструкция судов

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

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

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

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

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

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

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

2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics

2.5.18 – Design and construction of ships

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

2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург
2023



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Толмачев С.А. Перспективы введения мер рыночного характера по сокращению выбросов парниковых газов с судов. 4

S.A. Tolmachev Perspectives of the introduction of market-based measures to reduce greenhouse gas emissions in the shipping sector

Буянов А.С., Реуцкий А.С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна. 13

A.S. Buyanov, A.S. Reutsky Formation of a methodology for determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients

Шурпяк В.К., Богданов М.С. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах 29

V.K. Shurpyak, M.S. Bogdanov Analysis of the consumption of alternative fuels on sea-going ships

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

Кутейников М.А., Макарова В.В., Потехин Ю.П., Самойлов В.Р. Предложения по модификации критерия риска потери остойчивости при движении судна на гребне волны (броучинге), предложенного ИМО 37

M.A. Kuteynikov, V.V. Makarova, Yu.P. Potekhin, V.R. Samoilov Proposal for modification of vulnerability criterion for surf-riding (broaching) stability failure suggested by IMO

Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. О влиянии курсового угла и скорости на амплитуды вторых гармоник нелинейной качки судна 46

V.Yu. Semenova, D.A. Albaev Effect of heading angle and velocity on the second harmonics of the nonlinear ship motions amplitudes

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Коришунов А.В., Кутейников М.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Сравнительный анализ давлений и параметров качки, полученных на основе прямых методов расчета, с величинами из нормативных документов DNV 58

A.V. Korshunov, M.A. Kuteynikov, R.S. Mudrik, D.A. Ponomarev, A.A. Rodionov Comparative analysis of pressures and ship motion parameters obtained on the basis of direct calculations and the values from DNV normative documents

Аносов А.П., Макарова Т.А. Влияние диагональных элементов набора бортового перекрытия на его местную прочность и весовые характеристики. 67

A.P. Anosov, T.A. Makarova Influence of diagonal framing members of side grillage on its weight characteristics

Петров А.А., Артюнян В.Г. Основные критерии безопасности буксировки судна ледоколом методом буксирования вплотную 81

A.A. Petrov, V.G. Arutyunyan Essential safety criteria for ship close coupled towing by an icebreaker

Бойко М.С. Расчет теплового потока в корпусе судна-газовоза на основе аналитических методов теории теплообмена 88

M.S. Boyko Calculation of heat flow in gas carrier structure based on analytical methods of heat exchange theory

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Вербицкий С.В., Бережной К.Г., Чеснокова И.Г. Разработка требований к судам, оборудованным для использования сжиженного нефтяного газа в качестве топлива 101

S.V. Verbitskiy, K.G. Bereznoi, I.G. Chesnokova Development of requirements for ships equipped to use liquefied petroleum gas as fuel

Голуб Е.С., Шурпяк В.К. Разработка требований по защите от возникновения резонанса в трубопроводах судовых систем 108

E.S. Golub, V.K. Shurpyak Development of requirements for protection against resonance in piping of ship systems

НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ OIL AND GAS FACILITIES

Григорьева О.А., Кутейников М.А., Большев А.С., Фролов С.А. Применение нормативных документов Российского морского регистра судоходства при определении внешних нагрузок на сооружения континентального шельфа России 117

O.A. Grigoryeva, M.A. Kuteynikov, A.S. Bolshev, S.A. Frolov application of normative documents of Russian Maritime Register of Shipping in determination of external loads for the Russian continental shelf offshore structures

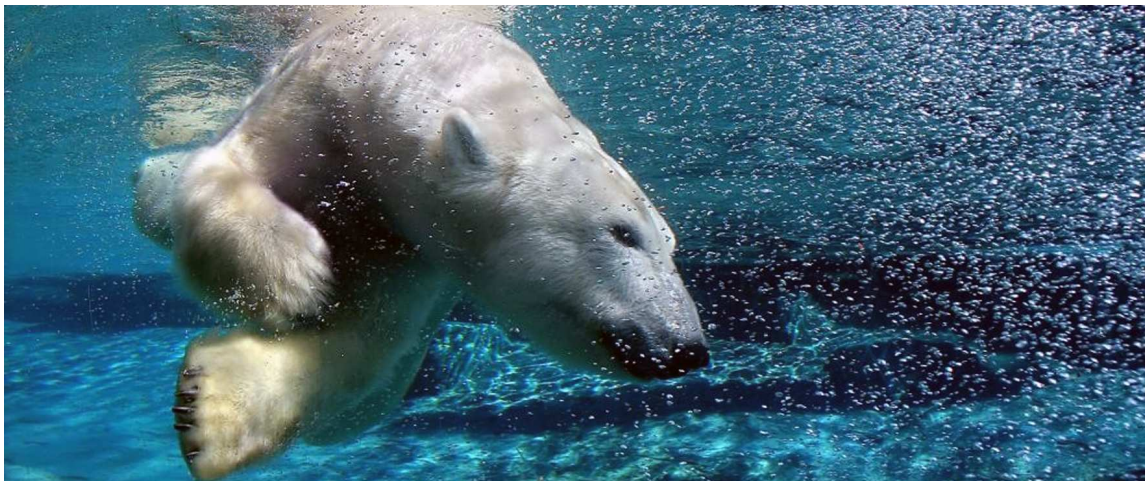
Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Шемилин Д.И. Экспериментальное определение усилий в якорных связях плавучего объекта при воздействии волн цунами 128

N.D. Belyaev, V.V. Lebedev, I.S. Nudner, K.K. Semenov, D.I. Shchemelinin experimental determination of the forces in the anchor system of a floating object under the impact of tsunami waves

ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ REVIEW OF INTERNATIONAL DOCUMENTS

Чернов О.А. Рекомендации ИМО по подготовке к проверкам в рамках системы проверки государств — членов ИМО (IMSAS) 143

O.A. Chernov IMO recommendations on preparation for the audits under the IMO member state audit scheme (IMSAS)



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ВВЕДЕНИЯ МЕР РЫНОЧНОГО ХАРАКТЕРА ПО СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С СУДОВ

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

В статье представлен обзор деятельности ИМО по тематике разработки мер рыночного характера в контексте комплексной работы по сокращению выбросов парниковых газов в судоходной отрасли. Приведена информация о принятой в 2018 году Первоначальной стратегии ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов и обсуждаемых в настоящее время в порядке ее реализации предложениях государств и международных организаций по введению различных мер рыночного характера (углеродный сбор, система торговли выбросами). Дана оценка перспективам разработки т.н. сводного «пакета», состоящего из рыночных и технических мер, которая должна начаться в 2023 году, вопросов, которые необходимо будет решить в контексте этой работы, а также возможных последствий введения рыночных мер.

Ключевые слова: рыночные меры, МАРПОЛ, выбросы парниковых газов, углеродный сбор, система торговли выбросами

PERSPECTIVES OF THE INTRODUCTION OF MARKET-BASED MEASURES TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE SHIPPING SECTOR

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

The article contains a review of IMO's work on development of market-based measures in the context of comprehensive work to reduce greenhouse gas emissions in the shipping sector. Information has been presented about the 2018 Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships and about currently discussed proposals by States and international organizations pursuant to the Initial Strategy on the introduction of various market-based measures (carbon levy, emission trading scheme). The assessment has been made regarding the development of the so called "package" consisting of market-based and technical measures, due to start in 2023, matters that need to be resolved in that context, as well as possible consequences of the introduction of market-based measures.

Keywords: market-based measures, MARPOL, GHG emissions, carbon levy, emission trading system

ВВЕДЕНИЕ

Предотвращение изменения климата позиционируется сегодня как одна из важнейших задач, стоящих перед человечеством. В 1992 году была принята Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН), которая определила в качестве основной цели стабилизацию концентраций парниковых газов в атмосфере на уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему [1].

В 2015 году ООН приняла так называемую Повестку устойчивого развития 2030 — глобальный план действий по достижению 17-ти целей в области повышения качества жизни, одна из которых (№ 13) — срочные меры по борьбе с изменением климата и его последствиями.

В качестве обоснования этой работы используются результаты работы Межправительственной группы экспертов по изменению климата, которая пришла к выводам о ключевом влиянии антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу на изменение климата.

Способы сокращения антропогенных выбросов в различных отраслях промышленности включают широкий спектр мер технического, социально-экономического, а также финансового характера, в том числе т.н. рыночные меры — инструменты, предполагающие взимание платы за выбросы парниковых газов в атмосферу с целью стимулирования перехода на альтернативные виды топлива и источники энергии, не связанные с ископаемым топливом.

Основным и наиболее действенным способом декарбонизации морской отрасли считается переход на низко- и безуглеродные виды топлива. В мире активно реализуются проекты по использованию водорода, аммиака, метанола и других видов альтернативного судового топлива. При этом очевидно, что залогом успеха декарбонизации должна являться глобальная доступность альтернативных видов топлива (физическая доступность в различных регионах мира и адекватная стоимость топлива).

Соответственно, рыночные меры рассматриваются в качестве инструмента, позволяющего устранить разницу в стоимости традиционных и альтернативных видов топлива, повысить доступность последних посредством инвестиций в производство и создание бункеровочной инфраструктуры.

Рыночная мера, как правило, представляет собой прямой финансовый сбор (углеродный сбор/налог) или систему, предусматривающую установление предельно допустимых значений выбросов с возможностью покупки недостающих разрешений (квот) на выбросы или продажи избыточных (система торговли выбросами).

В 2022 году в 47 государствах действовало 70 различных рыночных мер [2], как показано на рис. 1.

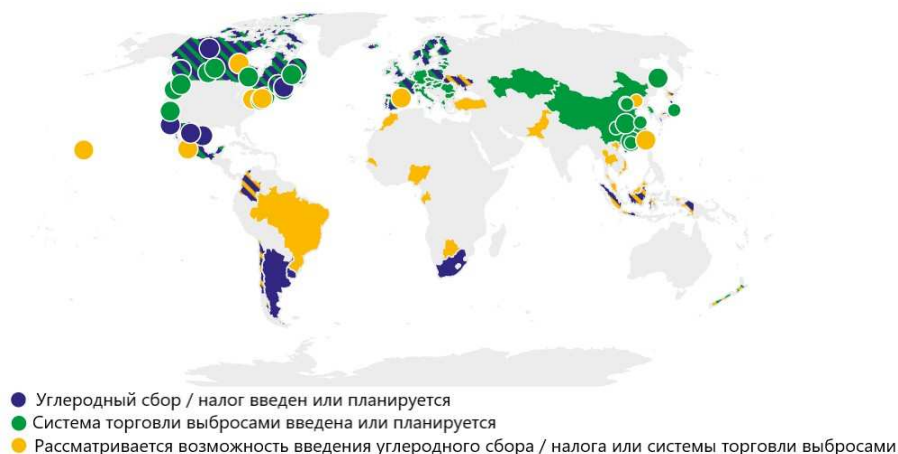


Рис. 1 Рыночные механизмы сокращения выбросов парниковых газов в мире на конец 2022 года

Ни одна из рыночных мер на момент написания статьи не затрагивала международное судоходство. Первой такой мерой должна стать Система торговли выбросами ЕС, применение которой к морским судам, совершающим международные рейсы, предполагается с 1 января 2024 года. [3]

РАССМОТРЕНИЕ ВОПРОСОВ РЕАГИРОВАНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ИМО И ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ ОБСУЖДЕНИЯ РЫНОЧНЫХ МЕР

Киотский протокол к РКИК ООН определил Международную морскую организацию в качестве межправительственной площадки, в рамках которой государства должны договариваться о снижении выбросов парниковых газов в судоходстве [4].

В 1997 году Протоколом к Конвенции МАРПОЛ было принято Приложение VI — Правила по предотвращению загрязнения атмосферы с судов — инструмент ИМО, устанавливающий требования универсального характера к судам, судовым двигателям и оборудованию, судовому топливу в отношении выбросов в атмосферу.

В декабре 2003 года Ассамблея — высший управляющий орган ИМО — призвала Комитет по защите морской среды (КЗМС) установить и разработать механизмы, необходимые для обеспечения ограничения или сокращения выбросов парниковых газов с судов, осуществляющих международные перевозки, уделив особое внимание оценке технических, эксплуатационных и рыночных решений [5].

Прикладная работа по этой тематике началась в 2006 году, и ее первым результатом стало принципиальное решение ИМО о приоритете разработки мер по сокращению выбросов углекислого газа как основного загрязнителя атмосферы, способствующего изменению климата.

В 2008 году были согласованы базовые принципы, которые должны лежать в основе мер по сокращению выбросов парниковых газов с судов, предполагавшие эффективность, обязательность и универсальность применения, минимизацию негативного влияния на международную торговлю, содействие техническим нововведениям, прозрачность при принятии решений и др. [6].

В период с 2006 по 2013 гг. параллельно с разработкой мер технического характера КЗМС рассматривал предложения государств и международных организаций по введению рыночных механизмов.

В 2009 году было принято решение о том, что рыночный механизм должен стать частью т.н. «пакета» мер: в этот период велась разработка требований по энергоэффективности судов, которые вскоре были приняты в виде новой главы IV Приложения VI к МАРПОЛ [7].

Конкретные предложения по рыночным мерам сводились к различным формам торговли выбросами (при установлении глобального предельного значения выбросов и необходимости приобретать «квоты» за превышение этого значения) или углеродного сбора за потребленное топливо (размер сбора — в зависимости от показателей энергоэффективности судна).

Сбор средств предполагалось осуществлять через международные фонды или государства флага. Некоторые предложения включали элементы финансового стимулирования судов, чьи выбросы были бы ниже установленных лимитов. Собранные средства предлагалось направлять на реализацию программ энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов в морской отрасли, а также использовать для компенсации развивающимся государствам в случае негативных последствий социально-экономического характера, связанных с применением рыночных механизмов в судоходстве.

КЗМС принял решение провести анализ целесообразности и возможности реализации мер на основе разработанных ИМО критериев оценки: экологическая эффективность; потенциальное воздействие на морскую торговлю; стоимостная эффективность; практическая осуществимость; соответствие инструментам ИМО, РКИК ООН, Конвенции ООН по морскому праву; административная нагрузка при осуществлении мер.

Анализ показал, что ни одно из представленных предложений, по сути, не отвечает критериям, не обеспечивает должного уровня сокращения выбросов и не может гарантировать отсутствие или приемлемый уровень негативных последствий социально-экономического характера для государств.

Дальнейшие попытки в рамках КЗМС разработать сводный рыночный механизм на основе представленных предложений ни к чему не привели, и в мае 2013 года было принято решение приостановить обсуждение рыночных мер [8].

Многолетняя дискуссия, неоднократный перенос обсуждения вопроса от сессии к сессии со ссылкой на «недостаток времени», отсутствие каких-либо договоренностей показывали, что на тот момент большинство государств не было готово предметно обсуждать введение рыночных мер. Рыночные механизмы рассматривались многими как реальная угроза международной морской торговле. Оплата квоты за выброс или углеродный сбор с судна расценивался как аналог непрямого налога на перевозимый груз, что противоречило положениям статей I, III и VIII Генерального соглашения о тарифах и торговле 1994 года [9].

В условиях, когда только что вступили в силу требования МАРПОЛ по энергоэффективности, представлялось, что еще не исчерпаны все возможности сократить выбросы парниковых газов с судов посредством технических мер, не применяя способы экономического принуждения.

Существенным фактором, помешавшим продолжению дискуссии, стало отсутствие согласованной методологии, критериев и механизма проведения оценки последствий и оценки целесообразности осуществления будущих мер. Несмотря на то, что разработка унифицированного подхода по этому вопросу была предусмотрена соответствующими планами работ ИМО, под давлением государств, наиболее амбициозно продвигающих климатическую повестку, работа была отодвинута на второй план в угоду скорейшему рассмотрению конкретных предложений по поправкам к МАРПОЛ. Подобный подход, при котором «телега ставится впереди лошади», к сожалению, являлся и является сегодня характерной чертой работы ИМО по линии реагирования на изменение климата. Желание ряда государств ускорить принятие требований в ущерб научно-технической проработке приводит, зачастую, к обратным результатам, что и произошло в 2013 году.

ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ИМО ПО СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С СУДОВ И ТЕКУЩИЙ СТАТУС ОБСУЖДЕНИЯ РЫНОЧНЫХ МЕР

Принятие в 2015 году Парижского соглашения по изменению климата стимулировало разработку в рамках ИМО комплексного стратегического документа, который должен был определить задачи работы Организации по линии реагирования на климатические изменения, обозначить целевые показатели по снижению выбросов парниковых газов и способы их достижения.

Такой документ — Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов (далее — Первоначальная стратегия ИМО) был принят в апреле 2018 года.

Первоначальная стратегия ИМО устанавливает для международного судоходства амбициозные цели по сокращению совокупных выбросов парниковых газов и выбросов углекислого газа на единицу транспортной работы (углеродоемкость), как представлено на рис. 2 [10].

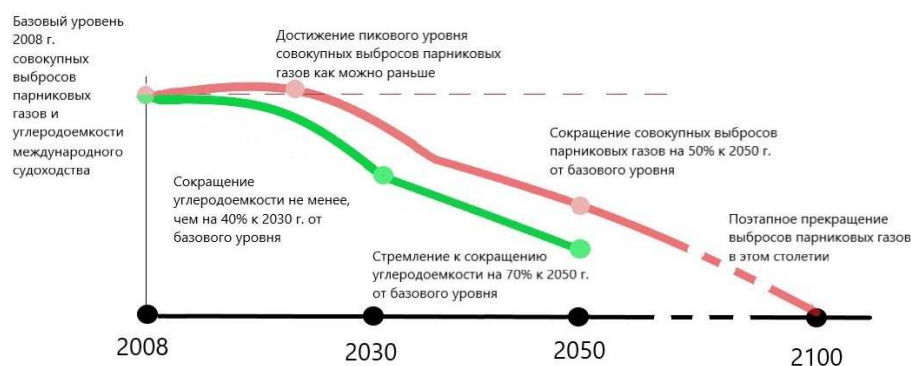


Рис. 2 Масштаб задач Первоначальной стратегии ИМО

Первоначальная стратегия ИМО содержит перечень краткосрочных (разработка и согласование в период 2018 — 2023 гг.), среднесрочных (2023 — 2030 гг.) и долгосрочных (после 2030 г.) мер-кандидатов. В 2018 — 2021 гг. был разработан и принят пакет краткосрочных мер технического и эксплуатационного характера — коэффициент энергоэффективности для существующих судов и показатель/рейтинг эксплуатационной углеродоемкости [11].

В перечне среднесрочных мер-кандидатов указана возможность разработки инновационных нормативно-правовых механизмов по снижению выбросов в атмосферу с судов, включая возможные меры рыночного характера. Включение такого элемента в перечень среднесрочных мер-кандидатов послужило толчком к новым обсуждениям возможности введения рыночных механизмов сокращения выбросов в атмосферу для судоходства и формата таких механизмов, что продолжается по настоящее время.

В июне 2021 года КЗМС одобрил План работ по разработке средне- и долгосрочных мер Первоначальной стратегии ИМО [12], который предполагает три последовательные фазы:

1. систематизация и первоначальное рассмотрение предложений по мерам сокращения выбросов парниковых газов с судов;

2. оценка и выбор меры или «пакета» мер для дальнейшей проработки;
3. разработка соответствующих поправок к МАРПОЛ или другим инструментам ИМО.

В рамках первой фазы (весна 2021 года – весна 2022 года.) на рассмотрение были представлены восемь предложений по рыночным механизмам разной степени проработки и пересечения элементов друг с другом, основные элементы которых представлены на рис. 3.

1. Глобальный топливный стандарт (государства-члены ЕС и Еврокомиссия) [13].
2. Углеродный сбор за выбросы парниковых газов (Соломоновы о-ва и Маршалловы о-ва) [14].
3. Углеродный сбор и климатический фонд ИМО (Международные ассоциации судовладельцев) [15].
4. Система торговли выбросами и установление максимальных пределов выбросов (Норвегия) [16].
5. Международный фонд/орган по морским разработкам (группа государств и международных ассоциаций судовладельцев) [17].
6. Международный фонд по устойчивому финансированию и вознаграждению (Аргентина, Бразилия, Китай, ЮАР, ОАЭ) [18].
7. Международный фонд по устойчивому финансированию и вознаграждению (предложение № 6, доработанное Международной палатой судоходства) [19].
8. Схема поощрения судов с нулевыми выбросами (Япония) [20].

Основа для расчета стоимости	Установление максимально допустимого значения содержания CO ₂ на единицу энергии при использовании топлива на судне	1
	Предельное значение выбросов для отрасли	4
	Фиксированное значение за тонну потребленного топлива	2 3 5 7
	Значения показателя и рейтинга эксплуатационной углеродоемкости судна	6
	Процент от текущей стоимости топлива (не более 25%)	8
Механизм сбора средств	Торговля разрешениями на выбросы	4
	Углеродный сбор (40-300 долларов США за тонну выбросов CO ₂)	2 3 8
	Фонд, из расчета совокупных выбросов от потребленного топлива	5 7
	Фонд, из расчета выбросов сверх установленного допустимого предела для судна	6
	Санкции / штрафы за выбросы сверх установленного предела для судна	1
Использование средств	Финансирование проектов по реаированию на климатические изменения в наименее развитых и малых островных развивающихся государствах	2 3
	Вознаграждение судам с целью сократить разницу в стоимости между нефтяным и альтернативными видами топлива	1 7
	Вознаграждение судам с целью приравнять стоимость нефтяных и альтернативных видов топлива	8
	Вознаграждение судам с целью стимулирования эксплуатационной углеродоемкости	6
	Научные разработки в области альтернативных видов топлива, технологий, бункеровочной инфраструктуры	2 4 5 6 7
	Наращивание ресурсов в развивающихся государствах	2 4 6 7 8
	Финансирование обучающих программ ИМО по наращиванию ресурсов	1

Рис. 3 Основные элементы предложений по рыночным мерам в судоходстве

Разработка мер должна сопровождаться проведением оценки последствий социально-экономического характера в соответствии с установленной процедурой [21]. Первоначальная оценка последствий, проведенная самими авторами предложений, показала, как правило, или незначительные негативные последствия, или же высокую степень неопределенности. Совершенно справедливо было бы усомниться в объективности таких оценок, т.к. очевидно имеется заинтересованность авторов в продвижении собственных предложений и преуменьшении степени возможного негативного влияния предложенных ими мер.

В этой связи проведение комплексной оценки последствий с привлечением независимых экспертных организаций, а такая возможность предусмотрена процедурой, представляется чрезвычайно важным на этапе прикладной разработки соответствующих поправок к МАРПОЛ.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИНЯТИЯ РЫНОЧНЫХ МЕР

На момент написания статьи подходила к завершению вторая фаза (весна 2022 — весна 2023 гг.) вышеуказанного Плана работ ИМО. В целом единственным итогом переговоров 2022 года стало подтверждение государствами приверженности и целесообразности разработки «пакета» мер, состоящего из требований технического характера по регулированию содержания парниковых газов в судовом топливе и меры «экономического» характера [22]. Словосочетание «мера экономического характера» было введено, очевидно, для камуфлирования термина «рыночная мера», который для многих государств имеет негативный оттенок. При этом в единственном из представленных предложений, которое позиционируется как мера технического характера (глобальный топливный стандарт) заложены также и элементы рыночного механизма. Т.е. в конечном счете речь идет скорее о разработке рыночной меры с включением отдельных технических элементов, а не полноценной комбинации технической и рыночной мер.

На смягчение позиции большинства государств в отношении рыночных мер повлиял ряд факторов. В частности, можно выделить существенное усиление давления со стороны групп государств, активно продвигающих климатическую повестку, в сторону принятия скорейших мер, давление, включая кампании в СМИ и социальных сетях, широкого круга природоохранных неправительственных организаций. Открыто противостоять этой зачастую популистской риторике готовы не все государства. Также можно отметить отсутствие единства у развивающихся государств и отсутствие достаточного уровня экспертизы, позволяющего проводить анализ представляемых предложений и готовить обоснованные позиции. Немаловажным фактором стало также исчерпание, по сути, арсенала мер технического характера.

В 2023 году должны быть приняты принципиальные решения о формате, основных элементах среднесрочных мер и временных рамках разработки соответствующих поправок к МАРПОЛ и их введения в действие.

«Пакет» будущих мер скорее всего будет основываться на двух основных элементах — требовании о предельном содержании парниковых газов в судовом топливе и углеродном сборе, как наиболее простой с точки зрения администрирования мерой по сравнению с системой торговли выбросами. Впрочем, определенные элементы торговли выбросами могут также попасть в итоговый «пакет».

Далее в рамках разработки этого «пакета» предстоит решить ряд принципиальных вопросов, которые определяют наполнение будущих требований:

1. перечень парниковых газов, на которые будут распространяться среднесрочные меры.

До настоящего времени приоритет отдавался регулированию выбросов углекислого газа, но возможно поэтапное распространение требований на выбросы других парниковых газов с судов, в первую очередь метана;

2. область распространения требований. Типы судов (только суда, совершающие транспортную работу или другие типы судов), минимальное значение вместимости судов (от 400 или от 5000 GT), характер эксплуатации (только международные рейсы или любые виды рейсов).

3. предельные значения содержания парниковых газов в топливе. В случае решения о поэтапном введении глобального топливного стандарта необходимо будет согласовать предельные значения содержания парниковых газов для каждого этапа и сбалансированный график ужесточения требований;

4. учет выбросов парниковых газов на протяжении всего жизненного цикла судового топлива. Оценка объема выбросов парниковых газов при использовании различных видов судового топлива может включать только часть жизненного цикла, относящуюся к его использованию на судне, как это по большей части применяется в МАРПОЛ в настоящее время. Альтернативно может применяться оценка на протяжении всего жизненного цикла — от добычи сырья и производства топлива до выбросов на судне. На применении второго подхода настаивает ряд государств, при этом необходимо будет решить каким образом регулировать выбросы от судового топлива «на берегу», т.к. это вызывает вопросы с точки зрения мандата ИМО;

5. механизм формирования стоимости за выбросы парниковых газов. Возможно установление фиксированной стоимости за тонну выбросов CO₂ или же создание гибкого механизма формирования стоимости, например, в зависимости от уровня цен на традиционное и альтернативные виды топлива с целью нивелировать разницу между ними;

6. определение направлений для расходования средств. Предстоит оценить плюсы и минусы каждого из возможных направлений (поддержка развивающихся государств, научные разработки, стимулирование судов, использующих альтернативные виды топлива, инвестиции в разработку новых видов топлива и бункеровочной инфраструктуры) и определить какие именно направления для расходования средств и в какой доле станут частью требований;

7. определение ответственного за оплату углеродного сбора. Следуя популярному в западном природоохранном законодательстве принципу «загрязнитель платит», инициаторы большинства предложений по

рыночным мерам назначают судовладельца ответственным за оплату углеродного сбора. Тем не менее, вопрос требует проработки, т.к. не всегда судовладелец/оператор судна является ответственным за выбор используемого топлива;

8. механизм управления средствами и контроля за их распределением. Необходимо определение роли ИМО и ее рабочих органов, а также государств в деле управления полученными средствами, а также разработка соответствующих механизмов и процедур. Рассматриваются варианты создания для этой цели специальных неправительственных организаций и фондов, однако в этом случае, очевидно, степень прозрачности решений и контроль со стороны государств будут гораздо ниже;

9. сроки и порядок применения углеродного сбора. Необходимо согласовать дату введения в действие требований в промежутке между 2026 и 2030 гг., включая возможность поэтапного применения. Целесообразно также определиться со сроками действия рыночного механизма, т.е. понять в какой момент или при каких условиях применение рыночной меры может быть более нецелесообразно;

10. углеродная компенсация. Оценка возможности использования в судоходстве механизма покупки углеродных единиц или т.н. «зеленых сертификатов», подтверждающих инвестиции в проекты по сокращению выбросов парниковых газов в других отраслях и используемых в качестве компенсации выбросов с судов;

11. взаимодействие новых и существующих требований МАРПОЛ. Новые меры в идеале должны эффективно дополнять, но не дублировать существующие требования МАРПОЛ, например по энергоэффективности;

12. система сбора данных ИМО. Система используется в настоящее время для сбора сведений, которые необходимы для расчета эксплуатационной углеродоемкости судна. Предстоит определить какие данные будут требоваться для эффективного функционирования новых мер и внести, при необходимости, соответствующие дополнения в Конвенцию МАРПОЛ касательно объема и порядка поставки информации государствами в систему сбора данных ИМО.

На результат вышеуказанной работы окажут принципиальное влияние итоги проходящих параллельно в ИМО переговоров о пересмотре Первоначальной стратегии ИМО, которые должны завершиться принятием пересмотренной стратегии в июле 2023 года.

Если в пересмотренной стратегии будет закреплён более амбициозный масштаб задач, предполагающий, например, полное прекращение выбросов парниковых газов в судоходстве к 2050 год. (такие предложения имеются на столе переговоров), следует ожидать усиления давления со стороны наиболее климатически-амбициозных государств в сторону ужесточения требований будущего «пакета» среднесрочных мер. Соответственно, в этом случае можно предполагать более раннее вступление в силу новых требований, более сжатые сроки повышения предельных значений, увеличение размера углеродного сбора, больший охват с точки зрения типов и вместимости судов и др.

Меру по сокращению выбросов парниковых газов в судоходстве следует рассматривать комплексно — не только в контексте того, насколько эта мера сама по себе эффективно сокращает выбросы, но и насколько негативные последствия от ее введения пропорциональны угрозам, с которыми эта мера призвана бороться. Можно одномоментно запретить использовать на морских судах углеводородное топливо, тем самым решив проблему выбросов парниковых газов, однако последующий за этим коллапс мировой экономики из-за прекращения морской торговли заставит человечество надолго забыть о проблематике изменения климата.

Соответственно, рыночная мера должна оказывать минимально допустимое воздействие на экономику судоходства и социально-экономическую ситуацию в государствах. В этой связи, например, предложения по уходу средств из отрасли для реализации проектов по реагированию на климатические изменения в развивающихся странах, при всей публичной привлекательности, означают только то, что задача рыночных мер в судоходстве выполняться не будет.

Расходование собранных средств на научные разработки в сфере альтернативных видов топлива и судовых технологий также представляется неоднозначным. Сомнительно, что ИМО сможет обеспечить прозрачность принятия решений при распределении средств, предоставить гарантии защиты прав интеллектуальной собственности разработчиков и одновременно обеспечить равный доступ к результатам разработок тем, кто будет по факту эти разработки финансировать. Высока вероятность того, что собранные средства будут в итоге доставаться ограниченному кругу западных и азиатских компаний — разработчиков технологий, и доступ к результатам разработок будет определяться этим же компаниями.

В этой связи стоит отметить, что в своем нынешнем виде борьба с изменением климата, в общем, не имеет в качестве главной задачи защиту окружающей среды. Широко известно, что климат на Земле менялся многократно и радикально без участия человека, содержание парниковых газов в атмосфере в отдельные периоды разительно отличалось от современности [23]. Флора и фауна океанов и суши приспосабливалась.

А вот изменение климата сегодня, безотносительно того, является ли причиной природный или антропогенный факторы, может существенно изменить ареал и условия обитания человечества. Соответственно, борьба с изменением климата в целом и в судоходстве в частности — это в первую очередь решение социально-экономических задач, что неразрывно связано с вопросами финансов, торговли, конкуренции. И если до недавнего времени декларируемые природоохранные цели в судоходстве достигались техническими средствами, то сейчас на повестке дня стоит применение механизмов экономического принуждения. За этим отчетливо прослеживаются интересы экономически развитых государств, направленные на получение совершенно осязаемых материальных благ и долгосрочных конкурентных преимуществ для собственной промышленности и морского транспорта.

Судоходство, в отличие от многих других секторов мировой экономики, в силу своего международного характера и наличия большого количества универсальных инструментов, регулирующих его деятельность, представляет собой довольно легкую мишень для реализации завышенных климатических амбиций, несмотря на то, что оно ответственно менее, чем за 3 % совокупных антропогенных выбросов парниковых газов [24]. Этому способствуют несколько факторов.

Первый — упрощенный порядок внесения поправок в МАПРОЛ, когда решение о новых требованиях принимается на КЗМС простым большинством делегаций государств — сторон конвенции.

Второй — механизм молчаливого согласия при принятии поправок, когда поправка считается принятой при отсутствии возражений определенного количества государств, и, соответственно, не требуется длительная процедура явного выражения согласия государства на поправку.

Третий — заложенный в конвенции принцип непредоставления в порту государства — стороны МАРПОЛ преимущества судам под флагом государства, не являющегося стороной МАРПОЛ. То есть даже если государство откажется принимать поправки, а такая возможность заложена в статье 16 конвенции, суда под флагом этого государства все равно вынуждены будут соблюдать эти требования при совершении международных рейсов.

В таких условиях использование судоходной отрасли в качестве донора для реализации программ по реагированию на изменение климата, в том числе не имеющих отношение непосредственно к судоходству, вполне ожидаемо. Результативность применения рыночной меры в этом случае будет сомнительной, но реальный прогресс отрасли в деле сокращения выбросов парниковых газов благодаря уже действующим техническим и эксплуатационным мерам, вероятно, позволит избежать адекватной оценки рыночной меры.

В таком случае рыночная мера станет не более, чем дополнительным налогом экстерриториального характера в том числе и для российских судовладельцев. Платить этот налог придется в итоге и конечным потребителям судоходных услуг. Средства будут уходить из российской экономики безвозвратно и использоваться в значительной мере для повышения конкурентных преимуществ крупных западных и азиатских морских перевозчиков, топливного и научно-технического сектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рамочная конвенция ООН об изменении климата 1992 г. Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (дата обращения: 15.10.2022).
2. Carbon pricing dashboard. Режим доступа: https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data (дата обращения: 15.01.2023).
3. Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council amending Directive 2003/87/EC establishing a system of greenhouse gas emission allowance trading within the Union. 2021/0211 (COD), Brussels, 8 February 2023.
4. Киотский протокол 1997 года к Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения: 15.10.2022).
5. Политика и практика ИМО, относящиеся к сокращению выбросов парниковых газов с судов. Резолюция 23-й сессии Ассамблеи ИМО A.963(23).
6. Доклад Комитета по защите морской среды о его пятьдесят седьмой сессии. МЕРС 57/21.
7. Доклад Комитета по защите морской среды о его пятьдесят девятой сессии. МЕРС 59/24.
8. Доклад Комитета по защите морской среды о его пятьдесят девятой сессии. МЕРС 65/22.
9. Possible incompatibility between the WTO rules and Market-Based Measures for international shipping. МЕРС 64/5/3.
10. Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов. Резолюция МЕРС.304(72).
11. Шурыяк В.К., Толмачев С.А., Мусонов М.В. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. №№ 64/65, 2021, с. 4 — 17.
12. Доклад Комитета по защите морской среды о его семьдесят шестой сессии. МЕРС 76/15.
13. Further development of the proposal for a GHG Fuel Standard. ISWG-GHG 13/4/7.
14. Proposal for a GHG levy as a component in a basket of measures. ISWG-GHG 13/4/11.
15. A levy-based MBM, per tonne of CO₂ emissions, to expedite the uptake and deployment of zero-carbon fuels. ISWG-GHG 10/5/2.
16. Draft legal text for the Emission Cap-and-Trade System (ECTS). ISWG-GHG 13/4.

17. Establishment of the International Maritime Research and Development Board and IMO Maritime Research Fund. MEPC 76/7/7.
18. Proposal to establish an International Maritime Sustainability Funding and Reward (IMSF&R) mechanism as an integrated mid-term measure ISWG-GHG 12/3/9.
19. Further information about revised IMSF&R proposal ISWG-GHG14/3.
20. Further proposal on Zero-Emission Shipping Incentive Scheme (ZESIS). ISWG-GHG14/3/1.
21. Procedure for assessing impacts on states of candidate measures. MEPC.1/Circ.885/Rev.1, 2022.
22. Доклад Комитета по защите морской среды о его семьдесят девятой сессии. MEPC79/15.
23. Бялко А.В. Палеоклимат: дополнения к теории Миланковича. Природа. № 12, 2009, с. 18 — 28.
24. Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report. London: International Maritime Organization (IMO).

REFERENCES

1. UN Framework Convention On Climate Change. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (accessed on: 15.10.2022).
2. Carbon pricing dashboard. Available at: https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data (accessed on: 15.01.2023).
3. Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council amending Directive 2003/87/EC establishing a system of greenhouse gas emission allowance trading within the Union. 2021/0211 (COD), Brussels, 8 February 2023.
4. Kyoto Protocol 1997 to the UN Framework Convention on Climate Change. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (accessed on: 15.10.2022).
5. MO policies and practices related to the reduction of greenhouse gas emissions from ships. IMO 23-rd Assembly Resolution A.963(23).
6. Report of the Marine Environment Protection Committee on its Fifty-Seventh Session. MEPC 57/21.
7. Report of the Marine Environment Protection Committee on its Fifty-Ninth Session. MEPC 59/24.
8. Report of the Marine Environment Protection Committee on its Sixty-Second Session. MEPC 65/22.
9. Possible incompatibility between the WTO rules and Market-Based Measures for international shipping. MEPC 64/5/3.
10. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.304(72).
11. Shurpyak V.K., Tolmachev S.A., Musonov M.V. *Novye trebovaniya IMO po umensheniyu vybrosov uglekislogo gaza s morskikh sudov, sovershayushchikh transportnyu rabotu* [New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, Nos. 64/65, December 2021. pp. 4 — 17.
12. Report of the Marine Environment Protection Committee on its Seventy-Sixth Session. MEPC 76/15.
13. Further development of the proposal for a GHG Fuel Standard. ISWG-GHG 13/4/7.
14. Proposal for a GHG levy as a component in a basket of measures. ISWG-GHG 13/4/11.
15. A levy-based MBM, per tonne of CO₂ emissions, to expedite the uptake and deployment of zero-carbon fuels. ISWG-GHG 10/5/2.
16. Draft legal text for the Emission Cap-and-Trade System (ECTS). ISWG-GHG 13/4.
17. Establishment of the International Maritime Research and Development Board and IMO Maritime Research Fund MEPC76/7/7.
18. Proposal to establish an International Maritime Sustainability Funding and Reward (IMSF&R) mechanism as an integrated mid-term measure. ISWG-GHG 12/3/9.
19. Further information about revised IMSF&R proposal. ISWG-GHG 14/3.
20. Further proposal on Zero-Emission Shipping Incentive Scheme (ZESIS) ISWG-GHG 14/3/1.
21. Procedure for assessing impacts on states of candidate measures. MEPC.1/Circ.885/Rev.1, 2022.
22. Report of the Marine Environment Protection Committee on its Seventy-Ninth Session. MEPC 79/15.
23. Byalko A.V. Paleoclimate: Addenda to Milankovitch Theory. Priroda. No. 12, pp. 18 — 28.
24. IMO 2020. Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report. London: International Maritime Organization (IMO).

УДК 629.5.011; 629.5.016

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ПРОЦЕССУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА

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

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

В работе рассматривается существующая международная и отечественная нормативная база контроля углеродного следа, оставляемого морским транспортом. Целью исследования является формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности используемого судна. Обобщены способы определения углеродного следа на уровне организации, продукции и транспортной услуги. Даны рекомендации по использованию методик расчета углеродного следа транспортной услуги, базирующихся на конструктивных коэффициентах энергоэффективности судов. Отечественная нормативная база, с одной стороны, создает инструментарий, направленный на создание реестра углеродных единиц; в то время как, с другой стороны, методическая его часть, связанная с расчетами количества образующихся выбросов CO₂ эквивалента, — применительно к морскому транспорту — имеет архаичную структуру и не учитывает связь проектных характеристик судна и его расхода топлива, а также выполненную судном транспортную работу. Это не позволяет использовать методику для решения задач по планированию деятельности транспортных компаний, направленной на модернизацию флота и извлечения прибыли из совокупности профильной деятельности и участия в новообразованной торговле углеродными единицами.

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

FORMATION OF A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE CARBON FOOTPRINT OF A TRANSPORT SERVICE USING SHIP ENERGY EFFICIENCY COEFFICIENTS

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

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

The article examines the existing international and domestic regulatory framework for controlling the carbon footprint left by maritime transport. The aim of the study is to form a methodological approach to the process of determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients. The methods for determining the carbon footprint at the level of organization, product and transport service have been summarized. Recommendations have been given on the use of methods for calculating the carbon footprint of a transport service, based on the design coefficients of the energy efficiency of ships. On the one hand, the domestic regulatory framework creates a toolkit aimed at creating a register of carbon units. On the other hand, its methodological part, related to the calculation of the amount of CO₂ equivalent emissions generated in relation to maritime transport, has an archaic structure and does not take into account the relationship between the design characteristics of the ship and its fuel consumption, as well as the transport work performed by the vessel. This does not allow for using the methodology to solve the problems of planning the activities of transport companies aimed at modernizing the fleet and extracting profit from their activities and participating in the trade in carbon units.

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

ВВЕДЕНИЕ

Рост мировой торговли, более 60 % которой осуществляется морским транспортом (см. рис. 1) [1], положительно сказывается на мировом ВВП, однако имеет свои негативные последствия в виде роста количества выбросов вредных веществ в атмосферу.

По данным нефтегазовой компании ВР [2] выбросы углекислого газа в атмосферу в результате использования энергии, промышленного производства, факельного сжигания метана (в эквиваленте диоксида углерода) в 2021 году выросли на 5,7% до 39,0 млрд т (по данным Международного энергетического агентства — до 36,3 млрд т). Такой рост во многом объясняется эффектом экономического подъема после резкого снижения активности из-за пандемии коронавирусной инфекции (COVID-19) в 2020 году (см. рис. 2).

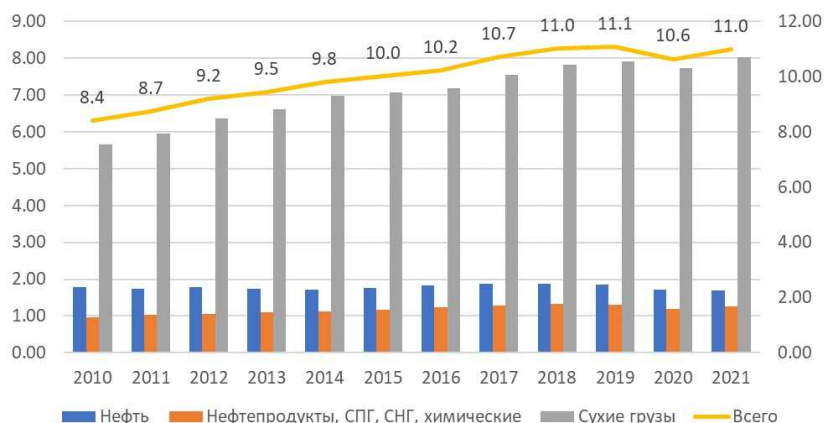


Рис. 1 Динамика объемов мировой морской торговли, млрд т

Выбросы от сжигания угля составили более 40 % общего прироста, а именно — 15,3 млрд т, что является историческим максимумом. Предыдущий рекорд в 15,1 млрд тонн был зафиксирован в 2014 году. На природный газ пришлось 7,5 млрд т выбросов, а на нефть — 10,7 млрд т.

Причиной увеличения доли использования угля в мире является излишняя волатильность цен на природный газ. Эта тенденция особенно актуальна для США и Европы. Учитывая текущие мировые политические и экономических условия, данная тенденция продолжится и в 2023 году.

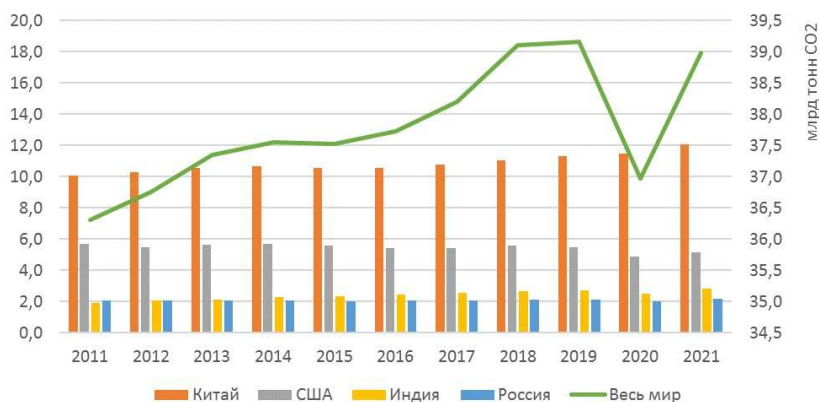


Рис. 2 Динамика выбросов углекислого газа в атмосферу

Россия по объемам выбросов CO₂ занимает 4-е место в мире (6 %). Странами, на чью долю приходится наибольшее количество выбросов парниковых газов в атмосферу, уже многие годы остаются Китай (31 %) и США (13 %). Совокупные выбросы всех европейских стран, включая Турцию, составляют 10 % (см. рис. 3).



Рис. 3 Страны, на чью долю приходится наибольшее количество выбросов парниковых газов в атмосферу на начало 2022 года

В течение последних десятилетий планомерно создается общемировая правовая основа по предотвращению необратимых изменений состава земной атмосферы в результате хозяйственной деятельности человека. Отправной точкой в ее создании является рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата 1992 года [3], ратифицированная Российской Федерацией в 1994 году. Кроме Рамочной конвенции ООН, инструментами регулирования выбросов парниковых газов в атмосферу и практического осуществления конвенции являются дополнительные документы к этой конвенции. Наиболее известными из них являются Киотский протокол 1997 года [4] и Парижское соглашение 2015 года об изменении климата, которое регулирует объемы выбросов парниковых газов начиная с 2020 года [5]. По состоянию на конец 2022 года подписанное Россией Парижское соглашение не ратифицировано, но принято согласно подписанным Постановлением Правительства [6].

На основании этих международных соглашений созданы инструменты для снижения воздействия человека на окружающую среду, представляющие собой нормативные документы различного уровня и имеющие цель снижение выбросов парниковых газов (далее — ПГ) в атмосферу. Их отличительными особенностями является общий подход к определению количества выбросов парниковых газов государствами и предприятиями через определение суммарного выброса условного CO₂ эквивалента.

Такой подход оказался удобен для предприятий, производящих конечный продукт, однако использование его применительно к организациям, оказывающим услуги, в том числе транспортные, зачастую приводит к двойному учету выбросов или их недоучету, что отрицательно сказывается как на репутации исследуемой компании, так и наносит ей материальный ущерб по целому ряду причин (штрафные санкции, увеличение себестоимости услуг и в дальнейшем потеря доли рынка).

С точки зрения экологии перевозка груза водным транспортом является значимым элементом хозяйственной деятельности, на долю которого в рамках транспортной услуги приходится наибольшее количество выбросов парниковых газов. Таким образом, проблема определения углеродного следа, оставляемого одним или несколькими судами в рамках эксплуатационной деятельности компании, является актуальной и необходимой как для решения задач, связанных с государственным учетом, так и для внутренних задач — от внутреннего аудита до вопросов обновления флота судов и/или их модернизации.

Среди инструментов, призванных ограничить и сократить выбросы парниковых газов, наиболее гибкими и эффективными считаются экономические (рыночные) инструменты, то есть такие, которые создают фактическую «цену на углерод». Это позволяет заложить в стоимость продукции те внешние издержки, которые экономике и обществу в целом придется понести для преодоления последствий выбросов, «монетизировав» урон окружающей среде. Наиболее популярные из таких инструментов — углеродные налоги и системы торговли квотами (СТК, emissions trading system, ETS) [28].

При введении углеродного налога правительство устанавливает фиксированную ставку на выбросы парниковых газов или, что более распространено, на содержание углерода в ископаемом топливе — на тонну CO₂-экв. В системах торговли выбросами правительство задает для регулируемых компаний разрешенный объем выбросов за отчетный период, за превышение которого предусмотрены штрафы. При этом формируется рынок торговли разрешениями в тоннах CO₂-экв.: компании, сократившие свои выбросы больше, чем разрешено, выступают на нем продавцами, а компании, превысившие разрешения — покупателями. В системы торговли квотами прежде всего включаются наиболее углеродоемкие сектора экономики.

Ставки углеродных налогов, как и цены в системах торговли выбросами в мире, варьируются от менее 1 долл./т CO₂-экв. до более 100 долл./т CO₂-экв. Наиболее высокие углеродные налоги (от 70 долл./т CO₂-экв.) характерны для скандинавских стран, Швейцарии и Лихтенштейна. Максимальные цены в системах торговли выбросами демонстрируют системы ЕС и Великобритании: в начале 2022 года они находились около отметки в 100 долл./т CO₂-экв. Во многом это связано с высоким уровнем жизни, благодаря которому основная масса населения в европейских странах готова переплачивать за «зеленую» и низкоуглеродную продукцию. При этом в большинстве инициатив цена на углерод остается ниже коридора 40 — 80 долл./т CO₂-экв., который, по экспертным оценкам, необходим для удержания роста глобальной температуры ниже 1,5–2°C [28].

На начало 2022 года не более 30 % выбросов парниковых газов было охвачено углеродным ценообразованием (см. рис. 4).

Вновь создаваемая Российская нормативная база дает инструменты для оценки деятельности транспортных компаний с точки зрения экологии, а также инструменты для регулирования их деятельности, призванные ускорить внедрение «зеленых» технологий путем создания рынка углеродных единиц. Теперь участники этого рынка могут регистрировать «климатические проекты»¹, выпускать углеродные единицы в обращение и проводить с ними сделки.

¹Климатический проект — комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение поглощения парниковых газов [18].



Рис. 4 Охват выбросов парниковых газов углеродным ценообразованием в мире, млрд т CO₂-экв.

Таким образом, важной целью исследования является анализ сложившейся в настоящий момент отечественной нормативной базы государственного учета углеродных единиц на водном транспорте, а также выявление потенциальных путей ее развития применительно к внутренним целям транспортной компаний, в том числе определение перспективных, базирующихся на конструктивных коэффициентах энергоэффективности, методологий учета углеродных единиц на водном транспорте.

ЗАРУБЕЖНАЯ НОРМАТИВНАЯ БАЗА КОНТРОЛЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА, ОСТАВЛЯЕМОГО МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ

В основе зарубежной деятельности по учету углеродного следа на водном транспорте лежат рекомендации Межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК [7], Протокол о парниковом газе [8] и приложения к нему [9], Приложение VI к МАРПОЛ [10], а также иные нормативные документы различного уровня: резолюции комитета ИМО по охране окружающей среды [11], [12] и документы по стандартизации различных организаций — PAS [13], ISO [14], DIN и EN [15].

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК

Руководящие принципы МГЭИК [7] служат основой для составления национальных кадастров антропогенных выбросов парниковых газов. Одной из основных задач составления кадастра инвентаризации выбросов ПГ на национальном уровне является избегание двойного учета выбросов, поэтому в тексте Руководящих принципов указывается подробная классификация источников выбросов по видам экономической деятельности. Методические подходы к оценке выбросов в категории водный транспорт соответствуют методическим подходам для оценки выбросов от передвижных источников, а сами подходы изложены в разделах 3.3 и 3.5 главы 3 тома 2 Руководящих принципов [7].

Согласно [7] транспортное судоходство относится к категории водный транспорт и имеет внутренний код 1A3d. При эксплуатации судов с энергетической установкой, использующей углеродосодержащее топливо, образуются парниковые газы. Основным парниковым газом, который образуется в результате сжигания топлива водным транспортом, является диоксид углерода. Водный транспорт производит выбросы углекислого газа (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O), а также угарного газа (CO), летучих неметановых органических соединений (ЛНОС), сернистого газа (SO₂), твердых частиц (ТЧ) и оксидов азота (NO_x). CH₄ и N₂O образуются в значительно меньших количествах, чем CO₂, и величины их выбросов в основном зависят от режима работы двигателя.

В тексте документа также указано, что выбросы парниковых газов от внутренних и международных рейсов необходимо рассчитывать отдельно. Разделение на международные и внутренние (каботажные) перевозки необходимо проводить на основании портов отправления и назначения, а не по национальной принадлежности и флагу судна.

Существуют два методологических уровня для оценки выбросов CO₂, CH₄, и N₂O от водного транспорта. Метод уровня 1 является самым простым, поскольку требует данные об использованном топливе и удельные коэффициенты выбросов, используемые по умолчанию. В рамках уровня 1 выбросы рассчитываются путем суммирования произведений количества потребленного топлива различных типов на соответствующие им коэффициенты (с учетом их справочных значений и типа судоходства – внутреннего или международного).

Метод уровня 2 также использует потребление топлива как основной источник данных с разделением на виды топлива, но требует зависящих от страны коэффициентов выбросов для большей конкретизации классификации судов, видов топлива, типа двигателя и т.д. Также метод уровня 2 поддерживает взаимосвязь с

временной составляющей процесса учета выбросов и соответствующие ей ограничения, накладываемые на существующий флот судов со стороны ИМО [8]. Коэффициенты выбросов уровня 2 зависят от местных или национальных особенностей использования водного транспорта (например, преобладание внутренних перевозок над международными) и должны рассчитываться на основании исследований о преобладающих видах топлива и двигателей внутреннего сгорания, используемых в исследуемой стране.

Таким образом, для 1 и 2 уровней расчетов выбросов необходимы данные по потреблению топлива и типам судовых двигателей. Выбросы от внутреннего водного транспорта учитываются отдельно от международного, что требует детализации данных о деятельности флота. В документе указано, что для полного охвата судоходной деятельности нужно комбинировать различные источники данных.

Важно отметить, что для представленных схем характерно определение количества выбросов через произведение массы закупленного или потраченного (в зависимости от уровня оценки) судового бункерного топлива на так называемые коэффициенты выбросов. Коэффициенты выбросов для 1 уровня расчетов для CO_2 , используемые по умолчанию, приведены в табл. 3.5.3 разд. 3.5.1.2 главы 3 тома 2 Руководящих принципов МГЭИК 2006 [7] и основаны на виде топлива и содержании углерода, а также учитывают 100 % окисление углерода. Коэффициенты выбросов для 1-го уровня расчетов для CH_4 и N_2O в обобщенном виде представлены в табл. 3.5.3 разд. 3.5.1.2 главы 3 тома 2 Руководящих принципов.

Протокол о парниковом газе. Стандарт корпоративного учета и отчетности (Greenhouse Gas Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard)

Данный нормативный документ [8], как и стандарт ISO 14064-1:2018 [16], посвящен вопросам количественного определения выбросов ПГ в организациях. Корпоративный стандарт включает следующую классификацию выбросов ПГ:

- выбросы score 1 (зона охвата 1) — прямые выбросы ПГ из стационарных и передвижных источников, которые входят во владение или контролируются организацией, за исключением выбросов от сжигания биотоплива. В этой категории учитываются выбросы от сжигания топлива в судовой энергетической установке;
- выбросы score 2 (зона охвата 2) — косвенные выбросы ПГ, выделяемые при генерации приобретаемой организацией электроэнергии (а также тепловой энергии, пара и энергии охлаждения). К судоходным компаниям в общем и к водному транспорту данный пункт применим лишь с некоторыми оговорками;
- выбросы score 3 (зона охвата 3) — все остальные косвенные выбросы ПГ.

Учет выбросов ПГ зон охвата 1 и 2 (score 1, score 2) является для организаций обязательным, зоны охвата 3 (score 3) — опциональным. Принцип определения организационных границ, а также условия определения базового периода соответствуют указанному в стандарте [16].

Расчет выбросов для зоны охвата 1 (score 1) ведется на основе данных об объемах потребляемого топлива и коэффициентов выбросов от сжигания (то есть с применением подхода на основе моделирования, согласно терминологии стандарта ISO 14064-1:2018), также доступен метод прямых измерений.

Для расчета выбросов зоны охвата 2 (score 2) используются рыночный и региональный метод, принципы применения которых в целом соответствуют описанным в стандарте ISO 14064-1:2018. При этом руководство GHG Protocol предполагает обязательное использование принципа двойной отчетности (dual reporting), согласно которому организации должны публиковать результаты расчетов выбросов по score 2 как по рыночному, так и по региональному методу. Однако, если организация получает энергоресурсы на рынках, на которых отсутствуют контрактные инструменты, она вправе рассчитывать выбросы только по региональному методу.

Приложение VI к МАРПОЛ

В 2021 году были приняты поправки к Приложению VI к МАРПОЛ [17] с требованиями к энергоэффективности судов. Комитет по защите морской среды (КЗМС) в ходе 78-й сессии доработал и принял комплект Руководств ИМО с рекомендациями по расчетам, необходимым для осуществления этих требований, подготовки и проверки отчетных документов и сертификации.

В частности, руководства [11] и [12] касаются уточнения методики расчета показателей эксплуатационной углеродоемкости судов, которые необходимо осуществлять на судах, совершающих транспортную работу, ежегодно, начиная с 2023 года.

Совокупными интегральными показателями, характеризующими энергетическую эффективность проектируемых и существующих судов, являются коэффициенты конструктивной энергетической эффективности (EEDI) и энергетической эффективности существующих судов (EEXI). Коэффициент конструктивной энергетической эффективности представляет собой отношение количества произведенного парникового газа (CO_2) судовой энергетической установкой к осуществленной морским судном работе, выраженной производством массы перевезенного груза на пройденный путь — например, в тонно-милях. В свою

очередь, EEXI — это технический или «проектный» индекс, который может быть пересчитан только путем внесения изменений в конструкцию или оборудование судна, но не за счет искусственного уменьшения проектных или коммерческих параметров судна, таких как эксплуатационная скорость или грузоподъемность.

Коэффициент EEDI учитывает влияние различных внешних факторов (условия эксплуатации судна), характеристик судна (его грузоподъемности, скорости хода) и параметров его энергетической установки (мощность, расход топлива, тип топлива, эффективность применяемых инновационных решений) на величину выбросов ПГ на единицу пути.

Так, в расчете, основанном на потребленном топливе и пройденном расстоянии за год, можно будет учитывать наличие у судна ледового класса, а также исключать из расчета данные по участкам рейсов и потребленному топливу при движении во льдах для судов ледового класса. Эти рекомендации призваны нивелировать различия в условиях эксплуатации и в конструктивных особенностях некоторых типов судов, а также учесть эксплуатационные факторы, влияющие на углеродоемкость судна.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ НОРМАТИВНАЯ БАЗА КОНТРОЛЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОРСКОМУ ТРАНСПОРТУ

В России углеродное регулирование начинает активно развиваться с 2020 года, когда по Указу Президента Российской Федерации от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» был определен национальный вклад в реализацию Парижского соглашения. Однако углеродное ценообразование в России пока не применяется.

В настоящий момент в РФ происходит процесс создания рынка углеродных единиц через создание нормативной базы — соответствующего Федерального Закона № 296-ФЗ и подзаконных нормативных актов.

Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»

Федеральным законом от 02.07.2021 № 296-ФЗ [18] регулируются правовые отношения в сфере ограничения выбросов парниковых газов в Российской Федерации. Согласно тексту документа, с 1 января 2023 года организации, годовой объем выбросов парниковых газов (далее — ПГ) которых превышает 150 тыс. тонн углеродного эквивалента (далее — CO₂-экв.), обязаны предоставлять данные о своих выбросах. С 1 января 2025 года данное обязательство будет распространено на организации, выбросы парниковых газов которых превышают 50 тыс. т CO₂-экв. в год (отчетный период начнется 01.01.2024 года).

Перечень парниковых газов, которые попадают под государственный учет и внесение в кадастр парниковых газов, утвержден распоряжением Правительства РФ от 22.10.2021 № 2979-р [19]. Помимо диоксида углерода (CO₂) в него входят метан (CH₄), закись азота (N₂O), гексафторид серы (SF₆), гидрофторуглероды (далее — ГФУ), перфторуглероды (далее — ПФУ) и трифторид азота (NF₃). В документе также приведены коэффициенты пересчета величин выбросов ПГ в эквивалент CO₂.

Согласно сформированной из [18] и [19] нормативной базе, для того чтобы выяснить, попадает ли компания-судовладелец или компания-оператор судна (если это не одно и то же лицо) под регулирование, необходимо рассчитать годовой объем выбросов ПГ путем умножения показателя применимого к ней производственного процесса (или осуществляемой ею хозяйственной деятельности) на удельный коэффициент выбросов ПГ. Перечень удельных коэффициентов выбросов ПГ на единицу производства утвержден в постановлении Правительства РФ от 14.03.2022 года № 355 «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям» [20]. В частности, для расчета объема выбросов ПГ от сжигания топлива при эксплуатации водного транспорта необходимо умножить показатель суммарного расхода топлива (в тыс. т) на коэффициенты 2,71 и/или 3,25 для разных видов используемого в судовой энергетической установке топлива (природный газ и/или флотский мазут соответственно).

Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 № 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации»

Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации (утв. распоряжением Минприроды России от 16.04.2015 года № 15-р) [21].

Эти методические указания рекомендуют рассчитывать выбросы ПГ отдельно для внутренних и международных рейсов. Такое разделение необходимо проводить на основании порта отбытия и порта прибытия, а не по национальной принадлежности и флагу судна. Таким образом, выбросы ПГ от международных рейсов охватывают грузопассажирские перевозки с территории Российской Федерации за

рубеж, независимо от национальной юрисдикции судна. Не подлежат учету выбросы парниковых газов от грузовых и пассажирских перевозок из зарубежных стран в Российскую Федерацию. Выбросы от внутренних рейсов охватывают грузовые и пассажирские перевозки в пределах территории России независимо от национальной юрисдикции судна.

Расчет выбросов парниковых газов производится на основе региональных данных об использованном топливе при внутренних/международных морских и речных перевозках, коэффициентов пересчета и рекомендуемых МГЭИК [7] коэффициентов выбросов. Руководящие принципы [7] и методика [21] рекомендуют использовать данные о деятельности водного транспорта, полученные из администрации морских портов, территориальных органов Федеральной таможенной службы, Ространснадзора, государственной статистики (Росстат), годовых отчетов судоходных компаний и поставщиков топлива. Для полного охвата судоходной деятельности необходимо комбинировать различные источники данных.

В рекомендациях Минприроды отмечено, что желательно использовать данные об экономической деятельности и коэффициенты по каждому конкретному региону, однако при отсутствии таких сведений допускается применение национальных и международных данных.

ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021 Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации

Стандарт ISO 14064-1:2018 [16] в России имеет статус ГОСТ (ГОСТ Р ИСО 14064-1 2021). Это продукт гармонизации в сфере международной стандартизации, отражающий основные принципы, изложенные в МГЭИК [7].

Для компании, осуществляющей полный цикл мультимодальных перевозок, должны совокупно учитываться прямые выбросы от транспортировки груза любым видом транспорта, а также выбросы от промежуточных действий с грузом, например, возникающие при его перегрузке в порту. Для компании-оператора, которая выполняет только транспортировку груза водным транспортом в рамках мультимодальной перевозки, должны учитываться прямые выбросы только от морского транспорта.

В рамках работы по количественному определению выбросов ПГ организация в первую очередь должна определить свои организационные границы и границы отчетности. Для определения организационных границ выбросы ПГ фиксируются по каждому конкретному объекту, а затем консолидируются с помощью одного из двух подходов: основанного на контроле (учитываются все источники выбросов, над которыми организация осуществляет финансовый или операционный контроль) и основанного на долевом участии (учитывается принадлежащая организации доля выбросов в соответствующих объектах). При установлении границ отчетности, организация определяет прямые и косвенные выбросы, связанные с ее деятельностью. Согласно стандарту, при инвентаризации выбросов ПГ организация должна учитывать все прямые выбросы ПГ (за исключением выбросов из несущественных источников) и все существенные косвенные выбросы.

Для отслеживания объемов выбросов во времени необходимо выбрать базовый период (один год или несколько лет), при этом показатели за базовый (и последующие) периоды при необходимости должны быть пересчитаны.

Количественное определение прямых выбросов может быть выполнено на основе проведения прямых измерений, либо на основе моделирования. При этом первый подход используется крайне редко в силу значительных затрат на системы непрерывного контроля, внедрение которых он предполагает. При выборе наиболее распространенного подхода, базирующегося на моделировании, рекомендуется применять методы, основанные на материально-сырьевом балансе, периодическом измерении выбросов, расчетах и т. д.

Методические указания и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации (утв. приказом Минприроды России от 30.06.2015 года № 300)

В приказе Минприроды России от 30.06.2015 года № 300 утверждены «Методические указания и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации». Текст документа [22] содержит методические указания по расчету прямых выбросов парниковых газов, то есть выбросов, связанных непосредственно с производственными объектами и процессами в пределах организации. Помимо общих указаний, которые в целом совпадают с содержащимися в рассмотренных выше нормативных документах, текст приказа не включает методические указания по учету выбросов ПГ от сжигания топлива на водном транспорте.

Методические указания по количественному определению объема косвенных энергетических выбросов парниковых газов (утв. приказом Минприроды России от 29.06.2017 года № 330)

Текст приказа [23] содержит методические указания по количественному определению косвенных энергетических выбросов — выбросов ПГ, образующихся в результате потребления организациями электрической и тепловой энергии, полученной от внешних генерирующих объектов. Для расчета косвенных

энергетических выбросов могут быть применены рыночный и региональный методы, которые в первом приближении соответствуют аналогичным методам, описанным в зарубежных стандартах.

Рыночный метод используется в том случае, если организация потребляет электроэнергию, полученную по двусторонним договорам купли-продажи электроэнергии, либо по сертификатам, подтверждающим объем производства электроэнергии на функционирующих генерирующих объектах, сведения о которых внесены в реестр. Значения коэффициентов косвенных энергетических выбросов при применении рыночного метода организациям следует запрашивать у производителей электроэнергии, либо рассчитывать самостоятельно на основе данных вышеуказанных документов.

Региональный метод предполагает использование региональных коэффициентов косвенных энергетических выбросов, которые организации рассчитывают на основе статистических данных о потреблении топлива и об объемах отпущенной электрической и тепловой энергии от всех внешних генерирующих объектов региональной энергосистемы субъекта РФ, в которой расположена организация. Региональный метод, предлагаемый в приказе Минприроды № 330, не учитывает проблему недостаточности публичных данных, не предусматривает исключение из расчета объемов электроэнергии, направленных в другие субъекты РФ, а также предполагает использование субъектов РФ в качестве территориальной ячейки, что не отражает ни топологию электросети, ни рыночные отношения.

Приказ Минприроды России от 27.05.2022 года N 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов»

В методике [24] приводятся категории выбросов и соответствующие им парниковые газы, а также методы расчета количественного определения объема выбросов ПГ по категориям источников.

В частности, представлены методики расчета количественного определения объема выбросов ПГ в различных категориях транспорта: автомобильном, железнодорожном и авиационном. Особый интерес представляет водный транспорт, для которого в тексте методики дан комментарий, согласно которому при оценке выбросов CO₂ судами не учитываются конструктивные коэффициенты энергетической эффективности новых судов морского и внутреннего водного транспорта (*Energy Efficiency Design Index*, далее — *EEDI*), а также среднегодовой эксплуатационный коэффициент энергоэффективности существующих судов морского и внутреннего водного транспорта (*Energy Efficiency Existing Ship Index*, далее — *EEXI*) и не рассматриваются использующие эти коэффициенты методики оценки выбросов парниковых газов. При этом существующие в тексте методики формулировки не позволяют сделать однозначный вывод является ли данный приведенный выше комментарий запретом на использование указанных коэффициентов *EEDI* и *EEXI* при подсчете количества CO₂ эквивалента или же является констатацией того факта, что при составлении методики ее авторы ими не пользовались. В то же время в методике представлена формула для количественного определения выбросов CO₂ в зависимости от вида топлива, типа двигателя судна и режима его работы по формуле:

$$E_{CO_2,y} = \sum_{DOM/INT,j,b,y} (F_{DOM/INT,j,b,y} \cdot CF_{TCE,j} \cdot CF_{NCV,j} \cdot EF_{j,b}) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $E_{CO_2,y}^{водн}$ — прямые выбросы ПГ от сжигания топлива и других видов топливно-энергетических ресурсов на морском и речном транспорте, т CO₂-экв. за период y ;

$F_{DOM/INT,j,b,y}$ — расход топлива вида j (мазут, дизельное топливо) на судне типа b при внутренних (DOM) или международных (INT) перевозках морским или внутренним транспортом за период y , т;

$CF_{TCE,j}$ — коэффициент пересчета в тонны условного топлива в угольном эквиваленте по виду топлива j , т.у.т/т;

$CF_{NCV,j}$ — коэффициент пересчета в тонны условного топлива в угольном эквиваленте по виду топлива j , т.у.т/т;

$EF_{j,b}$ — коэффициент выбросов CO₂ при использовании на судне типа b топлива вида a , ТДж/т.у.т;

j — вид топлива;

b — тип судна соответственно при внутренних (DOM) или международных (INT) перевозках морским или внутренним водным транспортом.

Предложенная формула (1) предполагает определение количества выброшенного судовой энергетической установкой (далее — ЭУ) в атмосферу CO₂ эквивалента, выраженного в тоннах в зависимости от вида маршрута судна (международный, внутренний), вида топлива ЭУ, типа используемых в ЭУ судна двигателей и режимов их работы. Такая постановка не предполагает учет совершенной судном полезной работы, к тому же использует большое количество допущений, таких как:

- расход топлива принимается за период y (не представлена размерность периода);
- используется коэффициент пересчета топлива в тонны условного топлива в угольном эквиваленте;
- в качестве видов топлива указаны дизельное топливо и сжиженный нефтяной газ.

Далее в качестве инструмента для расчета предлагается использовать коэффициенты пересчета применяемого в качестве топлива в тонны условного топлива в угольном эквиваленте, а при отсутствии этих данных пользоваться константными значениями (для мазута — 1,43 т.у.т/т, для дизельного топлива — 1,45 т.у.т/т).

Такой подход в дальнейшем приведет к негативным результатам, так как подобные упрощения снижают точность любых расчетных методик.

Также необходимо отметить, что при необходимости использовать данную формулу для оценки углеродного следа транспортной услуги специалист неизбежно столкнется с необходимостью оперировать не количеством потраченного топлива за определенный период времени, а количеством потраченного топлива за совершенный в ходе оказания услуги рейс. Этот момент является одним из ключевых, так как ситуации, когда морское судно на одной бункеровке может совершить несколько грузовых рейсов весьма распространены.

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА УРОВНЕ КОМПАНИЙ

Методы количественного определения выбросов ПГ водным транспортом на отраслевом и организационном уровнях рассмотрены на основе стандартов серий ИСО [14], [16], GHG Protocol [8], приказов Минприроды № 300 [22] и № 330 [23]. Необходимо отметить, что приказы [22] и [23] не содержат данных по водному транспорту, что обуславливает использование для целей учета выбросов ПГ протокола корпоративного учета ПГ [8], а также серии стандартов ИСО [14], [16] и DIN EN [15], PAS [13].

Одним из ключевых направлений развития тематики учета выбросов ПГ является учет выбросов на основе суммирования учета выбросов отдельных компаний, ведущих собственную отчетность. Такой подход особенно актуален в разрезе транспортных операций применительно к выполняющим их крупным логистическим, экспедиторским и транспортными компаниям, эксплуатирующим стационарные и передвижные источники ПГ.

При расчете выбросов парниковых газов, сопутствующих логистическим операциям, необходимо соблюдать ряд стандартов и норм. Выбор того или иного стандарта зависит от конечной цели всего расчета. В одном случае, целью расчета является определение парникового следа для транспортной услуги как таковой, но чаще всего транспортная компания оказывает перечень услуг, в таком случае целью расчета является определение корпоративного углеродного следа [8]. Необходимо отметить, что из-за существенных различий в операционной деятельности, при определении корпоративного углеродного следа используются иные инструменты и нормативные документы, чем к определению углеродного следа для отдельного товара или услуги.

Выбросы от отдельных транспортных услуг могут иметь важное значение при оценке выбросов для отдельного продукта или транспортной услуги (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнение действующих стандартов и норм в области оценки выбросов при осуществлении логистических операций

	Корпоративный углеродный след	Углеродный след продукции	Углеродный след транспортных услуг
Нормативные документы уровня стандартов	ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021 [16]; GHG Protocol [8].	PAS 2050:2008 [13]; GHG Protocol [8]; ISO 14040:2006 [14].	DIN EN 16258 [15]
Системные границы	Учитывается собственная деятельность компании; включение деятельности субподрядчиков необязательно	Учитывается общая цепочка услуг*, независимо от источника (собственная деятельность или деятельность подрядных организаций)	Учитывается общая цепочка транспортных услуг, независимо от принадлежности транспортных средств
Параметры воздействия на окружающую среду	Все парниковые газы (в эквиваленте CO ₂)	Все парниковые газы (в эквиваленте CO ₂)	Все парниковые газы + расход топлива
Выбросы от производства электроэнергии	Ведется учет электроэнергии собственной генерации, опционально – учет закупленной электроэнергии.	Ведется учет электроэнергии собственной генерации и закупленной электроэнергии.	Ведется учет электроэнергии собственной генерации и закупленной электроэнергии.
Разрешенные методы распределения выбросов по отдельным партиям	Нет данных	Предпочтительны физические величины (например, масса); допускается использовать денежный эквивалент	Только физические величины/объекты (масса груза, количество поддонов, погонных метров, контейнеров)
*механизма создания добавленной стоимости в рамках исследуемой деятельности.			

Корпоративный углеродный след

Для оценки полного углеродного следа транспортной компании в первую очередь необходимо определить количество выбросов от осуществляемых ею транспортных услуг. Для этого не требуется оценка выбросов от каждой отдельной транспортной услуги: как правило, достаточно оценить общие выбросы от всех транспортных перевозок. Таким образом, если известно общее потребление топлива парком транспортных средств, можно напрямую рассчитать общие выбросы всех транспортных услуг. В распределении выбросов от транспортного средства по каждому отдельному рейсу в контексте корпоративного углеродного следа необходимость отсутствует.

Методические принципы процесса оценки полного углеродного следа транспортной компании указаны в стандарте ISO 14064-1 [16] и в GHG Protocol [8]. При этом [8] в значительной степени охватывает тот же материал, но, в отличие от ISO 14064-1 [16], не требует выполнения сертификации внешним аудитором. В обоих стандартах рассчитываются не только выбросы непосредственно CO₂, но и эквиваленты CO₂ для других парниковых газов.

Оба рассматриваемых нормативных документа [16], [8] учета корпоративного углеродного следа требуют четкого определения границ системы, т.е. однозначного указания того, какие части компании включаются в инвентаризацию.

Стандарты проводят различие между прямыми выбросами, возникающими в результате сжигания топлива собственными транспортными средствами компании (см. табл. 2), в результате сжигания газа или мазута в компании, или в результате выброса веществ, влияющих на окружающую среду (область охвата 1 — score 1), и косвенными выбросами. Косвенные выбросы образуются в результате поставки электроэнергии и теплоснабжения (область охвата 2 — score 2), а также в результате услуг субподрядчиков, покупки и утилизации продукции, производства топлива, командировок или поездок персонала (область охвата 3 — score 3).

Таблица 2

Распределение совокупности отдельных областей деятельности транспортной компании и их влияние на окружающую среду согласно GHG Protocol [8]

Направление деятельности транспортной компании	Score 1	Score 2	Score 3
Потребление энергии от собственных транспортных средств	×		
Потребление топлива собственными производственными и иными помещениями	×		
Потери охлаждающих озоноразрушающих веществ в собственных производственных и иных помещениях	×		
Энергопотребление собственных офисов/складов/погрузочно-разгрузочного оборудования		×	
Потребление централизованного теплоснабжения помещениями компании		×	
Командировки, поездки на работу сотрудников			×
Транспортные услуги субподрядчиков			×
Сторонние склады и погрузочно-разгрузочное оборудование			×
Потребление энергии и выбросы для источников энергии			×
Энергопотребление и выбросы для продуктов производства или транспортировки			×

Компании, которые составляют кадастры ПГ в соответствии со стандартом ISO 14064 1 [16] или стандартом корпоративного учета и отчетности Протокола по выбросам парниковых газов [8], должны рассчитывать выбросы зон охвата 1 и 2 (score 1, 2), при этом отчетность по выбросам зоны охвата 3 (score 3) является необязательной. Транспортные услуги, которые оказывались не самой компанией, а нанятыми перевозчиками или субподрядчиками, подпадают под зону охвата 3 (score 3), они зачастую составляют значительную долю общих выбросов для многих транспортных компаний. Исключение этих выбросов из общей оценки затрудняет получение достоверного результата из-за неполноты всей картины. Зона охвата 3 также учитывает выбросы парниковых газов, возникающие в результате добычи сырой нефти, производства дизельного топлива на нефтеперерабатывающем заводе и всех транспортных услуг, например, доставку топлива на автозаправочных станциях (далее — АЗС).

В Протоколе по парниковым газам [8] также признается, что игнорирование выбросов, входящих в зону охвата 3 часто может дать очень неполную картину корпоративного углеродного следа. По этой причине создана поправка [9] к протоколу о парниковом газе [10], которая определяет требования для включения этих косвенных выбросов в экологический след.

Углеродный след продукции

Углеродный след продукции основан на расчете выбросов парниковых газов на протяжении всего жизненного цикла продукта или услуги. Данный способ применяется при необходимости сравнить два продукта или услуги друг с другом, при этом необходимо убедиться, что они имеют максимально близкий функционал. Таким образом, жизненный цикл продукта включает в себя всю цепочку создания добавленной стоимости и включает как производство и транспортировку сырья и продуктов первичной переработки, так и непосредственно производство и транспортировку продукта вплоть до его использования и утилизации.

По сравнению с общими выбросами продукта выбросы от его транспортировки имеют малые значения. Однако, в отличие от корпоративного углеродного следа, выбросы, возникающие при транспортировке, должны быть рассчитаны и распределены по отдельным партиям (перевозимому продукту) с использованием физических единиц (например, веса или количества поддонов, контейнеров или бигбэгов).

Углеродный след транспортных услуг

Стандарт DIN EN 16258 "Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)" / «Методология расчета и декларации о потреблении энергии и выбросах парниковых газов в отношении услуг по перевозке (грузов и пассажиров)» [15] содержит описание методологии, границ системы, распределения и источников данных, которые могут использоваться экспедиторами при целенаправленном подходе. Описание методов расчета для зданий, складов и погрузочно-разгрузочных работ в настоящем исследовании апеллирует к Протоколу по выбросам парниковых газов [8] как к нормативному документу, так как действующая версия стандарта [15] не содержит каких-либо положений на этот счет.

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

Таким образом, представленная в Приказе № 371 [24] методика может служить только для целей государственного учета в соответствии Федеральным законом от 02.07.2021 года № 296-ФЗ, в то время как для определения интегральных показателей, характеризующих энергетическую и экологическую эффективность проектируемых и существующих судов, а также для проведения сравнительного анализа экологичности работы транспортной отдельной компании или транспортной системы в целом следует использовать методы, реализующие более сложные параметрические подходы.

Для определения углеродного следа, образующегося в результате деятельности всей компании, при изготовлении ею продукции или при осуществлении ею транспортной услуги, общим, и, зачастую, наиболее значимым, элементом является потребление топлива транспортными средствами. Существующие в настоящий момент отечественные нормативные документы ориентированы на создание отчетности по факту выполненной деятельности, в то время как прогнозирование этой области крайне важно для принятия грамотных управленческих решений. В качестве простого примера можно представить задачу сравнения суммарных затрат на переоборудование судна для работы на низкоуглеродном топливе и суммарное изменение связанных с этим затрат в структуре общих затрат в течении расчетного периода времени при эксплуатации судна с заданной интенсивностью с возможной выгодой от реализации недоиспользуемых углеродных единиц. Такая ситуация является в настоящий момент нетипичной, однако все идет к появлению механизмов, в рамках которых задача обоснования необходимости модернизации ЭУ судов с этой позиции станет весьма актуальным.

Если стоимость переоборудования судна можно оценить в любом случае, и этот вопрос напрямую не связан с углеродным следом, то с оценкой постоянных затрат и количеством выброшенных в атмосферу углеродных единиц все несколько сложнее. В данном случае использование методик, описанных в отечественной нормативной базе или представленной МГЭИК [7], сопряжено с рядом очевидных сложностей. В первом случае достоверно оценить расход топлива за отчетный период возможно только для линейного судоходства, а методики, приводимые МГЭИК, дают данные по некоему «среднему» судну, хотя и с учетом специфики, присущей этому типу судов.

Одним из очевидных и уже давно используемых за рубежом решений является использование коэффициента энергоэффективности для существующего судна (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI) [12] или достигнутого коэффициента конструктивной энергетической эффективности (Attained Energy Efficiency Design Index, $EEDI_{Attained}$) [11], демонстрирующих отношение выброшенного судном количества ПГ на единицу выполненной работы. Упомянутые коэффициенты имеют размерность г CO₂-экв./((тонно-миля), и изначально [25] определялись по формуле

$$\text{the Carbon Dioxide Transport Efficiency Index} = \frac{m_{CO_2}}{(\text{transport work})}, \quad (2)$$

где m_{CO_2} — масса выброшенного в атмосферу диоксида углерода.

В последующих редакциях формула (2) стала иметь вид (на примере *Attained design CO₂ index*):

$$Attained\ design\ CO_2\ index = \frac{P_{ME} \cdot SFC_{ME} \cdot C_{FME}}{Capacity \cdot V}, \quad (3)$$

В настоящий момент формула (3) помимо мощностных характеристик (P_{ME} , P_{AE}), переводных коэффициентов (C_F), удельного расхода топлива (SFC) и характеристик транспортной работы ($Capacity$, V_{ref}) включает в себя коэффициенты, описывающие влияние проектных характеристик судна — его типа, параметров энергетической установки и влияние на ее состав и мощность агрегатов категории ледовых усилений (f_j), снижения скорости в морских условиях (f_w), использования энергоэффективных технологий (f_{eff}), ограничения вместимости судна с учетом его конструктивного исполнения и действующих в отношении него норм и правил (f_i), влияния формы корпуса судна (f_c), наличия специального грузового оборудования (f_l), — и имеет вид [9]:

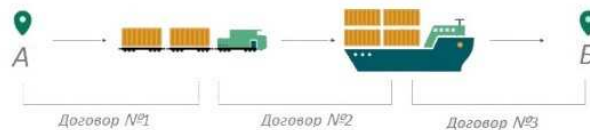
$$EEDI_{Attained} = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \\ + \frac{((\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} - \frac{\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4), в последние годы шла активная работа по внедрению поправочных коэффициентов, призванных учитывать различия между типами судов, их энергоустановок, характерными режимами работы энергоустановок и другими учитываемыми параметрами. В статьях [26, 27] представлено ретроспективное исследование эволюции способов измерения *EEDI*, которое наглядно демонстрирует процесс формирования понятийного аппарата, а также даны предпосылки для оценки влияния различных внешних факторов (условия эксплуатации судна), характеристик судна (его грузоместимости, скорости хода) и параметров его энергетической установки (мощность, расход топлива, тип топлива, эффективность применяемых инновационных решений) на величину *EEDI*.

Несмотря на внешнее усложнение как самой формулы, так и методик ее расчета, в основе ее осталось то же самое, что и было изначально — отношение массы выброшенного CO₂ эквивалента к выполненной транспортной работе.

При определении углеродного следа организацией, осуществляющей прямые или смешанные перевозки, важным моментом является определение границ отчетности, в рамках которых происходит ее деятельность. При осуществлении перевозки несколькими видами транспорта по единому договору происходит так называемая прямая смешанная перевозка (мультимодальная), в том случае, когда в рамках одной перевозки заключается несколько договоров, такая перевозка называется непрямой смешанной перевозкой (интермодальной), как изображено на рис. 5.

а)



б)



Рис. 5 Определение типа перевозки:

- а) — концепция непряой смешанной (интермодальной) грузоперевозки;
б) — концепция прямой смешанной (мультимодальной) грузоперевозки

При выполнении не прямой смешанной (интермодальной) перевозки, компании осуществляют оценку углеродного следа в рамках своей деятельности, что удобно с точки зрения определения границ ответственности, в то время как при выполнении прямой смешанной (мультимодальной) перевозки необходимо найти совокупность выбросов для всей цепочки поставок. Это может привести к недоучету выбросов или наоборот, их двойному учету, например, при перегрузке контейнеров на морском терминале.

При этом УС транспортной услуги для мультимодальной перевозки можно представить как сумму УС транспортных услуг, входящих в ее состав:

$$CF_{MM} = \sum_a CF_{TO}, \quad (5)$$

где CF_{MM} — углеродный след прямой смешанной (мультимодальной) грузоперевозки, т CO_2 -экв.;

CF_{TO} — углеродный след отдельных грузоперевозок типа а различными транспортными средствами в процессе выполнения мультимодальной перевозки (6), т CO_2 -экв.;

а — тип транспортного средства.

Для судов, имеющих Международное свидетельство об управлении энергоэффективностью судна (*Свидетельство IEE*), полученное в соответствии с резолюцией ИМО МЕРС.203(62) [17], в качестве такого коэффициента возможно принять фактическое значение коэффициента конструктивной эффективности, в то время как для неконвенциональных судов, в т.ч. числе судов с ледовым классом выше **Arc5** и судов внутреннего плавания требуется доработка существующей или создание дополнительной нормативной базы и соответствующего коэффициента энергоэффективности.

Углеродный след отдельно взятой транспортной услуги, выполняемой на маршруте с тяжелыми навигационными условиями, определяемый при помощи коэффициента энергоэффективности судна, следует представить в виде

$$CF_{TO} = \sum_{i=1}^b CF_i = \sum_{i=1}^b Capacity \cdot EKPI_i \cdot L_i, \quad (6)$$

где CF_{TO} — углеродный след на всем маршруте, т CO_2 -экв.;

CF_i — углеродный след на участке маршрута i , т CO_2 -экв.;

i — участок маршрута;

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

$EKPI_i$ — коэффициент энергоэффективности судна на участке i , г CO_2 /т-мор.миль;

L_i — длина участка маршрута i , мор. миль;

b — количество участков с различными навигационными условиями.

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

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

$$EKPI_i = \frac{(\sum_{j=1}^{n_{ME}} P_{ME} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(j)}) + ((P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}))}{Capacity \cdot V_i}, \quad (7)$$

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

n_{ME} — кол-во главных двигателей, ед.;

$C_{FME(j)}$ — переводной коэффициент количества израсходованного главными двигателями топлива в г CO_2 эквивалента;

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

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

C_{FAE} — переводной коэффициент количества израсходованного вспомогательным дизель-генератором топлива в г CO_2 эквивалента;

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

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

V_i — средняя скорость судна на участке i , уз.

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

- выполнение расчетов при помощи коэффициента конструктивной энергоэффективности, определяемого в соответствии со сложившейся зарубежной нормативной базой и не меняющегося при совершении рейса конвенциональным судном и;
- выполнение расчетов при помощи коэффициента энергоэффективности, определяемого в соответствии с формулой (7) и принимающего переменные значения на различных участках маршрута в зависимости от средней скорости движения на этом участке и соответствующей ей потребной мощности энергетической установки неконвенционального судна.

ВЫВОДЫ

Появившийся инструментарий обнажает целый ряд задач, лежащих на стыке логистики, судов и производимого ими углеродного следа. Одни задачи направлены на решение внутренней проблематики транспортно-логистических компаний и представляют собой задачи оптимизации логистических коридоров, другие — на решение задач, связанных непосредственно с судами и снижением количества парниковых газов, выбрасываемых их энергетическими установками в атмосферу. Также появляются совершенно новые задачи.

До недавнего времени вопрос перехода на альтернативные виды топлива ставился только с точки зрения удовлетворения формальным требованиям ИМО по ограничению выбросов с одной стороны и стоимостью альтернативного бункерного топлива с другой. Теперь же появилась дополнительная мотивация использования альтернативных топлив — возможность получить прибыль за счет реализации недоиспользованных организацией углеродных единиц.

Анализ существующей отечественной и зарубежной нормативной базы позволил сделать несколько важных выводов.

Отечественная нормативная база с одной стороны создает инструментарий, направленный на создание реестра углеродных единиц; в то время как методическая его часть, связанная с расчетами количества образующихся выбросов CO₂ эквивалента, — применительно к морскому транспорту — имеет архаичную структуру и не учитывает связь проектных характеристик судна и его расхода топлива, а также выполненную судном транспортную работу. Количество использованного судами топлива определяется по окончании расчетного периода. Эти особенности методики не позволяют использовать ее для решения задач по планированию деятельности транспортных компаний, направленной на модернизацию флота и извлечения прибыли из совокупности профильной деятельности и участия в новообразованной торговле углеродными единицами.

Универсальным инструментом по оценке углеродного следа в результате планируемой и осуществленной транспортной деятельности флота судов является использование технологий расчета коэффициентов энергоэффективности эксплуатируемых судов. Для судов, имеющих Международное свидетельство об управлении энергоэффективностью судна (Свидетельство IEE), полученное в соответствии с резолюцией ИМО МЕРС.203(62) [17] в качестве такого коэффициента необходимо принять фактическое значение коэффициента конструктивной эффективности EEDI, в то время как для неконвенциональных судов, в т.ч. числе судов с ледовым классом выше **Arc5** и судов внутреннего плавания требуется доработка существующей или создание дополнительной нормативной базы и соответствующего коэффициента энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). Database Portal. Режим доступа: <https://unctadstat.unctad.org/> (дата обращения: 13.04.2023).
2. BP Statistical Review of World Energy 2022, 71st edition. Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (дата обращения: 13.04.2023).
3. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата 1992 года.
4. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата от 11 декабря 1997 года.

5. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции об изменении климата (Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change).
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2019 года № 1228 «О принятии Парижского соглашения».
7. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 года. Подготовлены Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Под ред. С. Иглестона, Л. Буэндия, К. Миwa, Т. Нгара и К. Танабе. Т. 1 — 5. — ИГЕС, Япония, 2006.
8. Корпоративный стандарт (Corporate Accounting and Reporting Standard) серии GHG Protocol и приложение к нему — Руководство по расчету выбросов scope 2 (Scope 2 Guidance).
9. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard, Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard.
10. Приложение VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененная Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78). ИМО, актуальная версия.
11. Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships (resolution MEPC.308(73), adopted on 26 October 2018).
12. Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency existing ship index (EEXI) (RESOLUTION MEPC.350(78), adopted on 10 June 2022).
13. PAS 2050:2008 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.
14. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
15. DIN EN 16258 Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers) / Методология расчета и декларации о потреблении энергии и выбросах парниковых газов в отношении услуг по перевозке (грузов и пассажиров).
16. ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals / ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021 Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации.
17. Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI. Resolution MEPC.203(62), Adopted on 15 July 2011, Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships.
18. Федеральный закон № 296-ФЗ от 02.07.2021 года «Об ограничении выбросов парниковых газов».
19. Распоряжение Правительства РФ № 2979-р от 22.10.2021 года «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов».
20. Постановление Правительства РФ № 355 от 14.03.2022 года «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям».
21. Распоряжение Минприроды России № 15-р от 16.04.2015 года «Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации».
22. Методические указания и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации (утв. приказом Минприроды России № 300 от 30.06.2015 года; с учетом проекта изменений к приказу).
23. Методические указания по количественному определению объема косвенных энергетических выбросов парниковых газов (утв. приказом Минприроды России № 330 от 29.06.2017 года).
24. Приказ Минприроды России № 371 от 27 мая 2022 года «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов».
25. MEPC/Circ.471 29 July 2005 Interim guidelines for voluntary ship CO₂ emission indexing for use in trials.
26. Иванченко А.А., Петров А.П., Живлюк Г.Е., Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Вып. 2, 2015, с. 103 — 112.
27. Егоров Г.В., Колесник Д.В. Оценка энергоэффективности грузовых судов смешанного плавания. Автоматизация судовых технических средств: Научно-технический сборник. Одесса: ОГМА, Вып. 18, 2012, с. 27 — 43.
28. Международные подходы к углеродному ценообразованию. Доклад Минэкономразвития России. 2021. Режим доступа: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf> (дата обращения: 13.04.2023)
29. Эффекты различных форм цены на углерод для сокращения выбросов парниковых газов и социально-экономического развития. Доклад АНО «Центр международных и сравнительно-правовых исследований». 2022. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/a66/orj475r89ks7wfbqnfxcjfqnp5uoox.pdf> (дата: обращения 13.04.2023)

REFERENCES

1. The United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). Database Portal. Webpage: <https://unctadstat.unctad.org/>
2. BP Statistical Review of World Energy 2022, 71st edition. Webpage: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed on 13.04.2023)
3. Framework Convention on Climate Change, UN FCCC.
4. UNFCCC (2005) Caring for Climate: A guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol (revised 2005 edition).
5. Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change.
6. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 21.09.2019 No.1228 "O prinyatii Parizhskogo soglasheniya"* [RF Government Decree "On adoption of the Paris Agreement" No. 1228 dated 21.09.2019].
7. IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
8. GHG Protocol Scope 2 Guidance ISBN: 978-1-56973-850-4.
9. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard, Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard.
10. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78.
11. Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships (IMO resolution MEPC.308(73), adopted on 26 October 2018).

12. Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency existing ship index (EEXI) (IMO resolution MEPC.350(78), adopted on 10 June 2022).
13. PAS 2050:2008. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.
14. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
15. DIN EN 16258. Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers).
16. ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals.
17. Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI. Resolution MEPC.203(62), Adopted on 15 July 2011, Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships.
18. *Federalny zakon No. 296-FZ ot 02.07.2021 goda "Ob ogranichenii vybrosov parnikovyykh gazov"* [Federal law No. 296-FZ dated 02.07.2021 "On limiting greenhouse gas emissions"].
19. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF No. 2979-r ot 22.10.2021 "Ob utverzhdenii perechnya parnikovyykh gazov, v otnoshenii kotorykh osushchestvlyayetsya gosudarstvennyy uchët vybrosov parnikovyykh gazov i vedenie kadastra parnikovyykh gazov"* [RF Government Executive Order No. 2979-r dated 22.10.2021 "On approval of greenhouse gases list and keeping the inventory of greenhouse gases"].
20. *Postanovlenie Pravitelstva RF No. 355 ot 14.03.2022 goda "O kriteriyakh otneseniya yuridicheskikh lits i individual'nykh predprinimateley k reguliruemym organizatsiyam"* [RF Government Decree No. 355 dated 14.03.2022 "On the criteria of defining legal bodies and sole proprietors as regulated entities"].
21. *Rasporyazhenie Minprirody Rossii No. 15-r ot 16.04.2015 goda "Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu dobrovolnoy inventarizatsii ob'yoma vybrosov parnikovyykh gazov v subektakh Rossiyskiy Federatsii"* [Executive Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 15-r dated 16.04.2015 "Methodical recommendations on conducting voluntary inventory of greenhouse gases emissions in constituent entities of the Russian Federation"].
22. *Metodicheskie ukazaniya i rukovodstva po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema vybrosov parnikovyykh gazov organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi khozyaystvennuyu i inuyu deyatel'nost' v Rossiyskoy Federatsii (utv. prikazom Minprirody Rossii No. 300 ot 30.06.2015; s uchëtom proekta izmeneniy k prikazu)* [Methodical instructions and guidelines on quantitative determination of greenhouse gases emissions by organizations carrying out economic or other activity in the Russian Federation (appr. by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 300 dated 30.06.2015, as draft-amended)].
23. *Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema kosvennykh energeticheskikh vybrosov parnikovyykh gazov (utv. prikazom Minprirody Rossii No. 330 ot 29.06.2017)* [Methodical instructions on quantitative determination of indirect power greenhouse gases emissions (appr. by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 330 dated 29.06.2017)].
24. *Prikaz Minprirody Rossii No. 371 ot 27.05.2022 goda "Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov vybrosov parnikovyykh gazov i pogloshcheniy parnikovyykh gazov"* [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 371 dated 27.05.2022 "On approval of procedures of quantitative determination of greenhouse gases emissions and greenhouse gases absorption"].
25. MEPC/Circ.471 29 July 2005. Interim guidelines for voluntary ship CO₂ emission indexing for use in trials.
26. Ivanchenko A., Petrov A.P., Zhivlyuk G.E., *Energeticheskaya effektivnost' sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov* [Energy efficiency of ships and regulations of greenhouse gas exhaust] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, Vyp. 2, 2015. pp. 103 — 112.
27. Egorov G.V., Kolesnik D.V. *Otsenka energoeffektivnosti gruzovykh sudov smeshannogo plavaniya* [Estimation of energy efficiency of cargo ships of river-sea navigation] Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv: Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Odessa: OGMA, Vyp. 18, 2012. pp. 27 — 43.
28. *Mezhdunarodnye podkhody k uglerodnomu tsenoobrazovaniyu. Doklad Minekonomrazvitiya Rossii* [International approaches to hydrocarbon price formation. Report of the Ministry of Economic Development of Russia]. 2021, Webpage: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c13068c695b51eb60ba8cb2006dd81c1/13777562.pdf>. (accessed on 13.04.2023)
29. *Effekty razlichnykh form tseny na uglerod dlya sokrashcheniya vybrosov parnikovyykh gazov i sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya. Doklad ANO "Tsentr mezhdunarodnykh i sravnitel'no-pravovykh issledovaniy"* [Effects of different forms of pricing of hydrocarbons for reducing greenhouse gases emissions and for economic development. Report of ANO "Centre of international and comparative legal research"] 2022. Webpage: <https://www.csr.ru/upload/iblock/a66/opj475r89ks7wfbqnfxcjfqj5puoox.pdf>. (accessed on 13.04.2023).

УДК 621.431.74

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА НА МОРСКИХ СУДАХ

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

М.С. Богданов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: bogdanov.ms@rs-class.org

В статье проведен анализ потребления различных видов судового топлива на транспортных судах в зависимости от их назначения по данным опубликованным ИМО за последние 3 года. Приводятся данные по использованию альтернативного топлива на морских судах валовой вместимостью 5000 т и более. Сделаны выводы о незначительном росте потребления альтернативных видов топлива, характерным для транспортных судов всех типов за исключением рефрижераторов. Для всех типов судов характерно увеличение доли потребления СПГ при увеличении их размеров. Произведено сравнение объемной энергетической емкости различных альтернативных видов топлива, которые рассматриваются ИМО как перспективные для использования на судах. При сравнении наихудшими оказались показатели топлив с нулевым выбросом CO₂: водорода, аммиака и электрических батарей.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, альтернативные виды топлива, плотность энергии топлива, углеродная интенсивность

ANALYSIS OF THE CONSUMPTION OF ALTERNATIVE FUELS ON SEA-GOING SHIPS

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

M.S. Bogdanov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: bogdanov.ms @rs-class.org

The article analyzes the consumption of various types of marine fuel on transport ships, depending on their purpose, according to data published by IMO over the past 3 years. The data on the use of alternative types of fuel on sea-going ships with a gross tonnage of more than 5000 and on ships of the Register class have been given. Conclusions have been drawn about a slight increase in the consumption of alternative fuels, typical for transport ships of all types, with the exception of refrigerators. For all types of ships, an increase in the share of LNG consumption with increasing size is typical. A comparison is made of the volumetric energy capacity of various alternative fuels, which are considered by IMO as promising for use on ships. When compared, the worst performance was found for fuels with zero CO₂ emissions: hydrogen, ammonia and electric batteries.

Keywords: greenhouse gas emissions, alternative fuels, fuel energy density, carbon intensity. greenhouse gas emissions, carbon intensity

Рост глобальных энергетических потребностей промышленности и населения, а также необходимость снижения экологических последствий загрязнений, вызванных этим ростом, свидетельствуют об актуальности поисков принципиально новых технических решений. Для современных и перспективных судов этот вопрос не менее актуален. Одним из направлений таких поисков в судовой энергетике, является применение новых видов топлива.

История развития энергетики в целом и судовой энергетики в частности во многом представляет собой историю применения новых видов топлива и новых способов получения энергии из этих видов топлива. В настоящее время активно рассматриваются новые виды топлива и энергии, которые будут соответствовать все более высоким экологическим требованиям Международной морской организации (ИМО). При этом, для успешного применения нового вида топлива на судах требуется развитие инфраструктуры и наличия судов, готовых для использования нового вида топлива.

В настоящее время весомыми стимулами инноваций в судовой энергетике становятся международные регуляторные инициативы, которые уже соперничают с экономическими факторами, хотя последние по-прежнему остаются решающими для судовладельцев. Принятые ИМО требования к содержанию вредных веществ в выхлопных газах судовых двигателей вынуждают судовладельцев искать новые виды топлива, применение которых имеет определенные преимущества на каждом из этапов потребления топлива.

Информация, опубликованная в конце прошлого года ИМО о потреблении мировым судоходством различных сортов топлива, дает возможность проанализировать тенденции в судовой энергетике и попытаться предугадать пути дальнейшего развития. Таким образом целью настоящей работы считаем объективное сравнение показателей эффективности различных видов альтернативных топлив, уже нашедших применение на судах и тех видов топлива, которые рассматриваются в качестве перспективных для достижения целей ИМО в области уменьшения выбросов в атмосферу с морских судов.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ

Жизненный цикл использования любого вида топлива можно представить как совокупность нескольких процессов: получение топлива (включая добычу и переработку), транспортировка топлива на объект энергетики (этот этап заканчивается бункеровкой на судне), хранение в месте использования (для судовой энергетики — на судне), получение энергии (для судовой энергетики — в главном двигателе), передача энергии конечному потребителю (на судне это передача от главного двигателя движителю), полезное использование энергии (на судне — привод движителя). Таким образом, на привлекательность применения нового вида топлива так или иначе оказывают влияние затраты энергии, труда и финансовых средств на всем пути энергии от добычи ископаемого сырья на месторождении до гребного винта на судне. Для каждого из этих этапов характерны специфические опасности для людей и экологии, энергетические и финансовые потери, которые должны учитываться при оценке возможности и эффективности применения новых видов топлива на судах.

Использование СПГ в качестве топлива может способствовать снижению выбросов в атмосферу по сравнению с обычными видами топлива как в плане выбросов парниковых газов, так и других загрязняющих веществ. Но если учитывать выбросы CO_2 за весь жизненный цикл, то при использовании СПГ необходимо учитывать, что затраты на сжижение метана составляют обычно $5 \div 7 \%$, кроме того протечки метана в атмосферу при использовании 2-тактного двигателя внутреннего сгорания составляют до 1% потребляемого метана, потенциал глобального потепления (GWP) которого в 21^1 раз больше по сравнению с этим показателем для углекислого газа.

Сжигание СПГ и других альтернативных видов топлива приводит к более низким выбросам CO_2 (примерно на 20%) по сравнению с традиционным топливом на основе нефти из-за более низкого отношения числа атомов углерода к числу атомов водорода. Но в настоящее время в ИМО активно обсуждается идея учета общего количества выбросов парниковых газов за весь цикл производства и потребления топлива, с учетом утечек несгоревшего метана при использовании СПГ. Согласно оценкам, сделанным в [1], даже с учетом жизненного цикла, потребление СНГ и СПГ связано с меньшими выбросами парниковых газов по сравнению с топливом на основе нефти. Сочетание низкого уровня выбросов при производстве и сжигании дает общее сокращение выбросов парниковых газов для СНГ на 17% по сравнению с HFO или MGO. Это сравнимо с выбросами парниковых газов от СПГ, которые зависят от величины утечек метана, применяемой технологии сжижения и способа потребления в двигателе. Выбросы парниковых газов в $\text{кг CO}_2\text{-экв/ГДж}$ для топлива на нефтяной основе, СНГ и СПГ по данным [1] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Выбросы CO_2 в течение жизненного цикла при использовании различных видов судового топлива (г $\text{CO}_2\text{-экв/мдж}$)

	Тяжелое топливо (HFO)	Легкое топливо (MGO)	Пропан/бутан	СПГ
От скважины до топливного танка	9,79	12,69	7,15	9,68
От топливного бака до гребного винта	77,70	74,40	65,50	61,80
Отличие от HFO без учета жизненного цикла	0 %	– 0,4 %	– 15,7 %	– 20,4 %
Всего (от скважины до гребного винта)	87,49	87,09	72,65	71,48
Отличие от HFO с учетом жизненного цикла	0 %	– 0,5 %	– 17 %	– 18,3 %

Из табл. 1 следует, что даже с учетом жизненного цикла использование альтернативных видов топлива, таких как СПГ и СНГ, сокращает выбросы парниковых газов примерно на одну шестую по сравнению с традиционным судовым топливом.

¹Согласно положениям Второго доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (1995 г.).

ИЗМЕНЕНИЯ В СТРУКТУРЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА НА СУДАХ

Как известно, выхлопные газы судовых двигателей содержат 4 основных вида вредных выбросов: к наиболее опасным и токсичным относят оксиды азота NO_x и серы SO_x, которые регулируются Приложением VI к МАРПОЛ, частицы «черного углерода» (выбросы не регулируются МК МАРПОЛ) и CO₂, выбросы которого регулируются правилом 18 МАРПОЛ путем регулирования энергоэффективности судов.

Из третьего исследования ИМО 2014 года о загрязнении атмосферы от судоходства следует, что вклад судоходства в глобальные выбросы составляет 15 % выбросов NO_x, 13 % выбросов SO_x и 2,8 % выбросов парниковых газов.

Первым серьезным стимулом применить новые виды топлива стало введение особых зон по выбросам NO_x и SO_x, однако и в этом случае большинство судовладельцев предпочло другие возможные пути решения этих проблем. С 01.01.2020 года допустимое содержание серы в топливе — не более 0,5 %. В особых зонах с 2015 года допустимое содержание серы в топливе — не более 0,1 %. Для решения образовавшихся проблем судовладельцы в основном пошли наименее затратным путем — перешли на потребление топлива с низким содержанием серы. Другим не менее популярным решением для очистки выхлопных газов от оксидов серы стало использование скруббера для очистки выхлопных газов от SO_x. Эти решения отчетливо прослеживаются из данных ИМО о потреблении топлива за 2019 — 2021 гг, которые показаны на рис. 1.

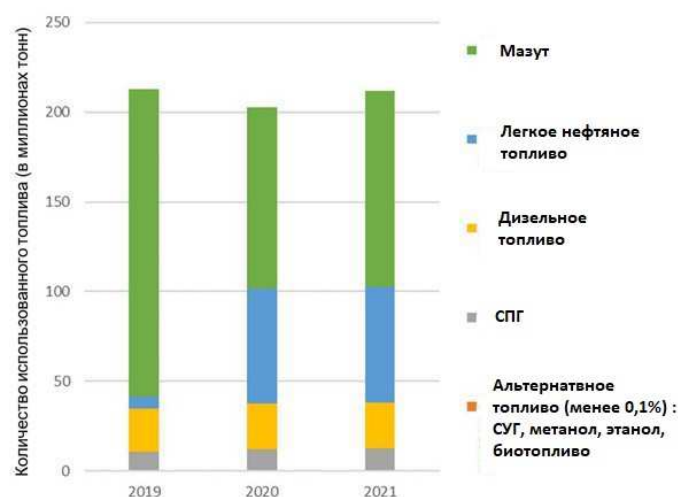


Рис. 1 Совокупное годовое потребление морскими судами GT 5000 и более различных сортов топлива по данным ИМО [2]

На диаграмме показано, что потребление судоходством тяжелого топлива в 2020 году по сравнению с 2019 годом уменьшилось в 1,6 раза — примерно на 70 млн тонн. Если в 2019 году доля тяжелого топлива от общего количества традиционного топлива нефтяного происхождения составляла примерно 85 %, то в 2021 году эта цифра уменьшилась до 55 %. При этом потребление дистиллятных сортов топлива изменилось незначительно, большая часть мазута была замещена легкими сортами топлива, что не может не сказаться отрицательно на стоимости морских перевозок.

Рост цен на топливо нефтяного происхождения хотя и приводил судовладельцев к необходимости его экономить, но не стимулировал переходить на более чистые источники энергии. Увеличение цены на топливо закладывалось в расходы, увеличивало цену фрахта и в конце концов его оплачивало общество.

Таким образом, можно выделить следующие причины повышенного интереса к альтернативным источникам энергии на судах:

1. рост цен на нефтяное топливо;
2. экологические ограничения NO_x и SO_x;
3. требования к энергоэффективности судов (ограничение выбросов CO₂).

Еще одним серьезным стимулом задуматься о применении новых видов топлива, особенно актуальным для российских судовладельцев, стало принятие ИМО ограничений по использованию тяжелого топлива в Арктике. Резолюция МЕРС.329(76) о поправках к Приложению I к МАРПОЛ относительно запрета на использование и перевозку для использования в качестве топлива тяжелого нефтяного топлива судами в

арктических водах (поправки вступили в силу 1 ноября 2022 года, начало применения — 1 июля 2024 года), сделаны исключения только для судов, обеспечивающих безопасность мореплавания, спасения других судов и судов спроектированных для ликвидации разливов нефти.

АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ И НАЗНАЧЕНИЯ СУДОВ-ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ

Среди новых источников энергии, потенциально применимых для судоходства в настоящее время активно обсуждаются следующие виды [3]:

1. сжиженный природный газ (СПГ);
2. метанол;
3. этанол;
4. сжиженный углеводородный газ (СУГ);
5. сжиженный аммиак;
6. сжиженный водород;
7. биотопливо (биодизель);
8. электробатарей.

При этом большинство из перечисленных видов топлива уже нашло применение на судах в эксплуатации. В настоящее время в мире нет общепринятого определения, какое топливо считать альтернативным. Обычно под этим подразумевают любое нетрадиционное топливо, сырьем для производства которого не является ископаемая нефть. Но является ли тогда СПГ альтернативным топливом, так как его применение на газовозах насчитывает уже десятки лет? Являются ли пропан и бутан (СУГ) альтернативными видами топлива, если их производят из нефти? Авторам при анализе потребления альтернативных видов представляется логичным считать альтернативным топливом СПГ, потребляемый на судах, не являющимися газовозами, а все виды нетрадиционного топлива, включая СПГ, пропан и бутан считать альтернативным.

Общемировые тенденции по изменению потребляемого топлива можно проследить по информации, приведенной секретариатом ИМО в документе МЕРС 79/6/1 [2], где собраны и просуммированы данные отчетов Морских Администраций (МА), представленных о потреблении в 2021 году топлива на судах валовой вместимостью $GT > 5000$, подпадающих под действие Правила 27 Приложения VI МАРПОЛ. Всего в мире таких судов 32998 под флагами 159 МА, поступили данные о 28171 судах, что составляет 85,4 %.

Согласно представленным данным традиционное топливо нефтяного происхождения (кроме пропана и бутана) в общем потреблении топлива на судах составило чуть менее 94 %. Чуть менее 6 % составило потребление СПГ. Из общего количества СПГ, использованного как топливо, на газовозы, где этот вид топлива используется традиционно уже многие десятилетия, пришлось 79 %. Таким образом в результате внедрения в морской отрасли Кодекса МГТ (IGF Code) потребление СПГ составляет уже более 1 % от общего количества топлива (по весу), что не так уж мало с учетом того, что Кодекс МГТ принят 11 июня 2015 года и вступил в силу 01.01.2017 года, то есть не прошло и пяти лет после начала его применения.

В отчетах МА так же присутствовали такие виды топлива, как пропан, бутан, метанол, этанол, этан и биотопливо, которые в сумме составляли 0,11 % от общего количества топлива (по массе). В сумме использование всех видов альтернативного топлива на судах составляют всего 0,35 % по массе без учета разницы в теплоте сгорания топлива, большую часть которого (около 70 %) составляет СПГ (см. рис. 2).

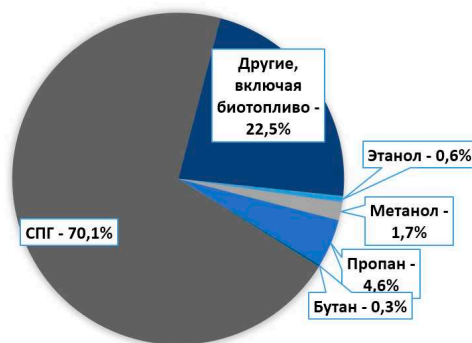


Рис. 2 Совокупное годовое количество альтернативного топлива, потребляемого всеми типами транспортных судов $GT 5000$ и более, кроме газовозов

Приведенные ИМО данные о потреблении топлива судами различных типов позволяют проследить для каких судов наиболее востребованы альтернативные топлива. Из рис. 3 следует, что 96 % потребления СПГ на судах приходится на газовозы и только 4 % потребляют суда других типов. Распределение указанных 4 % между судами различных типов показано на рис. 4. Из представленных данных следует, что СПГ успешно применяется на транспортных судах практически всех типов, особо можно выделить контейнеровозы и танкеры. Единственный тип судна, на котором СПГ как топливо пока не нашел применение, это рефрижераторы.

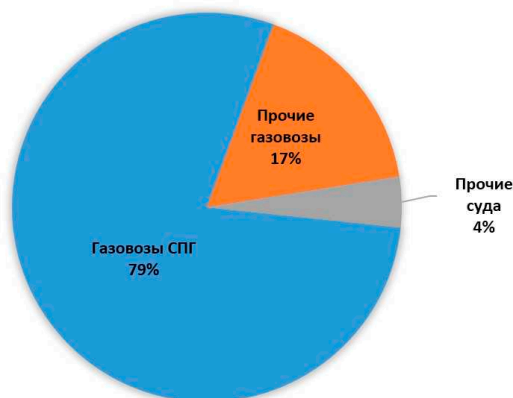


Рис. 3 Потребление СПГ на морских судах

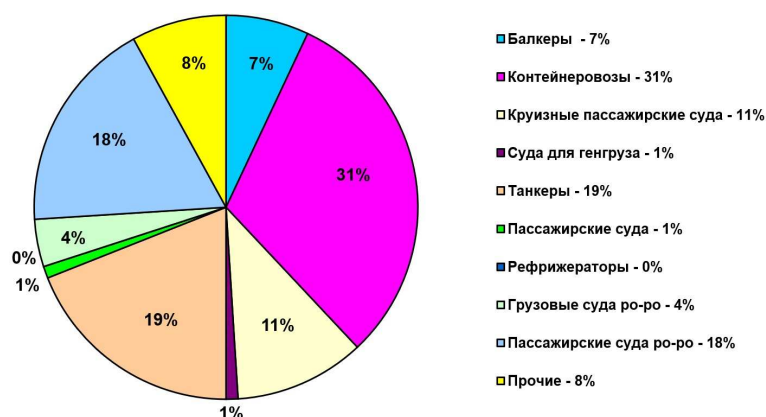


Рис. 4 Потребление СПГ на морских судах, не являющихся газовозами

Из анализа размеров судов следует, что преимущественно для потребления СПГ используются суда крупных размеров. Наиболее ярко это прослеживается для контейнеровозов, где 54 % СПГ приходится на суда с DWT более 200 тыс. т, а на суда DWT менее 120 тыс. т приходится около 15 % СПГ использованного как топливо. Аналогичная картина наблюдается и для других типов судов-потребителей СПГ: у танкеров более 75 % потребления приходится на суда DWT более 20 тыс. т, у судов для генеральных грузов на суда DWT более 15 тыс. т приходится 58 % потребления СПГ этим типом судов, для круизных пассажирских судов на суда с GT 85000 и более приходится 99 % потребления СПГ судами этого типа.

Другие виды альтернативного топлива используются на значительно меньшем числе типов судов по сравнению с СПГ. Бутан нашел применение только на газовозах и танкерах. Пропан, помимо газовозов и танкеров, используется на балкерах, небольших контейнеровозах (DWT от 15 до 40 тыс. т), круизных пассажирских судов в размерной группе GT от 25000 до 85000. Этанол нашел применение на судах для генгруза, а метанол на танкерах для перевозки метанола и на одном пассажирском судне.

Из анализа размеров судов-потребителей альтернативных топлив можно сделать выводы, что наиболее заинтересованы в использовании СПГ суда больших размеров, что верно для судов всех типов. Потребление пропана, бутана, метанола и этанола носит в настоящее время скорее экспериментальный характер и делать выводы об оптимальных размерах судов для потребления этих видов топлива для судов различных типов пока невозможно.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Следует отметить, что в последнее время ИМО и страны ЕС активно лоббируют применение на судах тех видов топлива, при сжигании которых не выделяется CO_2 (аммиак и водород).

Для грузовых судов, в отличие от летательных аппаратов, при расположении на судне не так важен вес топлива, как занимаемый им на судне объем, так как от этого зависит реальная эффективность перевозок. Для адекватной оценки эффективности применения различных топлив на диаграмме (см. рис. 5) приведена относительная плотность энергии различных топлив, то есть теплота, выделяемая при сгорании определенного объема топлива, отнесенная к аналогичному показателю для дизельного топлива. Относительную плотность по объему получаем, умножая теплоту сгорания вещества на его плотность и деля на теплоту сгорания дизельного топлива и плотность дизельного топлива, то есть за единицу принята плотность энергии дизтоплива.

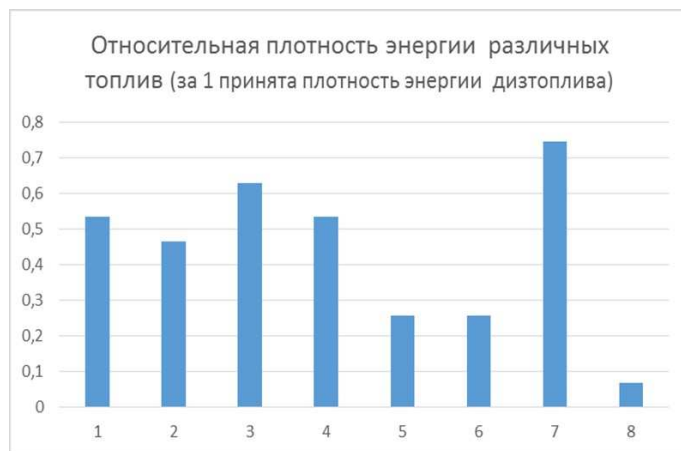


Рис. 5 Сравнение относительной плотности энергии различных топлив (за единицу принята энергетическая плотность дизельного топлива):

1 — СПГ; 2 — метанол; 3 — этанол; 4 — СУГ; 5 — сжиженный аммиак; 6 — сжиженный водород; 7 — биодизель; 8 — электробатареи

Энергетическая плотность (по объему) для всех топлив на 40 — 70 % меньше, чем у дизельного топлива, а это значит, что запасы такого топлива на судне должны быть существенно больше. Наименее привлекательными согласно этому показателю оказываются виды топлива, которые совсем не выделяют CO_2 при горении: водород, аммиак и электрические батареи.

На диаграмме на рис. 6 показано сравнение выбросов CO_2 при сжигании различных топлив относительно выделяемой при сгорании тепловой энергии. За единицу принят показатель дизтоплива. Аналогично



Рис. 6 Сравнение относительной углеродоемкости различных топлив:

1 — дизельное топливо (ДТ); 2 — легкое топливо (ЛТ); 3 — тяжелое топливо (ТТ); 4 — пропан; 5 — бутан; 6 — СПГ; 7 — метанол; 8 — этанол

предыдущей диаграмме за единицу принято количество CO_2 выделяемого на 1 КДж тепловой энергии, получаемой при сжигании дизтоплива. Этот показатель можно считать «относительной вредностью» различных видов топлива. Наибольшее снижение приходится на СПГ (24 %).

Из проведенного анализа следует, что наиболее перспективными видами альтернативных топлив для судов является СПГ, пропан и метанол. Но следует иметь ввиду, что настоящая оценка учитывает только объем применяемого вещества и не учитывает потери объема, необходимые на судне для размещения емкостей, в которых это вещество хранится. Но эта задача существенно сложнее и ей возможно заняться в качестве продолжения настоящей работы.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ НА СУДАХ С КЛАССОМ РЕГИСТРА

Российский морской регистр судоходства развивает требования по применению альтернативных топлив с 2013 года, когда были впервые выпущены требования для судов с дополнительным знаком **GFS** в символе класса, говорящим о том, что судно может использовать газовое топливо [4].

На сентябрь 2021 года знак **GFS** имело 48 судов, из которых 23 не являлись газовозами:

- 18 нефтеналивных судов типа «Проспект Гагарина» и «Владимир Мономах» проекта 131110 (7 построено, 6 в постройке, 5 постройка запланирована);
- 2 накатных судна проекта CNF19M (в постройке «Маршал Рокосовский» и «Генерал Черняховский»);
- 3 судна нефтеналивное/химовоз проекта 1033 (все в постройке, головное «Иван Айвазовский»).

В 2016 году появились требования Регистра к бункеровщикам СПГ [4]. Словесная характеристика **LNG bunkering ship** (судно-бункеровщик СПГ) присвоена пока одному судну — построенному в 2021 году в Китае судну «Дмитрий Менделеев».

В 2022 году Регистр внедрил требования к использованию метанола и этанола на судах в качестве топлива, в виде нового раздела части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил классификации и постройки морских судов, в котором изложены требования к судам с дополнительным знаком **LFLFS (Me)** или **LFLFS (Et)** (Low Flashpoint Liquid Fuelled Ship, (Methanol) или (Ethanol)). Основные принципы обеспечения безопасности, на судах с дополнительным знаком **LFLFS** при использовании метанола такие же как на судах при использовании СПГ. Существенным преимуществом применения метанола как топлива по сравнению с СПГ является возможность разместить его на судне в междудонных танках ниже ватерлинии.

ВЫВОДЫ

1. За три рассмотренных года существенно снизилось потребление судоходной отраслью тяжелых сортов топлива в пользу легких сортов топлива нефтяного происхождения.

2. При сравнении потребления топлива за три года очевидна тенденция увеличения доли альтернативных топлив для всех типов транспортных судов кроме рефрижераторов. В общем количестве использованного судами топлива альтернативные виды топлива занимают пока весьма скромное место. Наибольшее развитие применение альтернативных топлив получило на транспортных судах крупных размеров.

3. При сравнении объемной энергетической емкости различных альтернативных видов топлива наилучшими оказались показатели топлив с нулевым выбросом CO_2 — водорода, аммиака и электрических батарей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DNV-GL. LPG AS A MARINE FUEL. Режим доступа: <https://www.dnv.com/Publications/lpg-as-marine-fuel-95190>, дата обращения: 01.06.2022.
2. MEPC 79/6/1 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2021).
3. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна, Российский морской регистр судоходства. СПб, 2023.

REFERENCES

1. DNV-GL. LPG AS A MARINE FUEL. Webpage: <https://www.dnv.com/Publications/lpg-as-marine-fuel-95190>, accessed on: 01.06.2022
2. MEPC 79/6/1 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2021).
3. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020, International Maritime Organization (IMO), London, UK, July 2020.
4. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVII. Distinguishing Marks and Descriptive Notations in the Class Notation Specifying Structural and Operational Particulars of Ships. Russian maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2023 (In Russian).



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629. 5.017.2/3

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МОДИФИКАЦИИ КРИТЕРИЯ РИСКА ПОТЕРИ ОСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ СУДНА НА ГРЕБНЕ ВОЛНЫ (БРОЧИНГЕ), ПРЕДЛОЖЕННОГО ИМО

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

В.В. Макарова, Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: mvv-220294@mail.ru

Ю.П. Потехин, канд. техн. наук, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

В.Р. Самойлов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: samoylov.vr@rs-class.org

В статье рассматривается предлагаемый ИМО критерий риска потери остойчивости вследствие брочинга при движении судна на гребне попутной волны. В статье также обозначены ключевые моменты брочинга с учетом исследований Д.М. Ананьева. Показано, что ряд вычислительных процедур алгоритма оценки риска не отвечает существу постановки задачи и может быть исключен. Кроме того, уточняется диапазон чисел Фруда, при которых реализуется захват судна попутной волной. Откорректировано условие захвата попутной волной исходя из предположения об известности значения частоты вращения гребного винта. В статье предложены формулы для вычисления сил Фруда — Крылова. Корректность внесенных изменений проверена расчетом критерия риска для шести различных судов. Представлена откорректированная форма критерия риска потери остойчивости от брочинга ИМО.

Ключевые слова: захват судна попутной волной, условия захвата попутной волной, брочинг, критерий риска потери остойчивости

PROPOSAL FOR MODIFICATION OF VULNERABILITY CRITERION FOR SURF-RIDING (BROACHING) STABILITY FAILURE SUGGESTED BY IMO

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

V.V. Makarova, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: mvv-220294@mail.ru

Yu.P. Potekhin, PhD, SMTU, St. Petersburg, e-mail: i.y.potekhins@yandex.ru

V.R. Samoilov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: samoylov.vr@rs-class.org

The paper covers vulnerability criterion for stability failure due to broaching during surf-riding suggested by IMO, while also outlining the key factors of the broaching taking into account the research of D.M. Ananyev. It has been demonstrated that a series of computational procedures of vulnerability assessment algorithm does not correspond to essence of the problem formulation and may be excluded. In addition, the Froude number range, at which capturing of the vessel by the following wave realizes, has been specified. The condition of surf-riding on the following wave has been corrected based on the assumption that value frequency of propeller rotation is known. The formulae for calculation of Froude — Krylov forces in the criterion has also been proposed. The correctness of the changes made has been verified by calculating of the vulnerability criterion for six different vessels.

Keywords: surf-riding, conditions of surf-riding, broaching, vulnerability criterion

ВВЕДЕНИЕ

Движение судна на попутном волнении и связанным с этим риском потери остойчивости в настоящее время является одним из наименее исследованных направлений динамики плавания, объединяющего научный потенциал теории остойчивости, качки и управляемости судов.

Первостепенное значение в указанной проблеме имеет оценка возможности захвата судна попутной волной, в результате которого и развивается брочинг, чреватый аварийными углами крена и полной потерей поперечной остойчивости. Условия захвата судна попутной волной достаточно хорошо изучены, в первую очередь, благодаря исследованиям Д.М. Ананьева [1 — 3].

Надо признать, что указанные исследования выполнены на базе усеченных математических моделей явления. Имитационное моделирование процессов пространственного движения ряда судов на попутном волнении [4, 5] показало, что, при общем соответствии картины существующим представлениям, выявляется ряд особенностей динамики такого плавания, не реализуемый посредством упрощенных математических моделей. К таковым особенностям можно отнести, например, отсутствие захвата судна крутой попутной волной и наличие захвата на пологой попутной волне. Этот факт связан, скорее всего, с дополнительным сопротивлением на волнении, которое, будучи зависимым от параметров продольной качки, увеличивается с ростом крутизны волны. Расчеты показывают, что суда, захваченные волной, вопреки распространенному мнению, зачастую располагаются не на вершине, не на подошве, а на переднем склоне волны. Это обстоятельство способно играть заметную роль в иницировании брочинга.

Таким образом, изучение динамики плавания на попутном волнении еще требует обширных исследований вычислительного характера с использованием нелинейных математических моделей пространственного движения. Вместе с тем, именно результаты Д.М. Ананьева, имеющие фундаментальный характер, могут служить основой нормирования мореходности судов при плавании на попутном волнении. В настоящее время они реализованы в нормативных требованиях по мореходности в части брочинга, сформулированных в предложениях ИМО по вероятностному нормированию остойчивости судов [4].

1. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДИФИКАЦИИ

По мнению авторов настоящей статьи, некоторые положения критерия риска, предлагаемого ИМО, требуют согласования с имеющимся опытом. Кроме того, алгоритм оценки вероятности брочинга содержит ряд вычислительных процедур, не вписывающихся в логику постановки задачи о захвате судна попутной волной. Очевидно, что указанные обстоятельства требуют некоторых комментариев.

Учитывая известную из теории качки [6] приближенную формулу для фазовой скорости волны

$$c \cong 1,25\sqrt{\lambda}$$

и тот факт, что наиболее опасному положению судна на гребне попутной волны отвечает условие

$$\lambda = L,$$

может быть записана формула для скорости захвата судна попутной волной:

$$v_{\text{зах}} = c = 1,25\sqrt{L} = 1,25/\sqrt{g} \sqrt{gL} = |g = 9,81| = 0,3991\sqrt{gL}.$$

Отсюда следует формальное число Фруда, соответствующее захвату:

$$Fr_{\text{зах}} = v_{\text{зах}}/\sqrt{gL} = 0,3991 \approx 0,4.$$

При известном диапазоне опасных попутных волн [7]

$$\lambda L = 0,8 \div 1,15$$

для любого судна получаем диапазон чисел Фруда, в котором реализуется захват, в виде

$$Fr_{\text{зах}} = 0,357 \div 0,428. \quad (1)$$

Условие (1) существенно повышает нижнюю границу возможности захвата по числу Фруда, предлагаемую в критерии ИМО 1-го уровня ($Fr_{\text{зах}} = 0,3$) и указывает на существование верхней границы.

В рамках обсуждения алгоритма критерия ИМО 2-го уровня отметим некоторые постановочные аспекты рассматриваемой задачи. При оценке возможности захвата судна попутной волной [1 — 3] предполагается, что судно движется с некоторой постоянной (эксплуатационной) скоростью u . Эта скорость обеспечивается главной механической установкой, поддерживающей необходимую постоянную частоту вращения двигателей n . Скорость хода, частота вращения двигателей и, соответственно, развиваемая ими тяга $T(u, n)$ привязываются к случаю движения на тихой воде. Важно то, что и эксплуатационная скорость, и тяга двигателей заранее известны. Очевидно, что известно и число Фруда Fn , характеризующее этот режим хода.

Если судно захватывается попутной волной, то неизбежно скорость его хода становится равной скорости бега волнового профиля, т.е. $u = c$.

В этом случае равновесие продольных сил, соответствующих условию захвата [2, 4], будет определяться равенством:

$$T(c_i, n) - R(c_i) \pm \rho g k_i H_{ij} / 2 \times \sqrt{Fc_i^2 + Fs_i^2} = 0, \quad (2)$$

где c_i — скорость движения рассматриваемой i -ой волны;

k_i — волновое число i -ой волны;

H_{ij} — высота i -ой волны;

g — ускорение свободного падения;

ρ — плотность воды;

F_{ci}, F_{si} — объемные компоненты силы Фруда — Крылова в волновой возмущающей силе продольной качки;

$R(c_i)$ — сопротивление на тихой воде при движении судна со скоростью c_i .

В равенстве (2), при известной зависимости сопротивления от скорости и заданных кривых действия двигателей, неизвестных величин нет. Действительно,

$$T(c, n) \neq T(u, n)$$

вследствие изменения скорости. Но изменение относительной поступи по изменению скорости от u до c при известных кривых действия двигателя легко определяется элементарным расчетом.

Нужно подчеркнуть, что условие (2) из физических соображений может либо выполняться, если это допускают имеющиеся значения скорости хода, тяги двигателей, сопротивления движению и волновой силы Фруда — Крылова — и тогда захват попутной волной возможен; либо не выполняться — и тогда захвата не может быть. Критерий ИМО предлагает нам рассматривать условие (2) как уравнение, которое следует удовлетворять поиском некоторой критической частоты вращения двигателей n_{cr} для всех возможных сочетаний параметров волнения в рамках некоторой итеративной вычислительной процедуры. На самом деле, по определению, действующая частота вращения постоянна и известна с самого начала.

В связи со сказанным, условие захвата попутной волной [1] может быть записано в следующем виде, выводимом из (2):

$$|T(c_i, n) - R(c_i)| \leq \rho g k_i H_{ij} / 2 \times \sqrt{Fc_i^2 + Fs_i^2}. \quad (3)$$

Условие (3) отличается от условия, предлагаемого критерием ИМО, являясь при этом более общим, т.к. допускает возможность захвата волной, движущейся или быстрее, или медленнее судна, что полностью отвечает имеющемуся опыту. Отметим, что по утверждению (3) условие (2) с достаточной степенью достоверности может быть заменено следующей формулой:

$$|u/c_i - 1| < 0,534 \sqrt{(g k_i H_{ij} A_i) / (2m)}, \quad (4)$$

где $A_i = \sqrt{Fc_i^2 + Fs_i^2}$;

m — масса судна в технической системе единиц (кг·с²/м).

Форма условия (4) существенно упрощает вычислительную сторону использования критерия риска, т.к. не требует привлечения информации по движительно-рулевому комплексу.

Таким образом, условие реализации захвата попутной волной $C2_{ij}$, предложенное ИМО, следует переписать в форме:

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если } |u/c_i - 1| < f_{ij}; \\ 0 & \text{если } |u/c_i - 1| \geq f_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

где $f_{ij} = 0,534 \sqrt{(g k_i H_{ij} A_i) / (2m)}$.

Нужно обратить внимание на предложения ИМО, связанные с вычислением силы Фруда — Крылова. Общие выражения для вычисления составляющих этой силы имеют вид [1, 3]

$$\begin{aligned} Fc_i &= 2 \int_{L_n - T_i}^{L_n} \left[\int_{-T_i}^0 y(z) e^{k_i z} dz \right] \cos k_i x \, dx; \\ Fs_i &= 2 \int_{L_n - T_i}^{L_n} \left[\int_{-T_i}^0 y(z) e^{k_i z} dz \right] \sin k_i x \, dx; \end{aligned} \quad (6)$$

Соответствующие выражения, рекомендуемые ИМО, записаны для случая вычисленного внутреннего интеграла. К сожалению, не совсем понятно, как взят этот внутренний интеграл. По этой причине в дальнейшем для определения силы Фруда — Крылова используются формулы (6).

2. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО КРИТЕРИЯ

Для окончательной формулировки критерия риска с предлагаемыми изменениями целесообразно выполнить его расчетное тестирование. С этой целью можно использовать технические данные и результаты расчетов движения на попутном волнении судов, использованных для предварительного имитационного моделирования [4].

Для дальнейшего приведем краткую характеристику указанных объектов.

1. Скеговой буксир со средним расположением скега (Буксир СС). Весовое водоизмещение — $D = 997,1$ т; длина по ватерлинии — $L = 28,3$ м; ширина по ватерлинии — $B = 12,8$ м; осадка (без скега) — $T = 3,48$ м; скорость хода — $u = 12$ уз. (6,18 м/с); число Фруда — $Fn = 0,371$. На крутой попутной волне наблюдается движение с продольно-горизонтальными колебаниями скорости. На пологих волнах, близких к длине судна может иметь место захват и бросинг с незначительным зарыскиванием по курсу и малыми углами крена.

2. Судно снабжения нефтепромыслов с ходом 14 уз. (ССН-14). Весовое водоизмещение — $D = 2939,2$ т; длина по ватерлинии — $L = 56,9$ м; ширина по ватерлинии — $B = 15,1$ м; осадка — $T = 4,7$ м; скорость хода — $u = 14$ уз. (7,21 м/с); число Фруда — $Fn = 0,305$. Некоторое подобие захвата имеет место на волне длиной 33,3 м. В остальных случаях наблюдается движение с продольно-горизонтальными колебаниями скорости и потерей устойчивости по курсу без значительных углов крена.

3. Судно снабжения нефтепромыслов с ходом 16 уз. (ССН-16). Весовое водоизмещение — $D = 2939,2$ т; длина по ватерлинии — $L = 56,9$ м; ширина по ватерлинии — $B = 15,1$ м; осадка — $T = 4,7$ м; скорость хода — $u = 16$ уз. (8,24 м/с); число Фруда — $Fn = 0,349$. Захват с последующим бросингом наблюдается на волне длиной 56,9 м. При этом судно разгоняется до скорости более 9,0 м/с. В остальных расчетных случаях наблюдается потеря устойчивости по курсу вне захвата волной при значительных углах крена.

4. Промысловое судно — 1 (ПС-1). Весовое водоизмещение — $D = 633,4$ т; длина по ватерлинии — $L = 48,7$ м; ширина по ватерлинии — $B = 10,2$ м; осадка — $T = 2,56$ м; скорость хода — $u = 17$ уз. (8,76 м/с); число Фруда — $Fn = 0,4$. На крутой волне реализуется движение с продольно-горизонтальными колебаниями. При этом наблюдается заметное падение скорости. Предполагается, что бросинг имеет место на пологих волнах.

5. Спасательное судно (СС). Весовое водоизмещение — $D = 871,0$ т; длина по ватерлинии — $L = 55,9$ м; ширина по ватерлинии — $B = 10,0$ м; осадка — $T = 3,17$ м; скорость хода — $u = 17$ уз. (8,76 м/с); число Фруда — $Fn = 0,374$. Неуправляемое движение судна на попутном волнении крутизной 1/20 при длине волны более 40 м чревато захватом волной и бросингом с опасными углами крена.

Кроме вышеуказанных в число тестовых судов были включены еще два.

6. Быстроходное судно (БС). Весовое водоизмещение — $D = 3058,0$ т; длина по ватерлинии — $L = 113$ м; ширина по ватерлинии — $B = 13,6$ м; осадка — $T = 4,85$ м; скорость хода — $u = 25,8$ уз. (13,3 м/с); число Фруда — $Fn = 0,399$. Судно захватывается попутными волнами, близкими к длине судна, и интенсивно входит в бросинг с аварийными углами крена.

7. Промысловое судно — 2 (ПС-2). Весовое водоизмещение — $D = 297,4$ т; длина по ватерлинии — $L = 39,6$ м; ширина по ватерлинии — $B = 7,8$ м; осадка — $T = 2,0$ м; скорость хода — $u = 15$ узлов (7,72 м/с); число Фруда — $Fn = 0,392$. Судно не подвержено захвату на крутых волнах, но легко захватывается пологими волнами с длиной, близкими к длине судна, с дальнейшим незначительным зарыскиванием по курсу и малыми углами крена.

Для всех перечисленных судов были получены оценки критерия риска потери остойчивости при движении на гребне волны 2-го уровня, т.к. по критерию ИМО 1-го уровня они подвержены риску потери остойчивости. Расчеты выполнялись с учетом всех предложенных модификаций исходного варианта критерия. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки критерия риска потери остойчивости при движении судна на гребне попутной волны

№	Судно	Длина по ВЛ, м	Число Фруда Fn	Критерий риска C
1	Буксир СС	28,3	0,371	0,0009
2	ССН-14	56,9	0,305	5,54
3	ССН-16	56,9	0,349	4,74
4	ПС-1	48,7	0,4	0,0117
5	СС	55,9	0,374	0,0085
6	БС	113,0	0,399	0,0012
7	ПС-2	39,6	0,392	0,018

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из табл. 1 видно, что для 2-го и 3-го судна критерий риска имеет совершенно недопустимое значение. Для остальных судов значения критерия лежат в приемлемом диапазоне. В отношении результатов для судна снабжения нефтепромыслов можно выдвинуть предположение о потере работоспособности рассматриваемого критерия вне области возможного захвата попутной волной. Основанием для такого предположения являются значения чисел Фруда, отвечающие режимам движения судна при оценке критерия риска.

Действительно, для ССН-14 $Fn = 0,305$, что, в соответствии с критерием ИМО 1-го уровня, практически, является нижним пороговым для реализации захвата. Для ССН-16 $Fn = 0,349$, что меньше нижнего порогового значения по условию (1). Заметим, что для остальных судов числа Фруда выше рубежа 0,357. Справедливость выдвинутого предположения целесообразно проверить путем расчета критерия риска для тестируемых объектов в широком диапазоне скоростей хода. Используемая форма критерия обеспечивает такую возможность. Отдельные характерные результаты соответствующих расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценки критерия риска потери остойчивости для тестируемых судов в широком диапазоне скоростей хода

№	Судно	Скорость u , м/с	Число Фруда Fn	Критерий риска C
1	Буксир СС	5,865	0,352	3,208
		6,00	0,36	6,98
		6,082	0,365	3,695
		6,18	0,371	0,0009
		6,33	0,380	0,033
		6,665	0,40	0,033
		7,00	0,42	0,033
		7,165	0,43	0,0002
		7,33	0,44	5,64
		7,50	0,45	2,48
2	ССН-14/16	7,21	0,305	5,54
		8,24	0,349	4,74
		8,316	0,352	8,54
		8,51	0,36	1,09
		8,74	0,37	0,00817
		9,45	0,40	0,00817
		9,92	0,42	0,00817
		10,16	0,43	0,00817
		10,40	0,44	1,09
		10,63	0,45	4,74

Табл. 2 — Окончание

№	Судно	Скорость u , м/с	Число Фруда Fn	Критерий риска C
3	ПС-1	7,69	0,352	1,93
		7,87	0,36	0,0063
		8,59	0,393	0,0117
		8,74	0,40	0,0117
		8,96	0,41	0,0117
		9,18	0,42	0,0117
		9,39	0,43	0,0117
		9,62	0,44	0,0007
		9,84	0,45	2,63
		10,05	0,46	8,01
4	СС	8,243	0,352	8,57
		8,43	0,36	0,0085
		8,50	0,363	0,0085
		8,89	0,38	0,0085
		9,367	0,40	0,0085
		9,84	0,42	0,0085
		10,07	0,43	0,0085
		10,30	0,44	0,0044
		10,54	0,45	1,23
		10,77	0,46	5,49

Как видно из табл. 2, предположение о потере работоспособности критерия риска вне области возможного захвата попутной волной вполне подтверждается. Границы захвата по числу Фруда для рассмотренных судов отмечены на графике (см. рис. 1). Номера судов на графике соответствуют номерам в табл. 1 — 2.

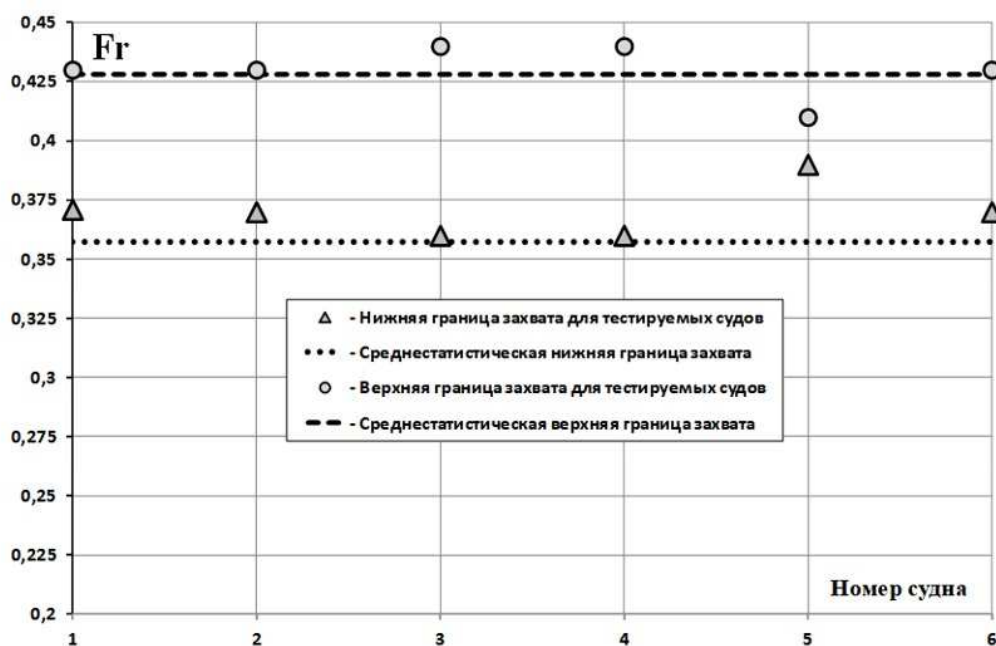


Рис. 1 Границы реализации захвата попутной волной для тестируемых судов в сопоставлении со среднестатистическими

Можно констатировать, что результаты представленных расчетов практически совпадают с условием (1). Это, в известной мере, указывает на корректность рассматриваемого подхода к оценке критерия риска. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что критерий указывает только на возможный факт захвата попутной волной, никак не отражая опасность последующего бродинга.

Тем не менее, на основании вышеизложенного можно предложить модифицированную форму критерия риска, опирающуюся на исходную разработку ИМО.

4. МОДИФИЦИРОВАННАЯ ФОРМА КРИТЕРИЯ РИСКА

4.1 Оценка риска потери остойчивости судном при движении на гребне волны (брочинге)

4.1.1 Область распространения

4.1.1.1 При каждом варианте загрузки судно, остойчивость которого:

- отвечает требованию, указанному в 4.1.2, считается не подверженным потере остойчивости при движении на вершине волны (брочинге);

- не отвечает требованию, указанному в 4.1.2, должно либо:

- эксплуатироваться в соответствии со специальными эксплуатационными указаниями, направленными на избежание опасных ситуаций движения на гребне волны (брочингу), рекомендованными в разделе 4.2.1 циркуляра ИМО MSC.1/Circ.1228;

должно быть проверено в соответствии с 4.1.3.

4.1.1.2 При каждом варианте загрузки судна, которое не отвечает требованиям 4.1.2 и 4.1.3, требует введения эксплуатационных ограничений, полученных из расчетов в соответствии с 4.1.3.

4.1.1.3 Более детальная оценка риска потери остойчивости от брочинга по критерию 2 уровня в 4.1.3 может быть выполнена сразу без проверки по критерию 1 уровня в 4.1.2.

4.1.2 Критерий риска потери остойчивости при движении на вершине волны (брочинге) 1 уровня

4.1.2.1 Судно считается не подверженным потере остойчивости от движения на вершине волны (брочингу), если выполняется одно из следующих условий:

$$L_1 \geq 200 \text{ м; либо } 0,36 \geq Fn \geq 0,44, \quad (7)$$

где $Fn = u/\sqrt{L_1 g}$ — число Фруда;

u — эксплуатационная скорость на тихой воде, м/с;

L_1 — длина, как определено в Правилах о грузовой марке морских судов;

g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

4.1.3 Критерий риска потери остойчивости при движении на вершине волны (брочинге) 2 уровня

4.1.3.1 Судно считается не подверженным потере остойчивости при движении на вершине волны (брочинге), если значение C , рассчитанное в соответствии с 4.1.3.2, не больше R_{SR} ,

$$\text{где } C = \sum_{H_s} \sum_{T_z} [W2(H_s, T_z) \sum_{i=0}^{N_\lambda} \sum_{j=0}^{N_a} w_{ij} C2_{ij}], \quad (8)$$

$$R_{SR} = 0,005;$$

$W2(H_s, T_z)$ — весовой коэффициент кратковременного волнения моря, заданный в 4.1.3.2 как функция значительной высоты волны H_s и периода волны между нулевыми точками T_z в которой $W2(H_s, T_z)$ равно числу появлений каждого случая волнений, разделенному на общее число случаев;

w_{ij} — статистический весовой коэффициент волны, определяемый в 4.1.3.3 с крутизной $(H/\lambda)_j$ и отношением длины волны к длине судна $(\lambda/L)_i$, рассчитанный по совместному распределению значений крутизны и длины мгновенных волн, т.е. с заданной дискретизацией $N_\lambda = 80$ и $N_a = 100$;

$C2_{ij}$ — значение, рассчитываемое в соответствии с 4.1.3.4.

4.1.3.2 Значение $W2(H_s, T_z)$ определяется делением значения, взятого из табл. 3, на 100000. Оно равно 272 в случае кратковременного волнения моря. По согласованию с Регистром могут быть использованы другие источники статистических данных о волнении.

4.1.3.3 Значение w_{ij} можно рассчитать по следующей формуле:

$$w_{ij} = \frac{4\sqrt{g}L_1^{5/2}T_{01}}{\pi v H_s^3} s_j^2 r_i^{3/2} \frac{\sqrt{1+v^2}}{1+\sqrt{1+v^2}} \Delta r \Delta s \exp\left[-2(L_1 r_i s_j / H_s)^2 \left\{1 + \frac{1}{v^2} \left(1 - \sqrt{(gT_{01}^2)/(2\pi r_i L_1)}\right)^2\right\}\right], \quad (9)$$

где $v = 0,425$;

L_1 — длина, как определено в Правилах о грузовой марке морских судов;

$T_{01} = 1,086 T_z$;

$s_j = (H/\lambda)_j$ — крутизна волны. Изменяется от 0,03 до 0,15 с приращением $\Delta s = 0,0012$;

$r_i = (\lambda/L)_i$ — отношение длины волны к длине судна. Изменяется от 1,0 до 3,0 с приращением $\Delta r = 0,025$.

Таблица 3

Частота возникновения случаев волнения на 100 000 наблюдений для оценки реакции судна на параметрическую бортовую качку

T_z, c ►	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5
$H_s, м$ ▼																
0,5	1,3	133,7	865,6	1186,0	634,2	186,3	36,9	5,6	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	0,0	29,3	986,0	4976,0	7738,0	5569,7	2375,7	703,5	160,7	30,5	5,1	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0
2,5	0,0	2,2	197,5	2158,8	6230,0	7449,5	4860,4	2066,0	644,5	160,2	33,7	6,3	1,1	0,2	0,0	0,0
3,5	0,0	0,2	34,9	695,5	3226,5	5675,0	5099,1	2838,0	1114,1	337,7	84,3	18,2	3,5	0,6	0,1	0,0
4,5	0,0	0,0	6,0	196,1	1354,3	3288,5	3857,5	2685,5	1275,2	455,1	130,9	31,9	6,9	1,3	0,2	0,0
5,5	0,0	0,0	1,0	51,0	498,4	1602,9	2372,7	2008,3	1126,0	463,6	150,9	41,0	9,7	2,1	0,4	0,1
6,5	0,0	0,0	0,2	12,6	167,0	690,3	1257,9	1268,6	825,9	386,8	140,8	42,2	10,9	2,5	0,5	0,1
7,5	0,0	0,0	0,0	3,0	52,1	270,1	594,4	703,2	524,9	276,7	111,7	36,7	10,2	2,5	0,6	0,1
8,5	0,0	0,0	0,0	0,7	15,4	97,9	255,9	350,6	296,9	174,6	77,6	27,7	8,4	2,2	0,5	0,1
9,5	0,0	0,0	0,0	0,2	4,3	33,2	101,9	159,9	152,2	99,2	48,3	18,7	6,1	1,7	0,4	0,1
10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	10,7	37,9	67,5	71,7	51,5	27,3	11,4	4,0	1,2	0,3	0,1
11,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	3,3	13,3	26,6	31,4	24,7	14,2	6,4	2,4	0,7	0,2	0,1
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	4,4	9,9	12,8	11,0	6,8	3,3	1,3	0,4	0,1	0,0
13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,4	3,5	5,0	4,6	3,1	1,6	0,7	0,2	0,1	0,0
14,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	1,2	1,8	1,8	1,3	0,7	0,3	0,1	0,0	0,0
15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,6	0,7	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0
16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

4.1.3.4 Для каждого случая волнения значение $C2_{ij}$ рассчитывается следующим образом:

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если } |u/c_i - 1| < f_{ij}; \\ 0 & \text{если } |u/c_i - 1| \geq f_{ij}, \end{cases} \quad (10)$$

где u — эксплуатационная скорость на тихой воде, м/с; $c_i = \sqrt{g/k_i}$ — скорость движения волны, м/с; $k_i = 2\pi/r_i L$ — волновое число, m^{-1} ; g — ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; f_{ij} — эмпирическое ограничение на разность между относительной скоростью хода и скоростью движения волны.

4.1.3.4.1 Эмпирическое ограничение на разность между относительной скоростью хода и скоростью движения волны рассчитывается по формуле:

$$f_{ij} = 0,534 \sqrt{(gk_i H_{ij} A_i) / (2M)}, \quad (11)$$

где $H_{ij} = s \cdot r_i L$ — высота волны, м; $k_i = 2\pi/(r_i L)$ — волновое число, m^{-1} ; g — ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; M — масса судна в технической системе единиц ($\text{кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}$); A_i — амплитуда объемной составляющей волновой возмущающей силы Фруда — Крылова, m^3 .

4.1.3.4.2 Амплитуда объемной составляющей волновой возмущающей силы Фруда — Крылова рассчитывается по формуле

$$A_i = \sqrt{Fc_i^2 + Fs_i^2}, \quad (12)$$

$$\text{где } Fc_i = \sum_{m=N+1}^1 \{Q_m \cos[k_i(x_m - x_G)] + Q_{m-1} \cos[k_i(x_{m-1} - x_G)]\} (x_m - x_{m-1}); \quad (13)$$

$$Fs_i = \sum_{m=N+1}^1 \{Q_m \sin[k_i(x_m - x_G)] + Q_{m-1} \sin[k_i(x_{m-1} - x_G)]\} (x_m - x_{m-1});$$

$$Q_m = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{S(m)-1} \{y_m(z_{n+1}) \exp[k_i(z_{n+1} - T_m)] + y_m(z_n) \exp[k_i(z_n - T_m)]\} (z_{n+1} - z_n); \quad (14)$$

 Fc_i, Fs_i — объемные компоненты силы Фруда — Крылова в волновой возмущающей силе продольной качки, m^3 ; $k_i = 2\pi/(r_i L)$ — волновое число, m^{-1} ; x_G — абсцисса центра тяжести судна, м; x_m — абсцисса рассматриваемого теоретического шпангоута, м; N — количество принятых к расчету теоретических шпангоутов; $S(m)$ — количество расчетных ватерлиний на m -ом теоретическом шпангоуте; T_m — осадка корпуса на m -ом теоретическом шпангоуте, м; z_m — аппликата n -ой ватерлинии на m -ом теоретическом шпангоуте.

В рамках предлагаемого критерия риска нужно помнить, что результат

$$C \geq 1$$

(15)

указывает на выход из диапазона чисел Фруда, соответствующих захвату данного судна попутной волной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев Д.М. О «захватывании» судна попутной волной. Сб. НТО СП, вып. 73. Л., 1966. с. 169 — 175.
2. Ананьев Д.М. Устойчивость продольного поступательного движения судна на попутном волнении. Сб. НТО СП, вып. 165. Л., 1971. с. 20 — 28.
3. Ананьев Д.М., Лосева Л.Л. Математическое моделирование движения судна на попутном волнении. Тр. НТО им. акад. А.Н. Крылова. Докл. на Всесоюзной НТК 18 — 20 сентября 1990 г. Л., 1991. с. 180 — 191.
4. Разработка нормативных требований по мореходности судов различных типов в части параметрического резонанса и бродинга с учетом нелинейных эффектов при качке корабля в экстремальных условиях плавания. Технический отчет по 1-му этапу темы X 042, СПб, СПбГМТУ, 2021.
5. Кузнецов А.А., Потехин Ю.П. Характерные результаты расчетного исследования явления захвата судна попутной волной. Тезисы доклада на XLIII Крыловских чтениях, СПб, 2009.
6. Справочник по теории корабля: В 3-х томах. Т. 2. Статика судов, Качка судов / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
7. Нечаев Ю.И. Требования к устойчивости судов на попутном волнении. Труды ЛКИ, вып. 96, Л., 1975, с. 71 — 74.

REFERENCES

1. Ananiev D.M. O "zakhvativaniy" sudna poputnoy volnoy [Capturing of the vessel by the following wave]. Sb. NTO SP, Issue 73, L., 1966, pp. 169 — 175.
2. Ananiev D.M. Ustoichivost prodolnogo postupatel'nogo dvizheniya sudna na poputnom volnenii [Sustainability of the longitudinal movement of the vessel on the following waves]. Sb. NTO SP, Issue 165, L., 1971, pp. 20 — 28.
3. Ananiev D.M., Loseva L.L. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya sudna na poputnom volnenii [Mathematical modelling of ship motions on the following waves]. Proceedings of the NTO named after Academician A.N. Krylov. Report to all-Union NTK 18-20 of September 1990, L., 1991, pp. 180 — 191.
4. Razrabotka normativnykh trebovaniy po morehodnosti sudov razlichnykh tipov v chasti parametricheskogo rezonansa i broachinga s uchetom nelineynykh effektiv pri kachke korablya v ekstremalnikh usloviyakh plavaniya [Development of regulatory requirements to seaworthiness of ships of different types in part of parametric resonance and broaching taking into account of non-linear effects when rolling in the extreme conditions]. Technical report on 1-st stage of theme X-042, SPb, SPbGMTU, 2021.
5. Kuznetsov A.A., Potekhin Yu.P. Kharakternye rezultaty raschetnogo issledovaniya yavleniya zahvata sudna poputnoy volnoy [Representative results of the computational research of capturing of the vessel by the following wave]. Theses of the report at XLIII Krylov conference. SPb., 2009.
6. Spravochnik po teorii korablya [Ship Theory Handbook]: in 3 Vols. Vol. 2. Ship Statics, Ship Motions / ed. Y.I. Voitskunsky. L.: Shipbuilding, 1985. 440 p.
7. Nechaev Y.I. Trebovaniya k ustoichivosti sudov na poputnom volnenii [Requirements for stability of ships at the following waves]. Proceedings of LKI, Issue 96. L., 1975, pp. 71 — 74.

УДК 629.12.073.243.4

ВЛИЯНИЕ КУРСОВОГО УГЛА И СКОРОСТИ НА АМПЛИТУДЫ ВТОРЫХ ГАРМОНИК НЕЛИНЕЙНОЙ КАЧКИ СУДНА

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: sem_viktoria@mail.ru
Д.А. Альбаев, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

В статье рассматривается определение нелинейных сил второго порядка и соответствующих амплитуд качки на основании трехмерной потенциальной теории. Для их определения используются методы интегральных уравнений и метод малого параметра. Проводится апробация расчетов амплитуд вторых гармоник по разработанным программам в сравнении с различными программами, основанными на использовании двухмерных методов. Проводится исследование влияния на амплитуды вторых гармоник изменения курсового угла и скорости хода. Расчеты амплитуд приводятся для различных судов. Показано значительное влияние нелинейных сил на амплитуды вертикальной и бортовой качки в зонах супергармонических резонансных режимов при расположении судна лагом и необходимость его учета. Показано определение суммарных амплитудно-частотных характеристик, выполненных с учетом амплитуд вторых гармоник.

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

EFFECT OF HEADING ANGLE AND VELOCITY ON THE SECOND HARMONICS OF THE NONLINEAR SHIP MOTIONS AMPLITUDES

V.Yu. Semenova, DSc, professor, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: sem_viktoria@mail.ru
D.A. Albaev, SMTU, St. Petersburg, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

The article discusses the definition of second-order nonlinear forces and the corresponding motions amplitudes based on three-dimensional potential theory. To determine them, the methods of integral equations and the method of a small parameter have been used. Aprrobation of the second harmonics amplitude calculations by the developed programs has been carried out in comparison with various programs based on the use of two-dimensional methods. Amplitudes of the second harmonics of the change in heading angle and speed have also been studied. Amplitude calculations have been given for various ships. Significant influence of non-linear forces on the amplitudes of heaving and rolling in the zones of superharmonic resonant modes when the ship is positioned in beam waves and the need to take it into account have been shown, as well as the determination of the total amplitude-frequency characteristics performed taking into account the amplitudes of the second harmonics.

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

ВВЕДЕНИЕ

Конечной целью расчетов нелинейной качки является определение соответствующих амплитуд, вызываемых действием нелинейных сил. В работах Параниколао [10], Lee [9] были определены амплитуды вторых гармоник качки простейших объектов (вертикального цилиндра, понтона) на основании трехмерной потенциальной теории. Однако исследование влияния курсового угла и скорости на данные амплитуды отсутствует. В работах авторов [3] — [8] были определены различные категории нелинейных сил на основании применения трехмерной потенциальной теории и метода малого параметра. В настоящей работе проводится исследование влияния изменения курсового угла и скорости хода на амплитуды вторых гармоник различных видов качки.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Решение задачи основано на применении методов малого параметра и интегральных уравнений. Согласно методу малого параметра [1] потенциал второго порядка можно представить в виде:

$$\Phi^{(2)}(x, y, z, t) = \left(\sum_{i=1}^6 \varepsilon_i^2 \Phi_{ii}^{(2)}(x, y, z) \right) e^{-j2\omega t} + \left(\sum_{i=1, k=1}^6 \varepsilon_i \varepsilon_k \Phi_{ik}^{(2)}(x, y, z) \right) e^{-j2\omega t} + \left(\sum_{i=1}^6 \varepsilon_7 \varepsilon_i \Phi_{i7}^{(2)}(x, y, z) \right) e^{-j2\omega t} + \left(\varepsilon_7^2 \Phi_{77}^{(2)}(x, y, z) \right) e^{-j2\omega t}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1 = \xi_{zg}/(B/2)$; $\varepsilon_2 = \eta g/(B/2)$; $\varepsilon_3 = \zeta_{zg}/(B/2)$; $\varepsilon_4 = \theta/1 \text{ rad}$; $\varepsilon_5 = \psi/1 \text{ rad}$; $\varepsilon_6 = \chi/1 \text{ rad}$; $\varepsilon_7 = \zeta W/(B/2)$.

Таким образом, все действующие на судно нелинейные силы можно разделить на четыре категории нелинейных сил: (1) обусловленные изолированными видами колебаний; (2) обусловленные взаимодействием различных видов колебаний; (3) обусловленные взаимодействием волнения и отдельных видов колебаний; (4) нелинейные дифракционные силы.

Все составляющие потенциала второго порядка должны удовлетворять граничным условиям на свободной и смоченной поверхности, на бесконечности и на дне.

Общее г.у. на смоченной поверхности имеет вид

$$\partial \Phi^{(2)} / \partial n = Q_B = -n(\bar{X}^{(1)}, \nabla) \nabla \Phi^{(1)} + (V^{(1)} - \nabla \Phi^{(1)}) N^{(1)} + V^{(2)} n + \partial H / \partial t \times r, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{X}^{(1)} &= \begin{Bmatrix} \xi_g^{(1)} + (\psi^{(1)} z - \chi^{(1)} y) \\ \eta_g^{(1)} - (\theta^{(1)} z - \chi^{(1)} x) \\ \zeta_g^{(1)} + (\theta^{(1)} y - \psi^{(1)} x) \end{Bmatrix}; \\ V^{(1)} &= \begin{Bmatrix} \dot{\xi}_g^{(1)} + (\dot{\psi}^{(1)} z - \dot{\chi}^{(1)} y) \\ \dot{\eta}_g^{(1)} - (\dot{\theta}^{(1)} z - \dot{\chi}^{(1)} x) \\ \dot{\zeta}_g^{(1)} + (\dot{\theta}^{(1)} y - \dot{\psi}^{(1)} x) \end{Bmatrix}; \\ N^{(1)} &= \begin{Bmatrix} (\psi^{(1)} \cos(n, z) - \chi^{(1)} \cos(n, y)) \\ -\theta^{(1)} \cos(n, z) + \chi^{(1)} \cos(n, x) \\ \theta^{(1)} \cos(n, y) - \psi^{(1)} \cos(n, x) \end{Bmatrix}; \\ V^{(2)} &= \begin{Bmatrix} \dot{\xi}_g^{(2)} + (\dot{\psi}^{(2)} z - \dot{\chi}^{(2)} y) \\ \dot{\eta}_g^{(2)} - (\dot{\theta}^{(2)} z - \dot{\chi}^{(2)} x) \\ \dot{\zeta}_g^{(2)} + (\dot{\theta}^{(2)} y - \dot{\psi}^{(2)} x) \end{Bmatrix}; \\ H &= -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \psi^2 + \chi^2 & 0 & 0 \\ -2\theta\psi & \theta^2 + \chi^2 & 0 \\ -2\theta\chi & -2\psi\chi & \theta^2 + \psi^2 \end{pmatrix}; \\ r &= (x, y, z). \end{aligned} \quad (3)$$

Граничное условие на свободной поверхности

$$\partial \Phi^{(2)} / \partial \zeta - 4\omega^2 / g \Phi^{(2)} = Q_F = -\frac{j\omega}{g} (\nabla \Phi^{(1)})^2 + \frac{j\omega}{2g} \Phi^{(1)} (\partial^2 \Phi^{(1)} / \partial \zeta^2 - \omega^2 / g (\partial \Phi^{(1)} / \partial \zeta)) \quad (4)$$

Граничное условие на дне

$$\partial \Phi^{(2)} / \partial \zeta = 0 \quad (\text{при } \zeta \rightarrow -\infty \text{ или } \zeta = -H). \quad (5)$$

Граничное условие на бесконечности

$$\lim_{kr \rightarrow \infty} \sqrt{kr} (\partial / \partial r - jk) (\Phi^{(2)} - \Phi_0^{(2)}) = 0. \quad (6)$$

Подробный разбор граничных условий (3) и (4) приведен в работах [3] — [8].

Потенциалы второго порядка определяются из следующей системы уравнений

$$-\frac{1}{2}\Phi^{(2)}(x, y, z) + \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \Phi^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} Q_B G^{(2)} d\Omega + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_F} Q_F G^{(2)} dS_F. \quad (7)$$

Здесь Ω — смоченная поверхность, S_F — свободная поверхность.

Если задача решается для бесконечно-глубокой жидкости, функция Грина $G^{(2)}$ определяется следующей формулой:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 8v \int_0^{\infty} \frac{e^{k(z+\zeta)}}{k-4v} J_0(kR) dk + j8\pi v e^{4v(z+\zeta)} J_0(4vR). \quad (8)$$

Для жидкости ограниченной глубины:

$$G^{(2)}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 8v \int_0^{\infty} \frac{2(k+4v)e^{-kh} \cosh k(z+h)}{k \sinh kh - 4v \cosh kh} \cosh k(\zeta+h) J_0(kR) dk + \\ + j2\pi \frac{2((\mu_{04})^2 - (4v)^2) \cosh \mu_{04}(z+h)}{((\mu_{04})^2 - (4v)^2)h + 4v} \cosh \mu_{04}(\zeta+h) J_0(\mu_{04}R). \quad (9)$$

Здесь $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$; $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}$; $R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$; $v = \omega^2/g$ — волновое число; μ_{04} — положительный корень трансцендентного уравнения, имеющего вид: $\mu_{04} \tanh(\mu_{04}H) = 4v$; J_0 — функция Бесселя.

Система (7) решается численно, при этом корпус судна и свободная поверхность разбивается на конечное число панелей, что позволяет свести задачу к решению СЛАУ.

Определенные на основании вышеизложенного метода потенциалы позволяют перейти к определению коэффициентов присоединенных масс и демпфирования второго порядка [3]:

$$\lambda_{ki}^{(2)} = \rho \iint_{\Omega} \left(-Re \Phi_{ii_2}^{(2)} - \frac{U}{\omega_k} \frac{\partial}{\partial \xi} Im \Phi_{ii_2}^{(2)} \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial n} d\Omega; \\ \mu_{kj}^{(2)} = \rho \iint_{\Omega} \left(-\omega_k Im \Phi_{ii_2}^{(2)} - U \frac{\partial}{\partial \xi} Re \Phi_{ii_2}^{(2)} \right) \frac{\partial \Phi_k}{\partial n} d\Omega. \quad (10)$$

И к определению нелинейных сил и моментов второго порядка, общие выражения для которых имеют вид:

$$F^{(2)} = \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} \vec{n} d\Omega + \iint_{\Omega} \left[(\xi_g + (\psi z - \chi y)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \xi} + (\eta_g - (\theta z - \chi x)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + (\zeta_g + (\theta y - \psi x)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} \right] \vec{n} d\Omega + \\ + \frac{\rho}{2} \iint_{\Omega} \left(\left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \right)^2 \right) \vec{n} d\Omega + \rho \iint_{\Omega} (g(\zeta_g - x\psi + y\theta) + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t}) (\vec{\alpha} \times \vec{n}) d\Omega - \frac{1}{2} \int_{WL} z_W^2 \vec{n} dl. \quad (11)$$

$$M^{(2)} = \rho \iint_{\Omega} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} (\vec{r} \times \vec{n}) d\Omega + \iint_{\Omega} \left[(\xi_g + (\psi z - \chi y)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \xi} + (\eta_g - (\theta z - \chi x)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + (\zeta_g + (\theta y - \psi x)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} \right] (\vec{r} \times \vec{n}) d\Omega + \\ + \frac{\rho}{2} \iint_{\Omega} \left(\left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \right)^2 \right) (\vec{r} \times \vec{n}) d\Omega + \rho \iint_{\Omega} (g(\zeta_g - x\psi + y\theta) + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t}) (\vec{\alpha} \times (\vec{r} \times \vec{n})) d\Omega - \frac{1}{2} \int_{WL} z_W^2 (\vec{\alpha} \times (\vec{r} \times \vec{n})) dl. \quad (12)$$

Здесь

$$z_W = \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \Big|_{\zeta=0} - \zeta_g + x_{WL} \psi - y_{WL} \theta. \quad (13)$$

Система дифференциальных уравнений нелинейной качки с учетом найденных сил второго порядка имеет вид:

$$\begin{cases} (M + \lambda_{11}^{(2)}) \ddot{\xi}_g^{(2)} + \lambda_{13}^{(2)} \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{15}^{(2)} \ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{11}^{(2)} \dot{\xi}_g^{(2)} + \mu_{13}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{15}^{(2)} \dot{\psi}^{(2)} = F_X^{(2)} e^{-2j\omega_k t}; \\ (M + \lambda_{22}^{(2)}) \ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{24}^{(2)} \ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{26}^{(2)} \ddot{\chi}^{(2)} + \mu_{22}^{(2)} \dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{24}^{(2)} \dot{\theta}^{(2)} + \mu_{26}^{(2)} \dot{\chi}^{(2)} = F_Y^{(2)} e^{-2j\omega_k t}; \\ (M + \lambda_{33}^{(2)}) \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{31}^{(2)} \ddot{\xi}_g^{(2)} + \lambda_{35}^{(2)} \ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{33}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{31}^{(2)} \dot{\xi}_g^{(2)} + \mu_{35}^{(2)} \dot{\psi}^{(2)} + \rho g S \zeta_g^{(2)} - \rho g S X \psi^{(2)} = F_Z^{(2)} e^{-2j\omega_k t}; \\ (J_{xx} + \lambda_{44}^{(2)}) \ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{42}^{(2)} \ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{46}^{(2)} \ddot{\chi}^{(2)} + \mu_{44}^{(2)} \dot{\theta}^{(2)} + \mu_{42}^{(2)} \dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{46}^{(2)} \dot{\chi}^{(2)} + D h_0 \theta^{(2)} = M_X^{(2)} e^{-2j\omega_k t}; \\ (J_{yy} + \lambda_{55}^{(2)}) \ddot{\psi}^{(2)} + \lambda_{51}^{(2)} \ddot{\xi}_g^{(2)} + \lambda_{53}^{(2)} \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{55}^{(2)} \dot{\psi}^{(2)} + \mu_{51}^{(2)} \dot{\xi}_g^{(2)} + \mu_{53}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + D H_0 \psi^{(2)} - \rho g S X \zeta_g^{(2)} = M_Y^{(2)} e^{-2j\omega_k t}; \\ (J_{zz} + \lambda_{66}^{(2)}) \ddot{\chi}^{(2)} + \lambda_{62}^{(2)} \ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{64}^{(2)} \ddot{\theta}^{(2)} + \mu_{66}^{(2)} \dot{\chi}^{(2)} + \mu_{62}^{(2)} \dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{64}^{(2)} \dot{\theta}^{(2)} = M_Z^{(2)} e^{-2j\omega_k t}. \end{cases} \quad (14)$$

Решение системы (14) ищется в виде, аналогичном системе первого порядка, хорошо известной в линейной качке

$$\begin{aligned} \xi_g^{(2)} &= \xi_{g0}^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\xi^{(2)}); \quad \eta_g^{(2)} = \eta_{g0}^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\eta^{(2)}); \quad \zeta_g^{(2)} = \zeta_{g0}^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\zeta^{(2)}); \\ \theta^{(2)} &= \theta_0^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\theta^{(2)}); \quad \psi^{(2)} = \psi_0^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\psi^{(2)}); \quad \chi^{(2)} = \chi_0^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\chi^{(2)}). \end{aligned} \quad (15)$$

Выражения (15) представляют собой законы изменения амплитуд вторых гармоник всех шести видов колебаний на регулярном волнении как в бесконечно-глубокой жидкости, так и в жидкости ограниченной глубины.

Суммарные амплитудно-частотные характеристики отдельных видов качки на основании теории нелинейных колебаний определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \xi_g^*/a_W &= \xi_g^{(1)}/a_W + \varepsilon_2 \xi_g^{(2)}/a_W; \quad \eta_g^*/a_W = \eta_g^{(1)}/a_W + \varepsilon_2 \eta_g^{(2)}/a_W; \quad \zeta_g^*/a_W = \zeta_g^{(1)}/a_W + \varepsilon_3 \zeta_g^{(2)}/a_W; \\ \theta^*/a_0 &= \theta^{(1)}/a_0 + \varepsilon_4 \theta^{(2)}/a_0; \quad \psi^*/a_0 = \psi^{(1)}/a_0 + \varepsilon_5 \psi^{(2)}/a_0; \quad \chi^*/a_0 = \chi^{(1)}/a_0 + \varepsilon_6 \chi^{(2)}/a_0. \end{aligned} \quad (16)$$

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основании изложенного метода были разработаны две программы расчета нелинейных сил второго порядка и соответствующих амплитуд качки. Первая программа решает задачу для случая бесконечно глубокой жидкости, вторая — для жидкости ограниченной глубины. В целях апробации результаты расчетов амплитуд поперечной качки по разработанным программам были сопоставлены с расчетами по двумерной теории для различных типов судов. Основные характеристики судов приведены в таблице.

Таблица

Основные характеристики судов					
Тип/Название судна	L	B	T	δ	α
Лихтеровоз «Алексей Косыгин»	232	32	10,6	0,57	0,82
Балкер «Капитан Панфилов»	134	20,6	9,4	0,78	0,88
Сухогруз «Новгород»	138	20,6	9	0,68	0,79
Танкер «Баскунчак»	74	12	4,65	0,71	0,8

Для сравнения были использованы три программы, реализующие решение задачи на основании двумерной теории: программа, использующая метод интегральных уравнений для случая бесконечно глубокой жидкости, программа, использующая метод интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины (при значении глубины, стремящейся к бесконечности) и программа, основанная на использовании комбинированного метода [2].

На рис. 1 — 6 приведены сопоставления расчетов амплитуд вторых гармоник поперечно-горизонтальной, бортовой и вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» и сухогруза «Новгород» при расположении их лагом к волне. Амплитуды приведены в следующем виде: $(\eta_g^{(2)}B)/(2a_w^2)$, $(\zeta_g^{(2)}B)/(2a_w^2)$, $(\theta^{(2)}B^2)/(4a_w^2)$, где a_w — амплитуда волны. Из приведенных результатов видно хорошее согласование расчетов, проведенных по пяти программам. Для амплитудно-частотных характеристик бортовой и вертикальной качки характерно наличие супергармонических резонансов, имеющих место, когда частота набегавшего волнения равна половине собственной частоты (см. рис. 3 — 6). Расчеты, полученные по разработанным трехмерным программам, полностью совпадают между собой на всем диапазоне расчетных частот.

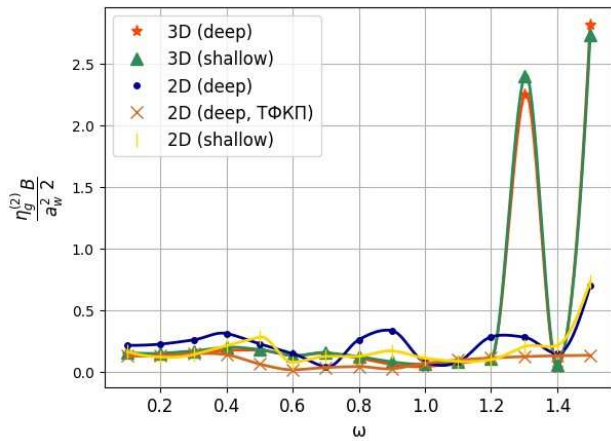


Рис. 1 АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для сухогруза «Капитан Панфилов». Сравнение методов

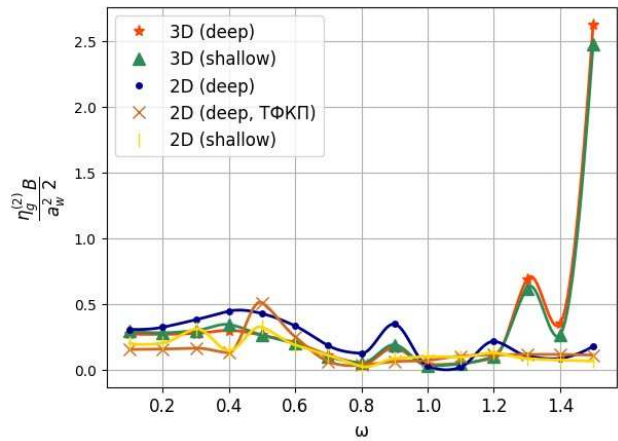


Рис. 2 АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород». Сравнение методов

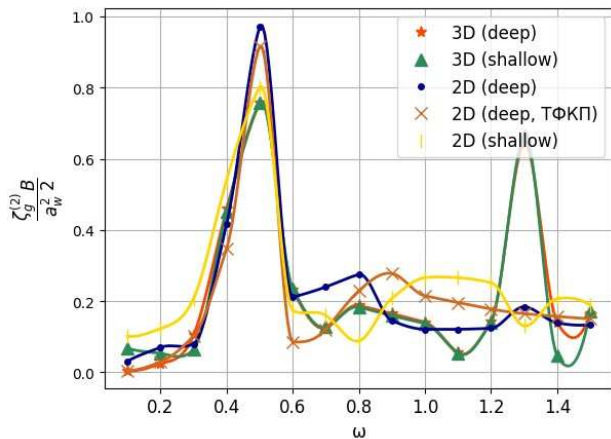


Рис. 3 АЧХ вертикальной качки второго порядка для сухогруза «Капитан Панфилов». Сравнение методов

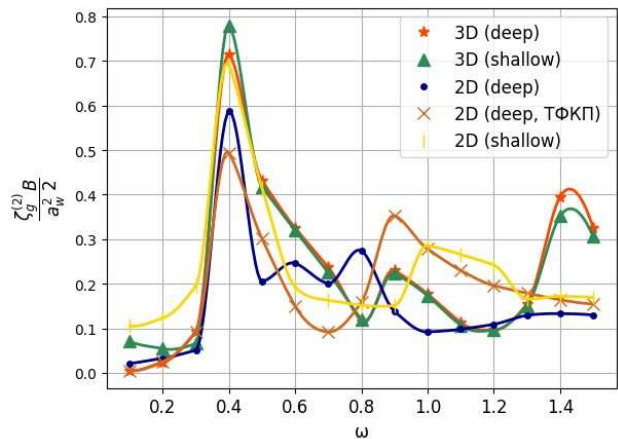


Рис. 4 АЧХ вертикальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород». Сравнение методов

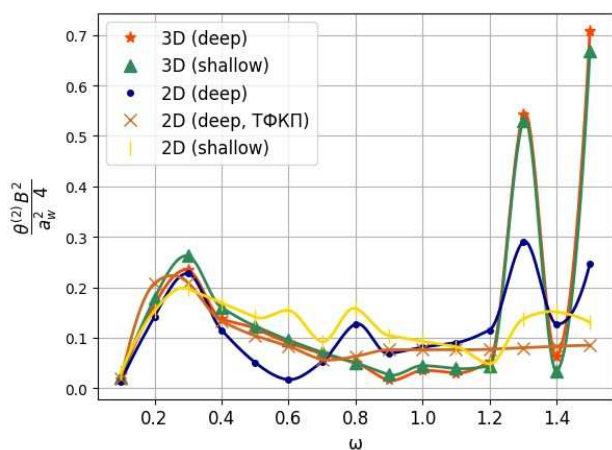


Рис. 5 АЧХ бортовой качки второго порядка для сухогруза «Капитан Панфилов». Сравнение методов

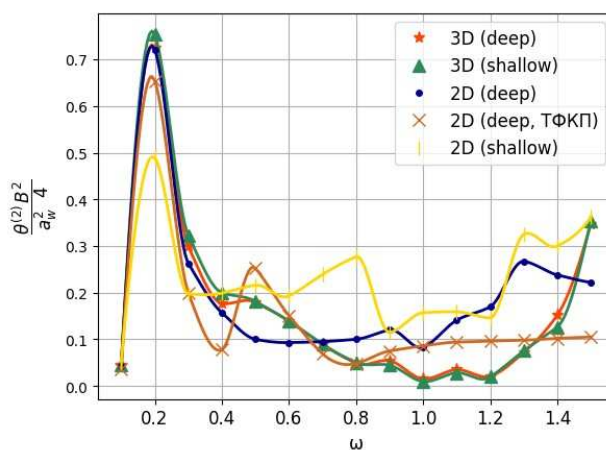


Рис. 6 АЧХ бортовой качки второго порядка для сухогруза «Новгород». Сравнение методов

Использование трехмерных методов позволяет провести расчеты качки на любых курсовых углах без введения поправочных коэффициентов, характерных для двумерной теории. С целью исследования влияния курсового угла на амплитуды вторых гармоник были проведены расчеты нелинейной качки для курсовых углов $\beta = 0, 45, 90, 135, 180$ для различных типов судов. На рис. 7 — 12 приведены результаты, полученные для танкера «Баскунчак». При этом расчеты проводились по программе, реализующей решение для бесконечно глубокой жидкости.

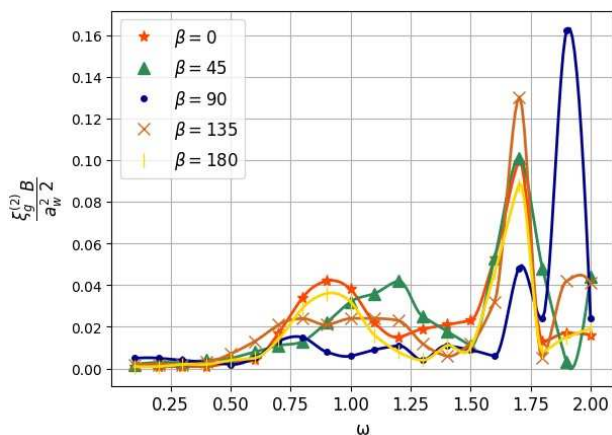


Рис. 7 АЧХ продольно-горизонтальной качки второго порядка для танкера «Баскунчак» при различных курсовых углах

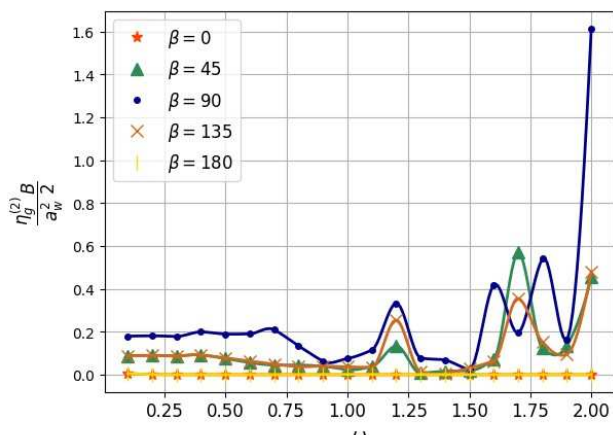


Рис. 8 АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для танкера «Баскунчак» при различных курсовых углах

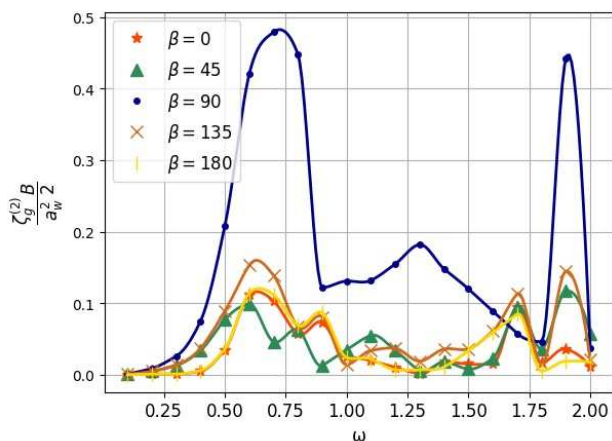


Рис. 9 АЧХ вертикальной качки второго порядка для танкера «Баскунчак» при различных курсовых углах

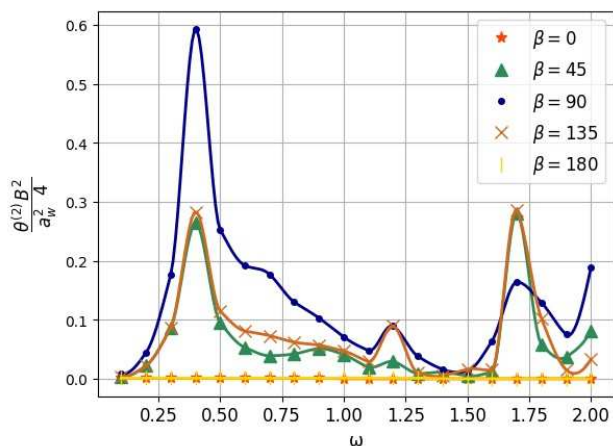


Рис. 10 АЧХ бортовой качки второго порядка для танкера «Баскунчак» при различных курсовых углах

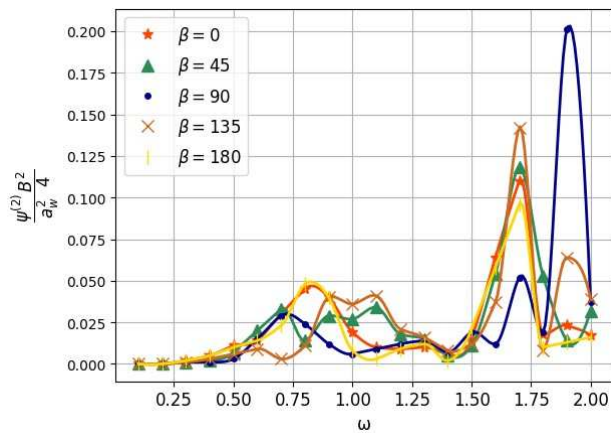


Рис. 11 АЧХ килевой качки второго порядка для танкера «Баскунчак» при различных курсовых углах

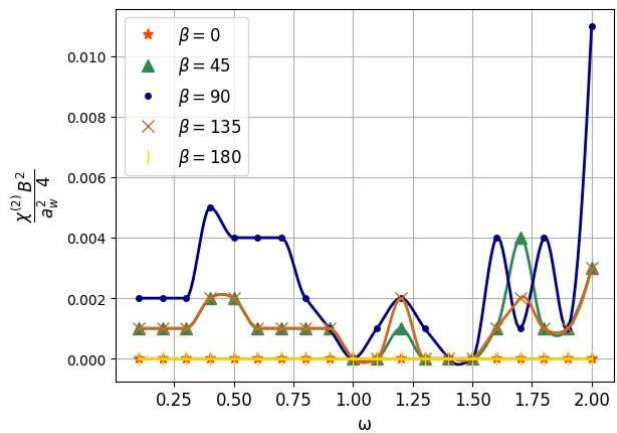


Рис. 12 АЧХ рысканья второго порядка для танкера «Баскунчак» при различных курсовых углах

Анализ полученных результатов показал, что амплитуды вторых гармоник поперечно-горизонтальной качки, вертикальной, бортовой и рысканья имеют наибольшие значения при курсовом угле $\beta = 90^\circ$ (см. рис. 7, 8, 9 и 12). Так, значения амплитуд вторых гармоник вертикальной качки на частоте $\omega = 0,7$ и $\beta = 90^\circ$ в 5 раз больше соответствующих значений при $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 180^\circ$ градусов. Амплитуды вторых гармоник бортовой качки в супергармоническом резонансе при $\beta = 90^\circ$ в два раза больше соответствующих амплитуд, имеющих место при курсовых углах $\beta = 45^\circ$ и $\beta = 135^\circ$ (см. рис. 10).

Для амплитуд вторых гармоник продольно-горизонтальной и килевой качки характерно незначительное увеличение амплитуд при курсовых углах $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 180^\circ$ (см. рис. 7 и 11).

На рис. 13 — 18 приведены результаты расчетов суммарных амплитудно-частотных характеристик в сравнении с амплитудно-частотными характеристиками, полученными по линейной теории для разных курсовых углов. В наибольшей степени влияние нелинейных сил имеет место при расположении судна лагом (см. рис. 13, 15 и 17). В случае поперечно-горизонтальной качки оно имеет место в зоне частот $\omega < 1,0$ и для танкера «Баскунчак» достигает 20 %. В случае вертикальной и бортовой качки влияние нелинейных сил имеет место в зонах соответствующих резонансных режимов (рис. 15 и 17) и составляет 25 % для вертикальной качки и 50 % для бортовой. На косых углах влияние нелинейных сил значительно уменьшается из-за уменьшения влияния амплитуд бортовой качки на различные составляющие нелинейных сил. Так, для танкера «Баскунчак» при $\beta = 135^\circ$ влияние нелинейных сил на амплитуды поперечно-горизонтальной и вертикальной качки составляет 5 — 7 %, бортовой — 20 %. На попутном и встречном волнении при отсутствии скорости хода суммарные амплитудно-частотные характеристики практически полностью совпадают с линейными.

Также в работе был проведен анализ влияния скорости хода судна на амплитуды вторых гармоник различных видов качки. Для этого расчеты для разных судов проводились для следующих скоростей: $U_s = U_{\text{расч.}}$, $U_s = U_{\text{расч.}}/2$, $U_s = U_{\text{расч.}}/4$, $U_s = 0$.

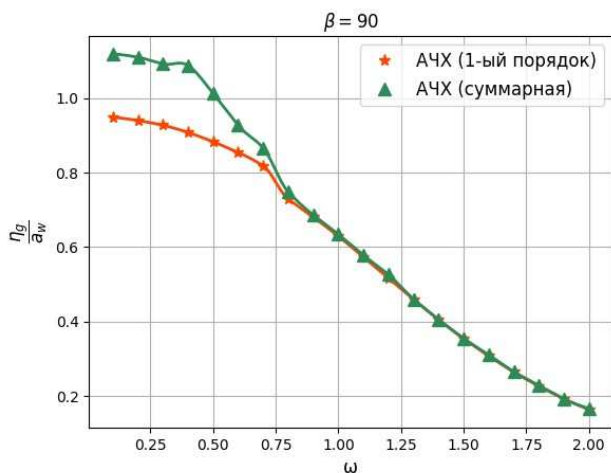


Рис. 13 АЧХ первого порядка и суммарная поперечно горизонтальной качки для танкера «Баскунчак» при $\beta = 90^\circ$

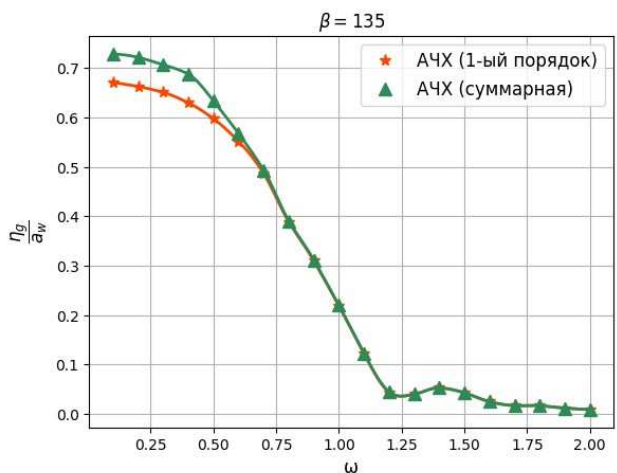
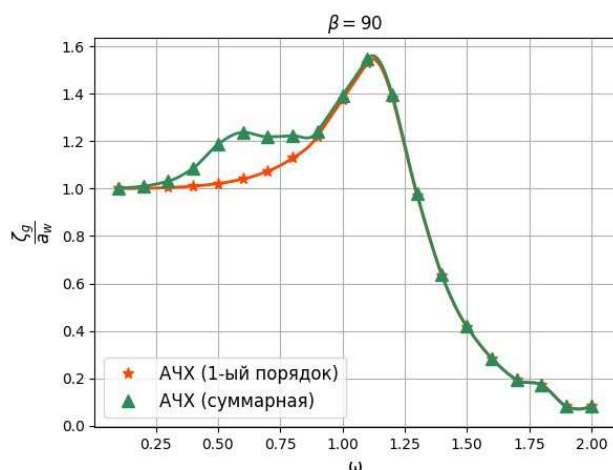
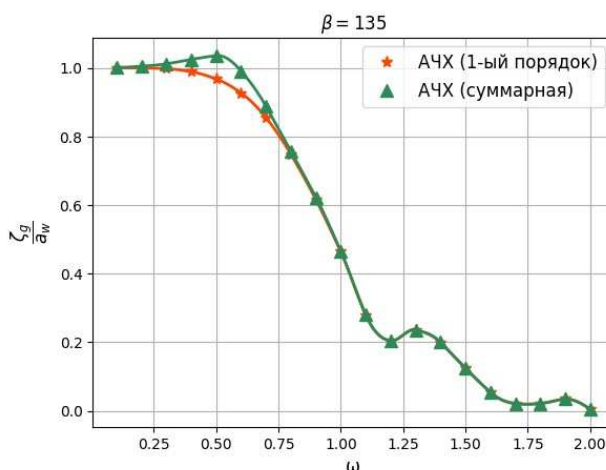
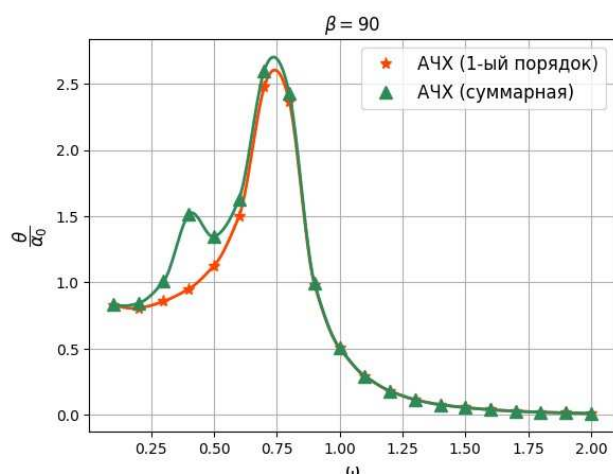
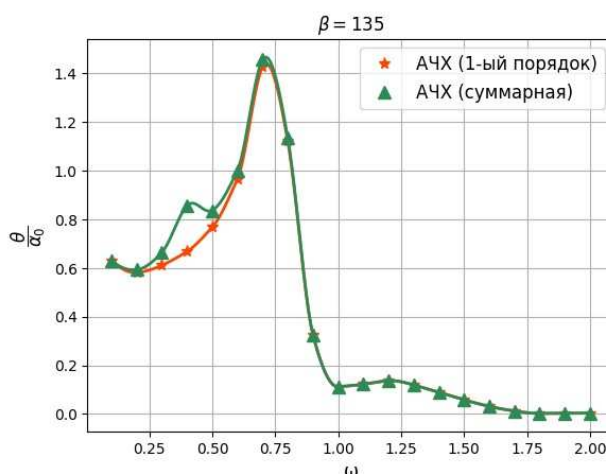


Рис. 14 АЧХ первого порядка и суммарная поперечно горизонтальной качки для танкера «Баскунчак» при $\beta = 135^\circ$

Рис. 15 АЧХ первого порядка и суммарная вертикальная качки для танкера «Баскунчак» при $\beta = 90^\circ$ Рис. 16 АЧХ первого порядка и суммарная вертикальная качка для танкера «Баскунчак» при $\beta = 135^\circ$ Рис. 17 АЧХ первого порядка и суммарная бортовой качки для танкера «Баскунчак» при $\beta = 90^\circ$ Рис. 18 АЧХ первого порядка и суммарная бортовой качки для танкера «Баскунчак» при $\beta = 135^\circ$

На рис. 19 — 30 приведены результаты влияния скорости при движении на различных курсовых углах. Из всех приведенных результатов видно, при движении на косых углах и встречных амплитуды вторых гармоник всех видов качки, кроме бортовой, в той или иной степени увеличиваются при увеличении скорости хода. Амплитуды вторых гармоник бортовой качки уменьшаются при увеличении скорости хода (см. рис. 22). При расположении лагом увеличение скорости хода в большинстве случаев приводит к уменьшению не только амплитуд бортовой качки, но и вертикальной, что связано с их взаимодействием (см. рис. 29 и 30). В отличие от косых и встречных курсовых углов, при расположении лагом в зоне частот $\omega > 0,6$ скорость хода перестает влиять на амплитуды.

На рис. 31 — 33 приведены результаты расчетов суммарных амплитудно-частотных характеристик в сравнении с линейными для лихтеровоза Алексей Косыгин при движении с расчетной скоростью хода и курсовом угле $\beta = 90^\circ$. Из приведенных результатов видно, что влияние нелинейных сил в случае поперечно-горизонтальной качки составляет 60 %, в случае вертикальной 5 % и в случае бортовой 50 %.

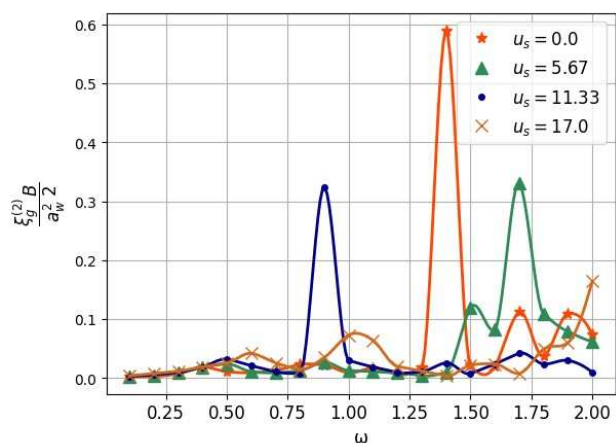


Рис. 19 АЧХ продольно-горизонтальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород» при различных скоростях ($\beta = 60^\circ$)

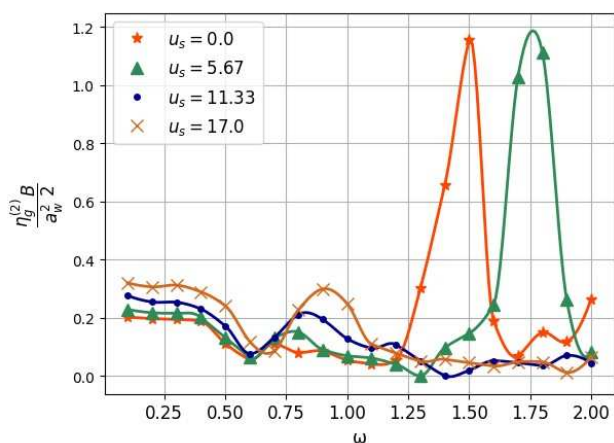


Рис. 20 АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород» при различных скоростях ($\beta = 0^\circ$)

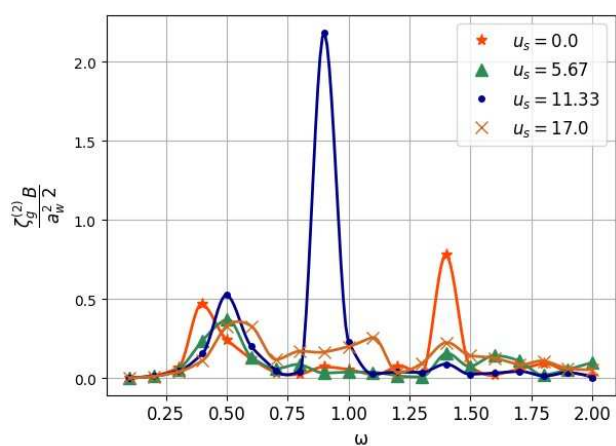


Рис. 21 АЧХ вертикальной качки второго порядка для сухогруза «Новгород» при различных скоростях ($\beta = 60^\circ$)

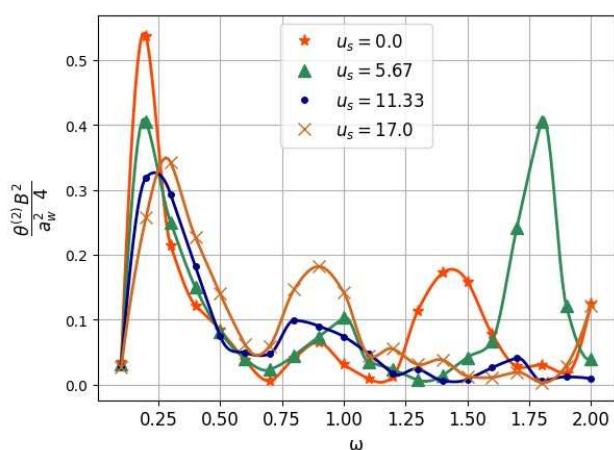


Рис. 22 АЧХ бортовой качки второго порядка для сухогруза «Новгород» при различных скоростях ($\beta = 60^\circ$).

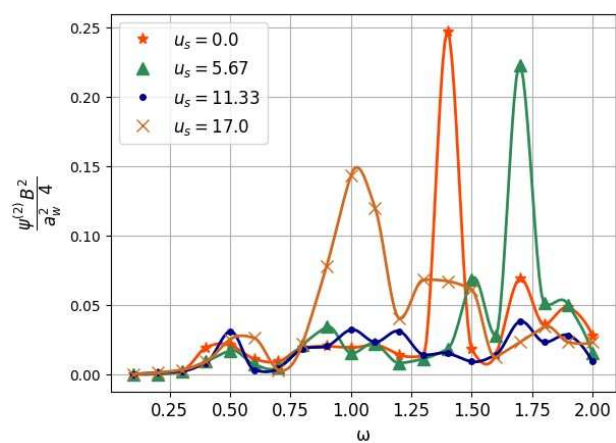


Рис. 23 АЧХ килевой качки второго порядка для сухогруза «Новгород» при различных скоростях ($\beta = 60^\circ$)

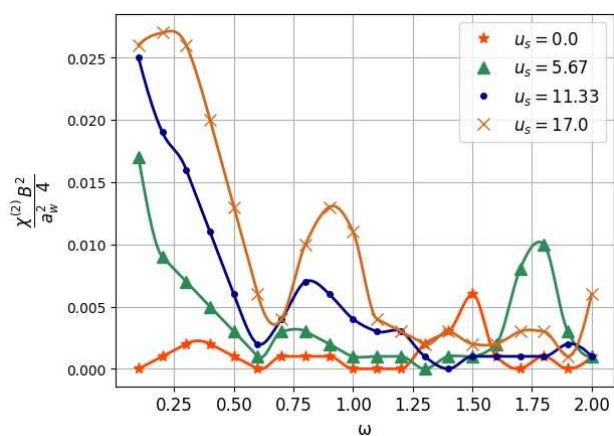


Рис. 24 АЧХ рысканья второго порядка для сухогруза «Новгород» при различных скоростях ($\beta = 60^\circ$)

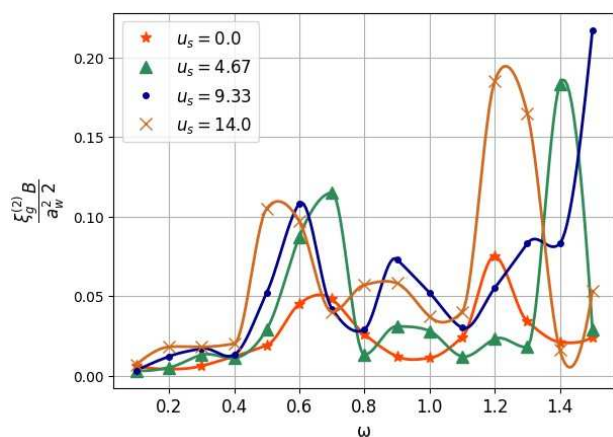


Рис. 25 АЧХ продольно-горизонтальной качки второго порядка для балкера «Капитан Панфилов» при различных скоростях ($\beta = 180^\circ$)

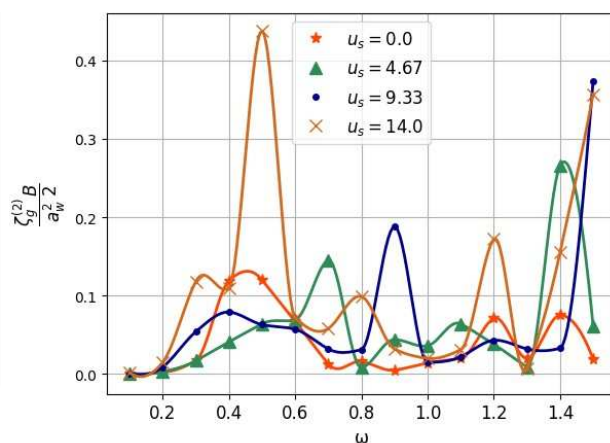


Рис. 26 АЧХ вертикальной качки второго порядка для балкера «Капитан Панфилов» при различных скоростях ($\beta = 180^\circ$)

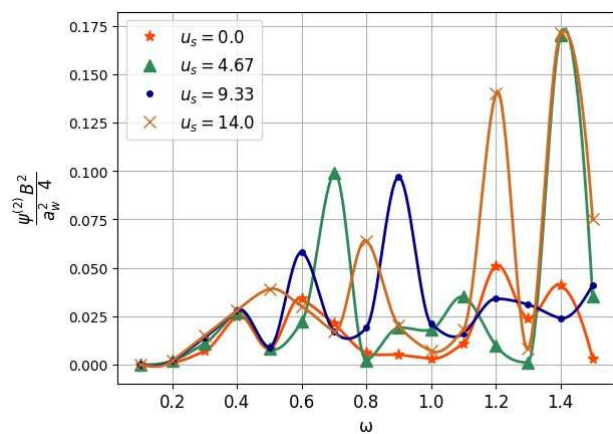


Рис. 27 АЧХ килевой качки второго порядка для балкера «Капитан Панфилов» при различных скоростях ($\beta = 180^\circ$)

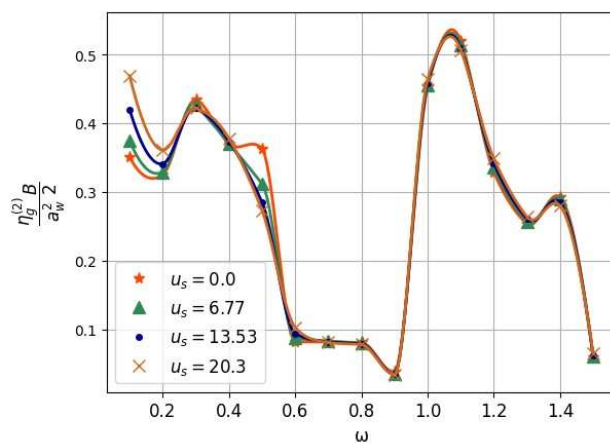


Рис. 28 АЧХ поперечно-горизонтальной качки второго порядка для лихтеровоза «Алексей Косыгин» при различных скоростях ($\beta = 90^\circ$)

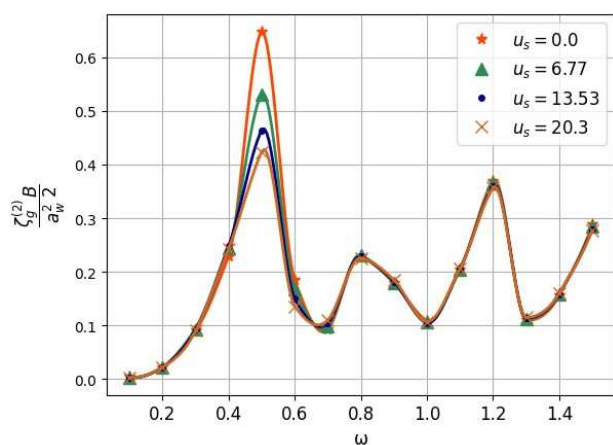


Рис. 29 АЧХ вертикальной качки второго порядка для лихтеровоза «Алексей Косыгин» при различных скоростях ($\beta = 90^\circ$)

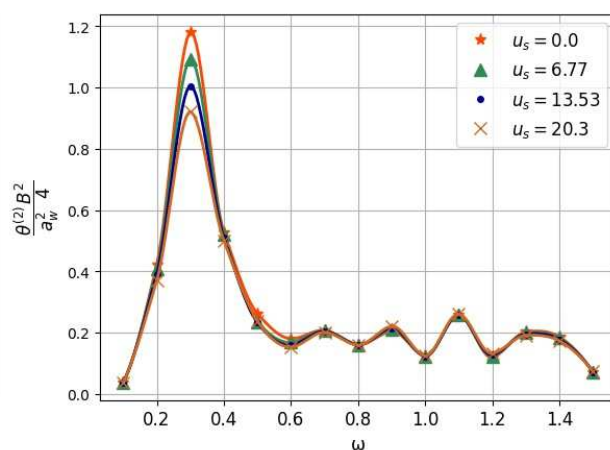


Рис. 30 АЧХ бортовой качки второго порядка для лихтеровоза «Алексей Косыгин» при различных скоростях ($\beta = 90^\circ$)

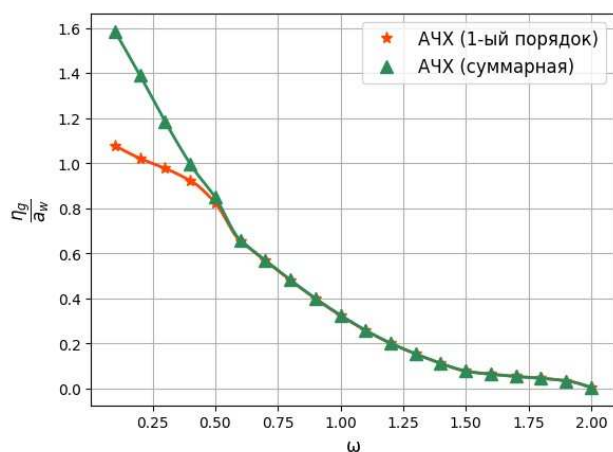


Рис. 31 АЧХ первого порядка и суммарная поперечно-горизонтальной качки для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($U_s = 20,3$; $\beta = 90^\circ$)

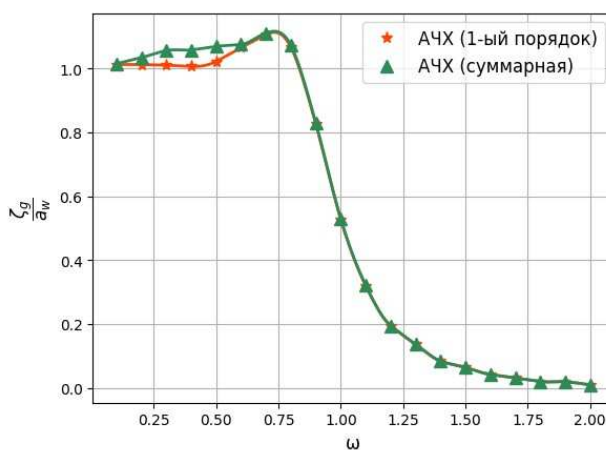


Рис. 32 АЧХ первого порядка и суммарная вертикальной качки для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($U_s = 20,3$; $\beta = 90^\circ$)

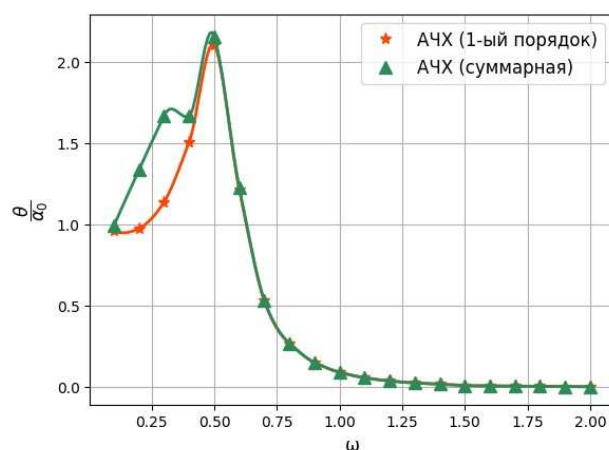


Рис. 33 АЧХ первого порядка и суммарная бортовой качки для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($U_s = 20,3$; $\beta = 90^\circ$)

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. применение трехмерных методов позволяет проводить расчеты нелинейных амплитуд при любых значениях курсовых углов и скоростей;
2. наибольшие амплитуды вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки имеют место при $\beta = 90^\circ$;
3. увеличение скорости хода приводит к увеличению амплитуд вторых гармоник всех видов качки, кроме бортовой;
4. наибольшее влияние нелинейных факторов на вертикальную и бортовую имеет место в зонах супергармонических резонансных режимов и может в ряде случаев достигать 60 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля Л., Судостроение, 1966.
2. Семенова В.Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ, 2005.
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение инерционно-демпфирующих сил второго порядка малости, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории //Морские интеллектуальные технологии, № 2 (44), Т.1, 2019, с. 36 — 44.
4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 4-1 (40), 2019, с. 63 — 69.
5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 2-2 (48), 2020, с. 11 — 18.
6. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии, № 2, Т. 3, 2021, с. 20 — 28
7. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна. Морские интеллектуальные технологии. № 4, Т. 2., 2021, с. 21 — 31.
8. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. № 2, ч. 2. с. 125 — 133
9. Lee C. H., Zhu X. Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies // 8th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada, 1993, pp. 165 — 185.
10. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N. Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, No. 6, pp. 165 — 185.

REFERENCES

1. Lugovskiy V.V. *Nelineynye zadachi morekhodnosti korablya* [Nonlinear problems of ship's seaworthiness]. L., Sudostroenie, 1966.
2. Semenova V. Yu. *Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov* [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] //DSc. Diss. Biblioteka SPBGMTU, 2005.
3. Semenova V.Yu., Albayev D.A. (2019). *Opredeleniye inertsionno-dempfiruyushchikh sil vtorogo poryadka malosti, voznikayushchikh pri kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of the second order inertial-damping forces arising during the oscillations of the ship based on the three-dimensional potential theory] //Morskiye intellektualnyye tekhnologii, No. 2(44), Vol. 1, 2019, pp. 36 — 44.
4. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vertikalnoy kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of nonlinear forces of the second order arising during the heaving of a ship, based on three-dimensional potential theory]. Morskiye intellektualnyye tekhnologii. Nos. 4-1 (40), 2019, pp. 63 — 69.
5. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri poperechno-gorizontalnykh i bortovykh kolebaniyakh sudov na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of nonlinear second-order forces arising from horizontal and rolling motions of ships based on three-dimensional potential theory]. Morskiye intellektualnyye tekhnologii. No. 2-2 (48), 2020, pp. 11 — 18.
6. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye 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 intellektualnyye tekhnologii, No. 2, Vol. 3, 2021, pp. 20 — 28.
7. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdelnykh 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 intellektualnyye tekhnologii. No. 4, Vol. 2, 2021, pp. 21 — 31.
8. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Chislennoye opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii otdelnykh 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 intellektualnyye tekhnologii. No. 2, P. 2, 2022, pp. 125 — 133.
9. Lee C.H., Zhu X. Second-order diffraction and radiation solutions on floating bodies //8th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, St. John's, Newfoundland, Canada, pp. 165 — 185.
10. Papanikolaou A., Zaraphonitis G.N. Second-order theory and calculations of motions and loads of arbitrarily shaped 3D bodies in waves. // Marine Structures, No. 6, 1993, pp. 165 — 185.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.015.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАВЛЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ КАЧКИ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПРЯМЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА, С ВЕЛИЧИНАМИ ИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ DNV

А.В. Коршунов, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

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

Р.С. Мудрик, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: mudrik.smk@gmail.com

Д.А. Пономарев, канд. техн. наук, доцент, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: ponomarev.smk@corp.smtu.ru

А.А. Родионов, д-р техн. наук, профессор, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

В работе приводится сравнительный анализ давлений и ускорений качки судна, получаемых при прямом гидродинамическом анализе линейной качки судна, с величинами из нормативных документов DNV. Для проведения прямых гидродинамических расчетов давлений и амплитуд качки судна используется панельный метод решения задачи обтекания тела потенциальной жидкостью. Для сравнения использовался подход на основе определения эквивалентных волн, продуцирующих наиболее реалистичные опасные состояния корпуса судна и соответствующие ему внешние нагрузки, с учетом фазы их действия относительно прохождения гребня волны положения миделя судна. Приведено сравнение долгосрочных откликов параметров внешних волновых нагрузок на основании подхода, основанного на эквивалентных волнах. Сравнение получаемых эпюр давлений в поперечных сечениях демонстрирует качественную сходимость с шаблонами давлений, представленными в правилах для динамических случаев. В ходе работы рассмотрено сопоставление полученных давлений и параметров качки из прямых гидродинамических расчетов с соответствующими величинами из нормативных документов классификационных обществ.

Ключевые слова: потенциальная жидкость, проблема внешних сил, панельный метод, долгосрочные отклики, эквивалентные волны, волновые давления

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRESSURES AND SHIP MOTION PARAMETERS OBTAINED ON THE BASIS OF DIRECT CALCULATIONS AND THE VALUES FROM DNV NORMATIVE DOCUMENTS

A.V. Korshunov, PhD, associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

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

R.S. Mudrik, SMTU, St. Petersburg, e-mail: mudrik.smk@gmail.com

D.A. Ponomarev, PhD, SMTU, St. Petersburg, e-mail: ponomarev.smk@corp.smtu.ru

A.A. Rodionov, DSc, SMTU, St. Petersburg, e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

The paper presents a comparative analysis of the pressures and accelerations of the ship's motions, obtained by direct hydrodynamic analysis of the ship's linear motions, with the values from the DNV normative regulatory documents. To carry out direct hydrodynamic calculations of pressures and amplitudes of the ship's roll, the panel method has been used to solve the problem of potential fluid flow around a body. For comparison, an approach has been used based on the determination of equivalent waves that produce the most realistic dangerous states of the ship's hull and the corresponding external loads, taking into account the phase of their action relative to the passage of the wave crest of the position of the ship's midsection. A comparison of long-term responses of parameters of external wave loads based on the approach based on equivalent waves has been given. Comparison of the resulting cross-sectional pressure diagrams demonstrates a qualitative convergence with the pressure patterns presented in the rules for dynamic cases. In the course of the research, a comparison of the obtained pressures and motion parameters from direct hydrodynamic calculations with the corresponding values from the regulatory documents of classification societies has been considered.

Keywords: *potential fluid, problem of external forces, panel method, long-term responses, equivalent waves, wave pressures*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в правилах РС [1] определение внешних нагрузок для обоснования прочности судовых конструкций основывается на зависимостях для общих нагрузок на корпус судна на волнении при перегибе и прогибе, а местные волновые нагрузки определяются распределением размахов переменных давлений вдоль корпуса судна, которые зависят от высоты расчетной волны, но не зависят от случая: перегиб или прогиб на волне. В тоже время классификационные общества, такие как DNV-GL [2, 3, 4], LR [5, 6, 7, 8], ABS [9, 10, 11], BV [12, 13, 14], МАКО [14, 15], опираясь на общие принципы, для определения волновых нагрузок задаются рядом эквивалентных волн, на каждой из которых превалирует определенный параметр внешних нагрузок.

Подход эквивалентных волн [14], основан на приложении к корпусу судна сочетания компонент динамических нагрузок, действующих на судно при качке на регулярном волнении. Выбор каждой эквивалентной волны основывается на максимизации одной из наиболее опасных компонент внешних нагрузок (волновой изгибающий момент на миделе, амплитуда бортовой качки и др.), влияние на прочность которого будет превалировать на данном волнении, по сравнению со вкладом оставшихся компонент.

В общем случае выбор ряда превалирующих параметров внешних нагрузок, для которых требуется определять эквивалентные волны, основывается на воспроизведении наиболее опасных сочетаний действия внешних нагрузок.

Параметры эквивалентных волн и сопутствующие волновые нагрузки можно получить из прямых гидродинамических расчетов качки судна на волнении и анализа долгосрочных откликов величин нагрузок.

В работе приводится сравнительный анализ давлений и ускорений ряда эквивалентных волн, рассчитанных по правилам DNV [2] и полученных из расчетов линейной качки судна панельным методом.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В руководствах классификационных обществ [4, 11, 14] по определению эквивалентных волн в результате прямых гидродинамических расчетов описывается процедура выбора эквивалентных волн на основе долгосрочных откликов превалирующих параметров внешних нагрузок. Эквивалентные расчетные волны могут быть заданы с помощью амплитуды волнения, длины волны, направления волнения и фазы волнения относительно миделевого сечения судна. При этом все компоненты внешних нагрузок, действующих на корпус судна, должны быть вычислены в определенное время: когда рассматриваемый превалирующий параметр достигает максимума.

Для определения параметров эквивалентной волны, требуется рассчитать долгосрочные отклики (LTR) рассматриваемых превалирующих параметров внешних нагрузок, а также RAO — линейный оператор отклика, для каждого параметра качки и внешних нагрузок. RAO по своей природе будет ничем иным, как обезразмеренной по амплитуде волнения амплитудно-частотная характеристикой определенного параметра, в зависимости от различных углов набегания. Тогда амплитуда эквивалентной волны будет равна

$$a_w = LTR_j / RAO_j^{\max}, \quad (1)$$

где a_w — амплитуда эквивалентной волны для j -ого превалирующего параметра;
 LTR_j — долгосрочный отклик j -ого превалирующего параметра;
 $RAO_j^{\max}$ — максимальное значение передаточной функции (RAO) j -ого превалирующего параметра.

Частота и направление эквивалентной волны (ω , β) определяются через положение максимума передаточной функции (RAO) j -ого превалирующего параметра. Длина эквивалентной волны определяется через выражение

$$\lambda = 2\pi g / \omega^2, \quad (2)$$

где λ — длина волны;
 g — ускорение свободного падения;
 ω — частота волнения.

Тогда компоненты внешних нагрузок, действующие на данной эквивалентной волне, можно представить в следующем виде:

$$M_i = RAO_i a_w \cos(\epsilon_j - \epsilon_i), \quad (3)$$

где M_i — определяемая величина i -ого компонента внешних нагрузок (вертикального изгибающего момента, перерезывающей силы, внешних и внутренних давлений, ускорений и др.);
 RAO_i — значение передаточной функции (RAO) i -ого компонента внешних нагрузок при частоте и направлении заданной эквивалентной волны;
 a_w — амплитуда эквивалентной волны для j -ого превалирующего параметра;
 ϵ_i — фазовый угол i -ого компонента внешних нагрузок при частоте и направлении заданной эквивалентной волны;
 ϵ_j — фазовый угол для j -ого превалирующего параметра при частоте и направлении заданной эквивалентной волны.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Для сопоставления давлений и параметров качки, полученных с помощью прямых гидродинамических расчетов [17] с соответствующими величинами из нормативных документов классификационных обществ требуется определить их значения при параметрах волнения, соответствующих описываемым в правилах динамическим случаям. В свою очередь динамические случаи являются обобщением рассмотрения различных эквивалентных волн и выражают наиболее опасные сочетания действия нагрузок. Поэтому для сравнения требуется сформировать перечень эквивалентных волн, получаемых на основе результатов гидродинамических расчетов.

Для исследования используются результаты гидродинамических расчетов судов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Список гидродинамических расчетов

Номер расчета	Тип судна	Загрузка	Длина L , м	Ширина B , м	Осадка T , м	Водоизмещение D , тыс. т	Коэффициент полноты, c_B
1	Танкер	в грузу	229	32,24	13	75,5	0,77
2	Танкер	в балласте	229	32,24	7,8	43,36	0,73
3	Контейнеровоз	в грузу	98	18,8	6,76	6,69	0,52
4	Контейнеровоз	в грузу	198	29,97	10	32,52	0,53
5	Контейнеровоз	в балласте	198	29,97	6	16,87	0,46
6	Контейнеровоз	в грузу	300	37	11	68,8	0,55
7	Сухогруз	в грузу	224	32,23	12,72	75,48	0,80
8	Сухогруз	в балласте	224	32,23	7,63	43,25	0,77
9	Ro-Ro	в грузу	198,8	32,2	10	40,9	0,62
10	Ro-Ro	в балласте	198,8	32,2	6	21,67	0,55

Для примера, панельная модель танкера из расчета № 1 представлена на рис. 1.

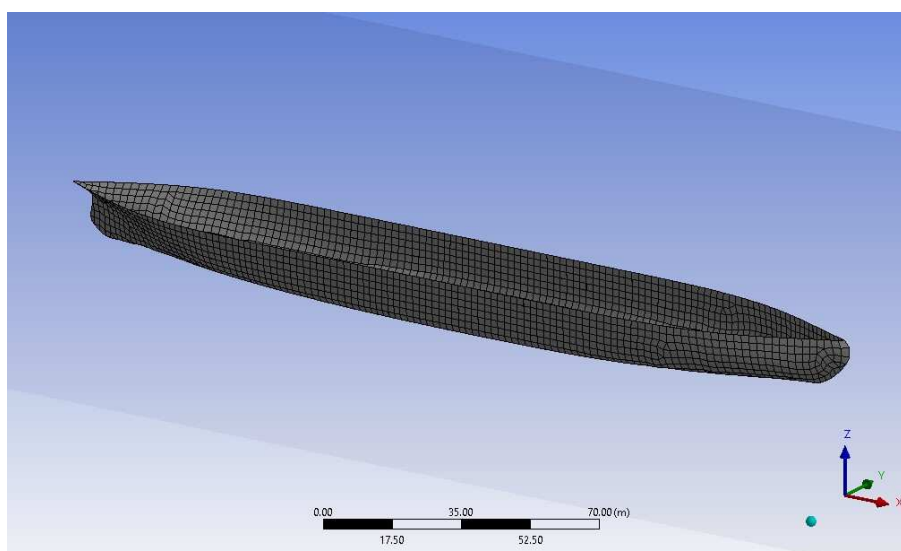


Рис. 1 Расчетная модель танкера

Расчеты производились в программном продукте AQWA [18], для случаев набегания волнения от -180° и 180° с шагом 30° , при диапазоне частот — от 0,1 рад/с до 2,0 рад/с с шагом 0,05.

Полученные в первом этапе величины обобщенных нагрузок, давлений, амплитуд и ускорений качки представляют собой отклики на внешнее возмущение — регулярное волнение, единичной амплитуды. Для анализа долгосрочных откликов на нерегулярном волнении используется полновероятностный подход [16], при этом в качестве спектра волнения берется спектр Пирсона — Московица, а диаграмма рассеяния соответствует району Северной Атлантики.

Эквивалентные волны определяются для следующих превалирующих параметров:

- вертикального изгибающего момента;
- ускорения вертикальной качки;
- амплитуды бортовой качки;
- волнового давления на уровне ватерлинии;
- крутящего момента;
- ускорения килевой качки.

Такие же превалирующие параметры используются в нормативных документах DNV-GL и МАКО [2, 15].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление вычисленных параметров качки и давлений с величинами, регламентируемыми правилами DNV-GL для динамических случаев, производится на следующем основании. Динамическому случаю в правилах DNV-GL (который обозначается соответствующей аббревиатурой, например, HSM, BSR, OST и т.д.) ставится в соответствие эквивалентная волна, характеристики которой определены в результате максимизации (минимизации) соответствующего превалирующего параметра.

Указанное соответствие представлено в табл. 2.

Таблица 2

Соответствие динамических случаев DNV-GL и эквивалентных волн

Динамический случай DNV-GL	Эквивалентная волна на основе гидродинамических расчетов для превалирующего параметра
HSM-1	Встречное волнение, максимизирует вертикальный изгибающий момент
HAS-1	Встречное волнение, максимизирует ускорение вертикальной качки
BSR-1	Волнение лагом, максимизирует амплитуда бортовой качки
BSP-1	Волнение лагом, максимизирует волновое давление на уровне ватерлинии
OST-1	Косое волнение, максимизирует крутящий момент
OSA-1	Косое волнение, максимизирует ускорение килевой качки

Сравнение давлений

Каждому случаю, описанному в правилах, соответствует своя форма эпюры внешних давлений на корпус судна. Для корректности сопоставления, формулы для давлений по правилам принимались без учета поправки на конечность высоты волнения, т.к. в выполненных гидродинамических расчетах на основе линейной теории качки смоченная поверхность корпуса судна принималась неизменяемой.

Для каждого гидродинамического расчета (см. табл. 1) были получены эпюры внешних волновых давлений в миделевом сечении.

Полученные эпюры для гидродинамического расчета № 1 для выбранных эквивалентных волн и соответствующие им эпюры по правилам DNV представлены на рис. 2 — 4. На всех эпюрах шпангоуты представлены в виде с кормы.

В табл. 3 представлены значения относительной разницы величин давлений в точке на ватерлинии по правому борту, полученных по результатам гидродинамических расчетов, и величин, определяемых по правилам DNV-GL.

Таблица 3

Значение относительной разницы (в %) давлений в миделевом сечении по гидродинамическим расчетам и по зависимостям из DNV-GL

Номер расчета	HSM-1 Верт. изгб. момент	HSA-1 Ускор. верт. качки	BSR-1 Ампл. борт. качки	BSP-1 Волн. давл. на ВЛ	OST-1 Крутящий момент	OSA-1 Ускор. кил. качки
1	2	83	127	-69	1502	264
2	-18	79	126	-67	-1138	-23
3	-11	21	-9	-30	260	-2384
4	-86	-150	-3	-59	1021	-733
5	-28	-249	-5	-40	1592	-620
6	-17	-104	75	-51	308	679
7	-9	-90	76	-79	797	542
8	-12	-156	80	-390	1567	90
9	-21	-251	-21	-63	-1838	664
10	-36	-144	-14	-29	-167	-549

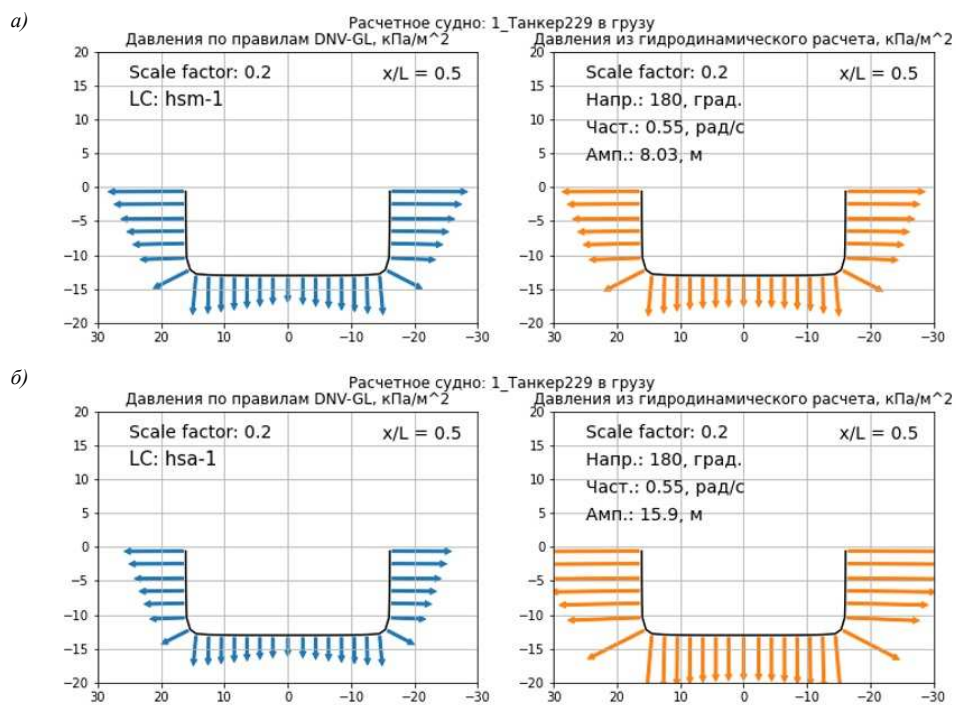


Рис. 2 Сравнение эпюр волновых давлений в динамическом случае:

а) — HSM-1; б) — HSA-1

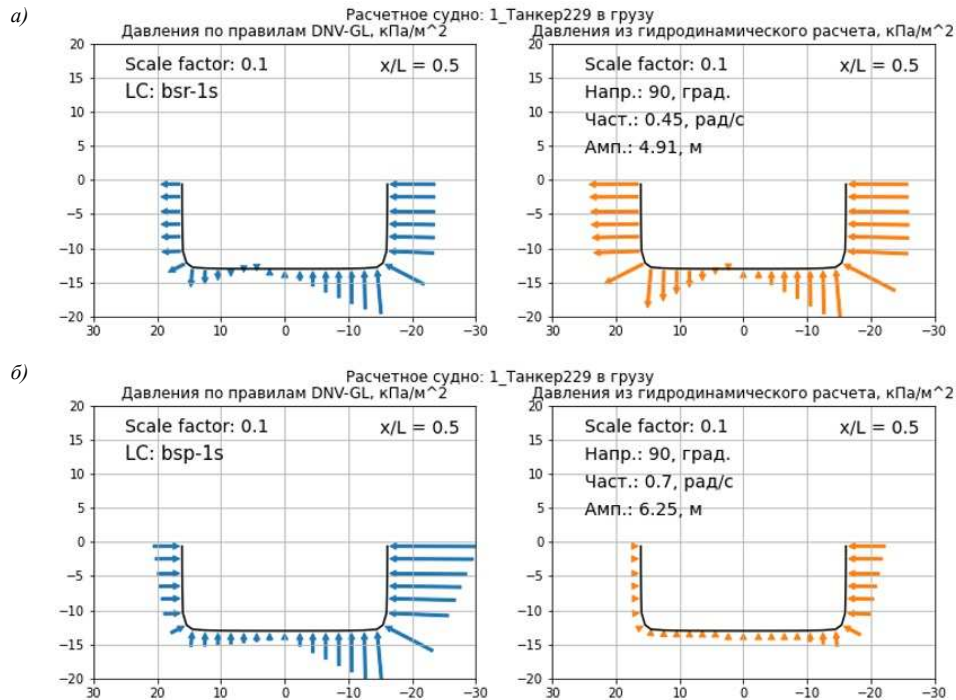


Рис. 3 Сравнение эпюр волновых давлений в динамическом случае:

а) — BSR-1; б) — BSP-1

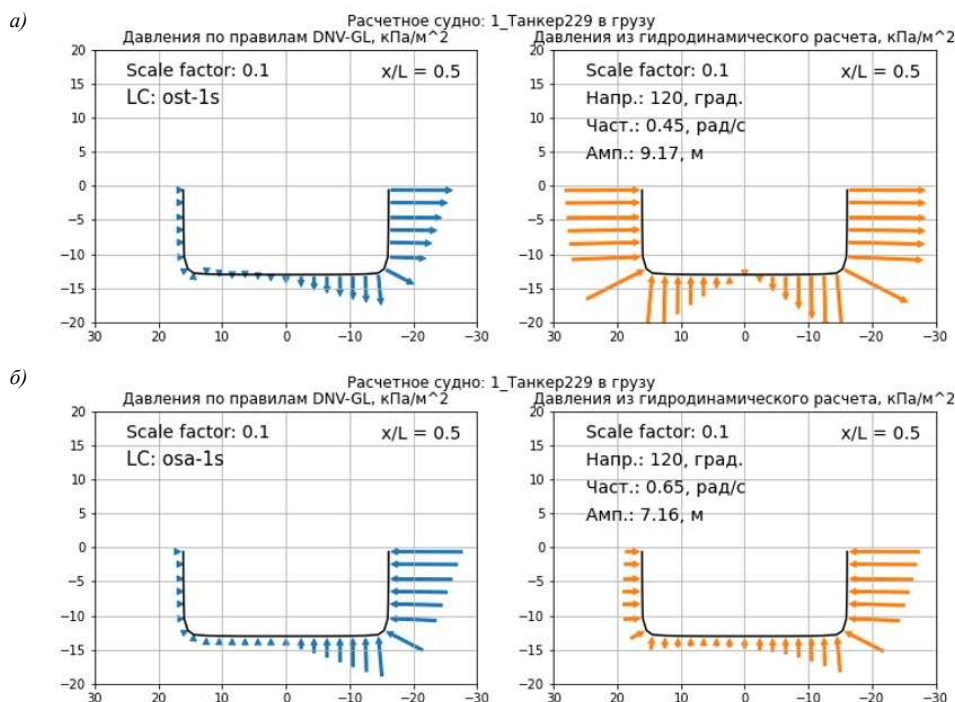


Рис. 4 Сравнение эпюр волновых давлений в динамическом случае:
а) — OST-1, б) — OSA-1

Эпюры давлений, полученных по результатам гидродинамических расчетов, показывают качественно похожие задаваемые в правилах формы распределения давлений по контурам шпангоутов. Для давлений на прямом курсе: при случаях HSM-1, HSA-1 - видны явно выраженные зависимости давлений от расстояния до киля по оси Y и от расстояния до основной плоскости по Z, при этом в районе киля имеет место наименьшее давление. Для случаев волнения лагом BSR-1, BSP-1 наблюдается скупенность эпюр относительно диаметральной плоскости, так как рассматривается случай набегания волны с правого борта — то и максимальные давления наблюдаются именно на нем. Для случаев на косом волнении OST-1 и OSA-1 эпюры давлений также схожи.

При рассмотрении значений, представленных в табл. 3 для всех случаев явно заметно расхождение амплитуд давлений, особенно выделяется случай при максимизации крутящего волнения, где разница давлений составляет около одного порядка. Также при схожести распределений давлений, замечается расхождение рассматриваемых фаз давлений при правилах и на эквивалентных волнах по гидродинамическим расчетам, порою расхождение достигает таких значений, что сравниваются эпюры давлений, лежащих в противофазе.

Такие расхождения в амплитудах и фазах между давлениями по правилам и по гидродинамическим расчетам обусловлены обобщением эпюр давлений, представленных в правилах, по сериям расчетов стандартизированных типовых судов, тогда как давления, полученные по прямому методу расчета, относятся к конкретному судну при заданном нагружении, и непосредственно учитывает как геометрию судна, так и распределение масс судна.

Сравнение ускорений

В табл. 4 представлено сравнение амплитуд бортовой и килевой качки, полученных в результате расчетного анализа долгосрочного отклика со значениями, вычисленными по правилам DNV. В табл. 5 приведено аналогичное сравнение ускорений пяти видов качки.

Анализ данных таблиц демонстрируют высокую сходимость вычисленных значений, расхождение в большинстве случаев не превышает 10 %, в основном находится на уровне 1 — 5 %. Наибольшее расхождение наблюдается у значений килевой качки, что в среднем составляет около 20 %.

Амплитуды и ускорения качки в основном зависят от главных размерений судна и положения метacentра, именно поэтому значения, посчитанные по зависимостям из Правил и по долгосрочным откликам на нерегулярном волнении на основе прямых расчетов, так схожи: явный учет геометрии корпуса судна и учет реального распределения нагрузки масс при гидродинамическом анализе не так сильно влияет на получаемые результаты, которые в основном зависят от интегральных параметров геометрии и распределения масс.

Таблица 4

Сравнение амплитуд качки

Номер расчета	Амплитуда бортовой качки, °			Амплитуда килевой качки, °		
	LTR	DNV	Разница, %	LTR	DNV	Разница, %
1	32,26	32,10	-0,49	11,34	9,87	-12,95
2	35,85	38,74	8,06	10,13	9,87	-2,54
3	50,32	48,57	-3,48	22,53	20,54	-8,85
4	40,71	41,40	1,70	14,39	11,19	-22,26
5	40,41	38,85	-3,87	13,12	11,19	-14,75
6	31,41	35,82	14,04	8,39	7,84	-6,65
7	33,64	33,27	-1,10	10,48	10,06	-4,00
8	41,13	37,74	-8,24	9,91	10,06	1,50
9	37,93	38,37	1,16	11,58	11,15	-3,76
10	29,60	33,83	14,29	12,39	11,15	-10,02

Таблица 5

Сравнение ускорений качки судов

Номер расчета	Ускорение продольно-горизонтальной качки, м/с ²			Ускорение поперечно-горизонтальной качки, м/с ²			Ускорение вертикальной качки, м/с ²			Ускорение бортовой качки, рад/с ²			Ускорение килевой качки, рад/с ²		
	LTR	DNV	Разница, %	LTR	DNV	Разница, %	LTR	DNV	Разница, %	LTR	DNV	Разница, %	LTR	DNV	Разница, %
1	1,06	1,15	9,01	1,82	1,94	6,49	3,42	3,58	4,70	0,11	0,09	-17,7	0,062	0,050	-20,1
2	1,15	1,17	1,82	2,01	1,97	-2,32	3,37	3,63	7,86	0,20	0,25	26,8	0,060	0,050	-16,7
3	2,37	2,28	-3,80	2,74	3,32	21,50	5,01	5,19	3,58	0,47	0,41	-12,6	0,228	0,156	-31,5
4	1,43	1,40	-2,59	2,04	2,30	12,83	3,66	4,28	17,03	0,31	0,34	7,87	0,090	0,063	-29,6
5	1,55	1,43	-7,63	2,23	2,36	5,70	3,66	4,39	19,71	0,26	0,22	-17,3	0,092	0,063	-31,4
6	0,98	1,03	5,56	1,75	1,79	2,41	3,09	3,28	6,00	0,17	0,21	19,3	0,041	0,031	-23,7
7	1,05	1,16	10,44	1,82	1,94	6,49	3,38	3,59	6,08	0,13	0,11	-13,9	0,059	0,052	-12,2
8	1,13	1,17	3,32	1,98	1,96	-1,09	3,31	3,63	9,45	0,21	0,21	-1,86	0,059	0,052	-11,9
9	1,35	1,35	-0,15	1,94	2,22	14,49	3,45	4,13	19,82	0,22	0,23	5,34	0,071	0,063	-11,5
10	1,49	1,38	-7,18	2,10	2,28	8,28	3,46	4,24	22,62	0,13	0,12	-7,41	0,084	0,063	-25,3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы рассмотрено сопоставление полученных давлений и параметров качки из прямых гидродинамических расчетов с соответствующими величинами из нормативных документов классификационных обществ. Первые представляют собой отклики давлений и параметров качки, получаемые с учетом реальной геометрии корпуса судна и прямого учета распределения масс судна, вторые — рассчитываются на основе интегральных характеристик судна и представляют собой обобщение статистических данных натурных измерений, модельных измерений и большого числа расчетов различных серий типовых судов.

Для сравнения использовался подход на основе определения эквивалентных волн, продуцирующих наиболее реалистичные опасные состояния корпуса судна и соответствующие ему внешние нагрузки, с учетом фазы их действия относительно прохождения гребня волны положения миделя судна. Каждому динамическому случаю из правил подобрана соответствующая эквивалентная волна, максимизирующая превалярующий параметр внешней нагрузки. Остальные же нагрузки принимают значения, действующие при пиковом значении преваляющего параметра. Данный подход позволяет учитывать реалистичные комбинации внешних нагрузок. Ряд преваляющих параметров выбирается на основе общих принципов и накопившегося опыта анализа прочности судна, представленного в списках динамических случаев, рассматриваемых различными классификационными обществами.

Сравнение получаемых эпюр давлений в поперечных сечениях демонстрирует качественную сходимость с шаблонами давлений, представленными в правилах для динамических случаев. Но видны явные расхождения в амплитудных и фазовых значениях, объясняющиеся различностью подходов, на которых основаны расчеты по прямым методам и по зависимостям правил, а также характеристиками самих судов, выбранными для гидродинамических расчетов по прямому методу.

Параметры качки судна — амплитуды и ускорения качки, полученные в результате расчетов долгосрочных откликов и по зависимостям из правил — демонстрируют схожие значения, так как значения этих параметров для судов в основном зависят от их интегральных характеристик: размерений, метацентрических высот. Наибольшее расхождение имеют ускорения килевой качки судна, вызванное явным учетом геометрии корпуса судна и ее большим разбросом на косом волнении при гидродинамических расчетах.

Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы, выполненной по заказу Российского морского регистра судоходства, на тему «Разработка методики обоснования предельной прочности судовых конструкций на основе прямых методов расчета».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник нормативно-методических материалов, книга 11, Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург, 2002.
2. DNV. Rules for Classification of Ships, Part 3, Edition July 2021.
3. DNV. Finite element analysis (DNV-CG-0127). Class Guideline. Edition August 2021.
4. DNV. Wave loads (DNV-CG-0130). Class Guideline. Edition October 2021.
5. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Ships, July 2021.
6. Lloyd's Register. ShipRight — Design and Construction, Structural Design Assessment, Primary Structure of Tankers. Guidance On Direct Calculations, May 2004.
7. Lloyd's Register. ShipRight — Design and Construction, Structural Design Assessment, Primary Structure of Bulk Carriers. Guidance On Direct Calculations, May 2004.
8. Lloyd's Register. ShipRight — Design and Construction, Structural Design Assessment, Primary Structure of Container Ships. Guidance On Direct Calculations, June 2021.
9. ABS. Rules for Building and Classing, Marine Vessels, Part 3 — Hull Construction and Equipment, January 2022.
10. ABS. Guidance Notes On Safehull Finite Element Analysis of Hull Structures, December 2004 (Updated February 2014).
11. ABS. Guide for "Safehull-Dynamic Loading Approach" For Vessels, December 2006 (Updated May 2018).
12. Bureau Veritas. Rules for the Classification of Steel Ships, PART B — Hull and Stability (NR467 — Part B), July 2021.
13. Bureau Veritas. Structural Analysis of Offshore Surface Units Through Full Length Finite Element Models (NR551), April 2010.
14. Bureau Veritas. Guidance for Long-term Hydro-structure Calculations (NI638). February 2019.
15. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, Edition 01 January 2022.
16. IACS. Rec. 34. Standard Wave Data, November 2001.
17. Коршунов В.А. Сравнительный анализ различных моделей для прогнозирования волновых нагрузок корпуса судна // Коршунов В.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А., Кутейников М.А. / Труды Крыловского государственного научного центра, № 2(400), 2022, с. 17 — 23.
18. Ansys Inc. ANSYS AQWA Users Manual. 2010.

REFERENCES

1. Collection of normative and methodical materials. Book 11. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2002. (In Russian)
2. DNV. Rules for Classification of Ships, Part 3, Edition July 2021.
3. DNV. Finite element analysis (DNV-CG-0127). Class Guideline. Edition August 2021.
4. DNV. Wave loads (DNV-CG-0130). Class Guideline. Edition October 2021.
5. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Ships, July 2021.
6. Lloyd's Register. ShipRight — Design and Construction, Structural Design Assessment, Primary Structure of Tankers. Guidance On Direct Calculations, May 2004.
7. Lloyd's Register. ShipRight — Design and Construction, Structural Design Assessment, Primary Structure of Bulk Carriers. Guidance On Direct Calculations, May 2004.
8. Lloyd's Register. ShipRight — Design and Construction, Structural Design Assessment, Primary Structure of Container Ships. Guidance On Direct Calculations, June 2021.
9. ABS. Rules for Building and Classing, Marine Vessels, Part 3 — Hull Construction and Equipment, January 2022.
10. ABS. Guidance Notes On Safehull Finite Element Analysis of Hull Structures, December 2004 (Updated February 2014).
11. ABS. Guide for 'Safehull-Dynamic Loading Approach' For Vessels, December 2006 (Updated May 2018).
12. Bureau Veritas. Rules for the Classification of Steel Ships, PART B – Hull and Stability (NR467 — Part B), July 2021.
13. Bureau Veritas. Structural Analysis of Offshore Surface Units Through Full Length Finite Element Models (NR551), April 2010.
14. Bureau Veritas. Guidance for Long-term Hydro-structure Calculations (NI638). February 2019.
15. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, Edition 01 January 2022.
16. IACS. Rec. 34. Standard Wave Data, November 2001.
17. Korshunov V.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. *Sravnitelnyy analiz razlichnykh modeley dlya prognozirovaniya volnovykh nagruzok korpusa sudna* [Comparative analysis of various models for predicting the wave loads of the ship's hull]. Proceedings of Krylov state research center, No. 2(400). 2022, pp. 17 — 23.
18. Ansys Inc. ANSYS AQWA Users Manual. 2010.

УДК 623.8/.9(075.8)

ВЛИЯНИЕ ДИАГОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАБОРА БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ НА ЕГО МЕСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ И ВЕСОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

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

Т.А. Макарова, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: makarova_tanya_2000@mail.ru

Одна из проблем прочности и жесткости корпусов судов с широким раскрытием палубы связана с кручением корпуса на волнении. В статье рассмотрена возможность введения в набор бортового перекрытия диагональных рамных элементов, которые должны существенно повысить сопротивление перекрытия характерным для кручения корпуса судна сдвиговым деформациям. Дополнительные связи, с одной стороны, увеличивают вес перекрытия, а с другой — приводят к уменьшению веса основного набора за счет уменьшения его расчетных пролетов, а также веса традиционного рамного набора благодаря перераспределению давления со стороны моря на диагональные элементы. В итоге имеет место незначительное увеличение веса перекрытия при обеспечении его местной прочности и очевидном увеличении сопротивления перекрытия сдвигу, имеющему место при кручении корпуса судна.

Ключевые слова: кручение корпуса судна, диагональные элементы набора, конструкция бортового перекрытия, вес элементов набора

INFLUENCE OF DIAGONAL FRAMING MEMBERS OF SIDE GRILLAGE ON ITS WEIGHT CHARACTERISTICS

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

T.A. Makarova, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: makarova_tanya_2000@mail.ru

One of the problems of strength and rigidity of the hulls of ships with large deck openings is related to hull torsion in waves. The article considers the possibility of introducing diagonal frame elements into the side grillage, which would significantly increase the resistance of the grillage to shear deformations under the torsion of the ship's hull. Introduction of additional members, on the one hand, will lead to the weight increase of the grillage. On the other hand, such introduction will also lead to a decrease in the weight of the main framing due to the decrease in its design span, as well as the weight of the traditional frame grillage due to the redistribution of pressure from the sea to the diagonal elements. As a result, there is a slight increase in the weight of the grillage; at the same time its local strength is ensured, with an obvious increase in the resistance of the grillage to the shear occurring during the torsion of the ship's hull.

Keywords: twisting of the ship's hull, diagonal framing members, side grillage structure, weight of framing members

ВВЕДЕНИЕ

Одна из проблем прочности и жесткости корпусов судов с широким раскрытием палубы связана с кручением корпуса на волнении при движении косым курсом к волне.

Корпус судна с широким раскрытием палубы, например контейнеровоза, с точки зрения строительной механики представляет собой тонкостенный брус открытого профиля. Касательные напряжения и особенно углы закручивания, которые возникают при кручении такого бруса, могут быть при прочих равных условиях на порядки больше напряжений и углов закручивания для бруса закрытого профиля, которым является, например, корпус танкера. В результате наблюдаются повреждения узлов корпусных конструкций, разрушение замков люковых закрытий и, как следствие, разгерметизация трюмов.

Существующие системы набора перекрытий корпуса предполагают создание каркаса, состоящего из брусьев, пересекающихся под прямыми или близкими к ним углами. Такой каркас, представляющий собой систему прямоугольных рамок, обладает относительно низкой жесткостью в отношении сдвиговых деформаций основных перекрытий корпуса судна, возникающих при его кручении. Ситуация усугубляется тем, что при сдвиге брусья каркаса изгибаются в плоскости перекрытия, в которой их сечения обладают минимальным осевым моментом инерции, т.е. минимальной жесткостью. В связи с этим сдвиговая жесткость отдельных перекрытий и корпуса в целом обеспечивается, главным образом, подкрепленной набором обшивкой.

Очевидным и наиболее простым конструктивным решением, позволяющим существенно увеличить сдвиговую жесткость отдельных перекрытий, а, следовательно, и всего корпуса, является введение в их набор диагональных элементов. Аналогичный подход к обеспечению прочности и жесткости стержневых систем широко используется в конструкциях ферм. Такую систему набора можно назвать диагональной (ДСН). В этом случае балочный каркас корпуса будет состоять не из прямоугольных, а из треугольных рамок, сопротивление которых сдвигу многократно выше, т.к. принципиально меняется характер деформирования брусев. Если при сдвиге прямоугольных рамок брусья работают, главным образом, на изгиб, то брусья в треугольных рамках при сдвиге подвергаются в основном растяжению-сжатию.

Обоснование целесообразности использования ДСН предполагает решение ряда задач. Основными из них являются:

1. выбор приемлемого уровня диагональных элементов набора — уровень балок основного набора (балки главного направления в перекрытии) или уровень рамных связей. Эта задача относится, главным образом, к конструктивному и технологическому аспектам проблемы;
2. оценка влияния диагональных элементов на прочность и жесткость корпуса при кручении и, таким образом, на эффективность ДСН;
3. оценка влияния диагональных элементов на общую продольную прочность корпуса;
4. оценка влияния диагональных элементов на местную прочность перекрытий и их узлов. Некоторые результаты в этом направлении получены в работе [1];
5. оценка влияния диагональных элементов на изменение весовых характеристик корпусных конструкций;
6. разработка конструкции судовых перекрытий и их узлов с диагональными элементами набора.

Статья посвящена исследованию в рамках задач, оговоренных в пунктах 4 и 5, а именно — оценке влияния диагональных элементов набора на весовые характеристики бортового перекрытия при обеспечении его местной прочности в соответствии с положениями части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [2] (далее — Правила).

ВЫБОР СИСТЕМЫ НАБОРА БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ. РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ И ТРЕБУЕМЫЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЛОК РАМНОГО НАБОРА

Объектом исследования является бортовое перекрытие условного судна с поперечной системой набора с заданными размерениями и характеристиками, соответствующими 1.1.1.1 Правил (здесь и далее приводятся ссылки на соответствующие пункты Правил [2]): длина $L = 120$ м; ширина $B = 18$ м; высота борта $D = 10$ м; осадка $d = 7,5$ м; спецификационная скорость $v_o = 16$ уз. Район плавания — неограниченный.

В соответствии с 1.1.3 нормальная шпация $a_0 = 0,002L + 0,48$ м; в качестве расчетной принята шпация $a = 0,7$ м. Материал корпуса — сталь с расчетными нормативными пределами текучести по нормальным напряжениям $\sigma_n = 235$ МПа и по касательным напряжениям $\tau_n = 0,57\sigma_n = 134$ МПа.

В соответствии с требованиями Правил определены расчетное внешнее давление со стороны моря на бортовое перекрытие в средней части судна и соответствующие размеры балок его набора без диагональных элементов и при наличии последних. В принципе возможны три варианта использования диагональных элементов набора:

1. на уровне основного набора — балок главного направления;
2. на уровне рамного набора;
3. одновременно на обоих уровнях.

Очевидно, что установка диагональных элементов в каждой шпации основного набора влечет за собой неоправданные конструктивно-технологические трудности и многократное увеличение трудоемкости изготовления конструкции и, следовательно, стоимости. Наиболее приемлемой представляется установка только рамных диагональных элементов. На рис. 1 показаны схемы возможных вариантов установки рамных диагональных элементов бортового перекрытия.

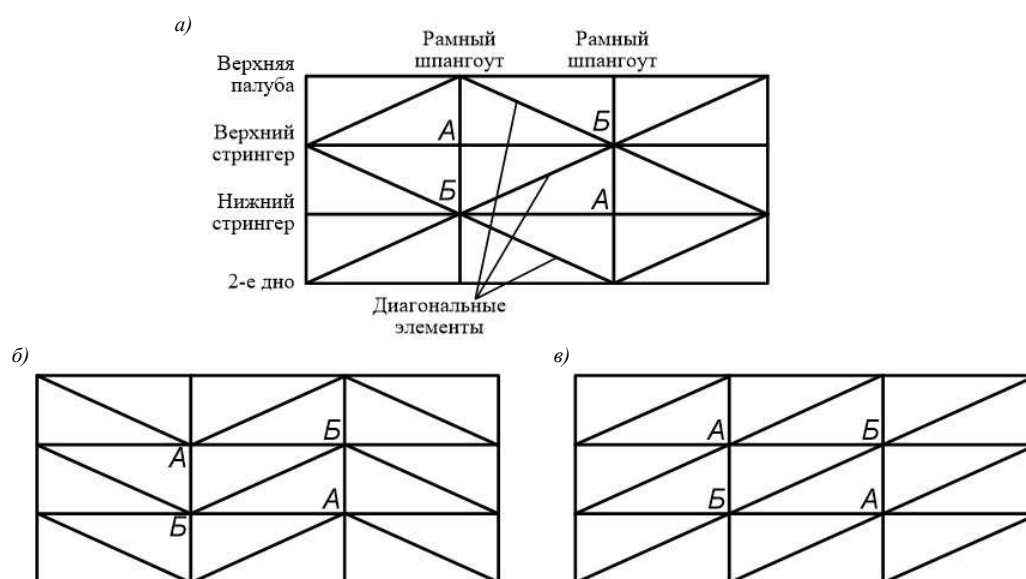


Рис. 1 Варианты установки диагональных элементов бортового перекрытия:
А и *Б* — узлы пересечения балок рамного набора

Рамный набор перекрытия, ограниченного в продольном направлении поперечными переборками, а в вертикальном — верхней палубой и вторым дном, кроме диагональных элементов включает два бортовых стрингера и два рамных шпангоута. Ранее была разработана конструкция узла соединения рамных связей при наличии диагональных элементов, защищенная патентом на изобретение [3], которая приведена на рис. 2. Некоторые результаты исследования прочности этого узла приведены в упомянутой выше работе [1].

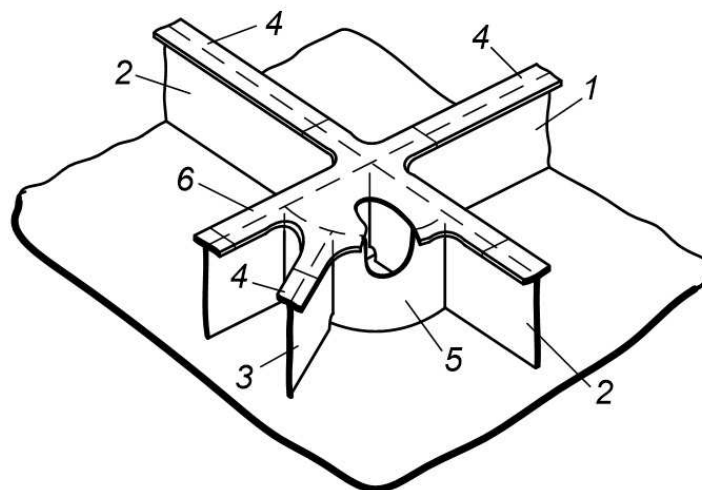


Рис. 2 Конструкция узла пересечения рамных балок с диагональным элементом:
1 — стенка неразрезной балки; *2* — части стенки разрезной балки; *3* — стенка диагональной балки;
4 — свободные пояски балок; *5* — цилиндрическая вставка; *6* — фигурная крестовина [3]

Схема установки диагональных элементов, представленная на рис. 1а, имеет два недостатка:

1. сосредоточение большого количества расположенных близко друг к другу сварных швов в узлах *В* приведет к большим сварочным напряжениям в локальной области перекрытия, что отрицательно скажется на прочности;

2. имеет место неоднородность напряженного состояния частей поля перекрытия (районы узлов *А* по сравнению с районами узлов *В*).

При движении судна крутящий момент будет периодически (на регулярном волнении) или случайным образом (на нерегулярном волнении) менять направление. При этом все диагональные элементы перекрытия при установке в соответствии с рис. 1б, будут поочередно работать либо на растяжение, либо на сжатие. В случае, когда все диагональные элементы перекрытия одновременно сжаты, возрастает опасность потери устойчивости.

Названных недостатков лишена схема установки диагональных элементов, показанная на рис. 2б, принятая далее в качестве расчетной (см. рис. 3).

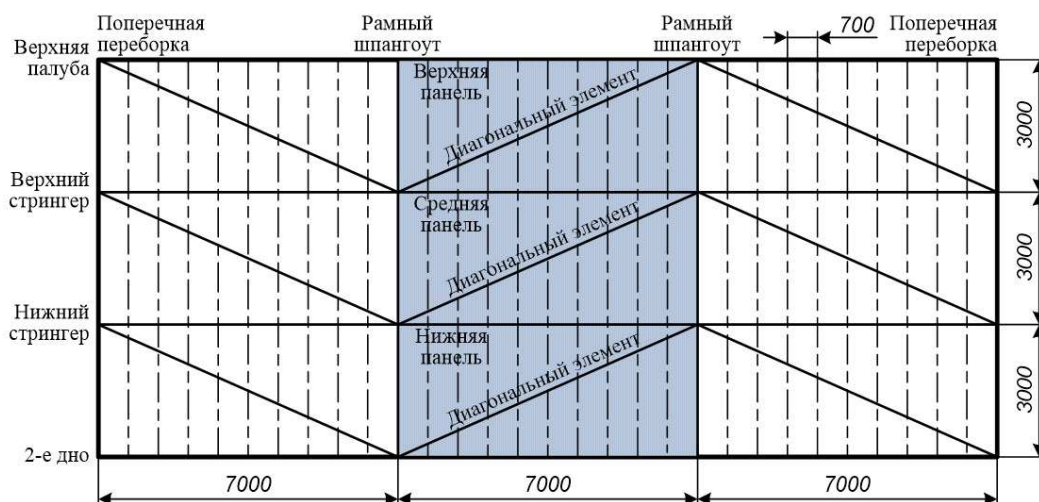


Рис. 3 Расчетная схема набора бортового перекрытия с диагональными элементами

В силу того, что три части перекрытия между рамными шпангоутами и рамными шпангоутами и переборками конструктивно идентичны, расчеты выполнены для трети перекрытия, выделенной на рис. 3 цветом. Эта часть перекрытия делится бортовыми стрингерами на три панели — верхнюю, среднюю и нижнюю. Каждая панель включает обшивку, балки основного набора (обыкновенные шпангоуты) и соответствующий диагональный элемент. Кроме того, к средней панели отнесен верхний стрингер, а к нижней — нижний стрингер.

Как уже говорилось выше, при введении в набор диагональных рамных элементов с одной стороны увеличивается вес перекрытия, а с другой стороны уменьшаются пролеты балок основного набора, что дает возможность уменьшить их сечение и, следовательно, вес. Кроме того, за счет перераспределения нагрузки на диагональные элементы уменьшаются размеры сечения и вес бортовых стрингеров.

Целью выполненных расчетов является сравнительная оценка изменения веса бортового перекрытия при введении в его конструкцию диагональных элементов набора. При выполнении расчетов приняты следующие допущения.

1. Строго говоря, при введении в конструкцию диагональных элементов меняется соотношение размеров — длины и ширины — минимального листового элемента обшивки, что в соответствии с расчетными зависимостями, приведенными в Правилах, повлечет за собой изменение толщины обшивки. При этом для разных шпаций указанное соотношение будет разным и, следовательно, различной получится расчетная толщина. Однако, поскольку по длине пояса обшивки ее толщина не может меняться от шпации к шпации и эта толщина в конце концов определялась требованиями Правил к минимальной толщине, не зависящей от размеров минимального листового элемента обшивки, ограниченного основным набором, для всех вариантов в пределах каждой из трех названных панелей перекрытия принята одинаковая толщина обшивки, рассчитанная при отсутствии диагональных элементов.

2. С целью упрощения расчета для части перекрытия между двумя рамными шпангоутами эти шпангоуты в первом приближении считаются абсолютно жесткими.

3. Диагональные элементы набора рассчитываются по той же методике, которая предписана Правилами для бортовых стрингеров. В качестве расчетного давления принято давление, действующее на уровне середины пролета связи, т.е. так же, как это предписано Правилами для шпангоутов.

4. Балки основного набора жестко заделаны на бортовых стрингерах и диагональных элементах, а они, в свою очередь, в соответствии с допущением 2, могут считаться жестко заделанными на рамных шпангоутах.

5. В сравнительных расчетах прочностных и весовых характеристик балок набора не учитывались предписанные Правилами поправки на износ.

Расчетное суммарное давление на бортовое перекрытие с учетом статической и волновой составляющих рассчитано в соответствии с 1.3.2.1 и 1.3.2.2 с учетом 1.3.1.4 Правил. Графическая интерпретация закона распределения расчетного суммарного давления по высоте бортового перекрытия приведена на рис. 4. Указаны давления на верхней и нижней кромках всех трех панелей, а также давления на половине их высот. В пределах верхней панели эпюра давлений представлена ломаной линией. Штриховой линией показана эквивалентная эпюра площади, равной площади исходной эпюры, и соответствующее значение давления на половине высоты.

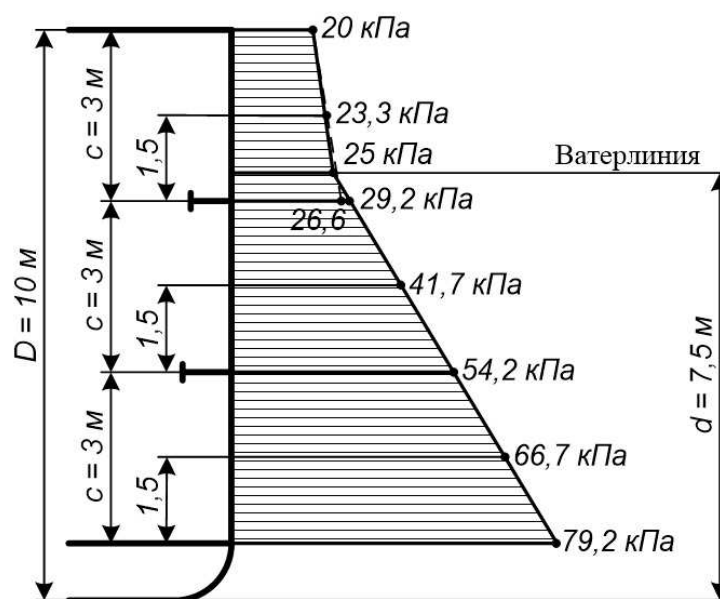


Рис. 4 Распределение суммарного расчетного давления по высоте борта

Толщина обшивки борта для каждой из трех панелей, определена в соответствии с 2.2.4.1 по формуле (1.6.4.4) при расчетных давлениях на нижней кромке пластин. При этом учтены требования 2.2.4.8, касающиеся минимально допустимых толщин. Толщина обшивки, практически не зависящая от наличия диагональных связей, определена для конструктивного варианта без диагональных элементов и использована для обоих конструктивных вариантов. В результате толщины обшивки составили для верхней и средней панелей $s = 10$ мм, а для нижней панели $s = 11$ мм.

В соответствии с 2.5.4.4 требуемый Правилами момент сопротивления сечения бортовых стрингеров без учета запаса на износ должен быть не менее определяемого по формуле (1.6.4.1), а минимальная площадь сечения стенки стрингера за вычетом выреза для прохода балок основного набора определяется выражением (1.6.4.3). При этом варьируемыми по высоте перекрытия параметрами, входящими в расчетные формулы, являются расчетное давление p и коэффициент допускаемых напряжений k_{σ} . Расчет выполнен для исходного перекрытия без диагональных элементов; расчетная схема части перекрытия приведена на рис. 5а. Цветом выделены полосы обшивки, которые передают нагрузку со стороны моря на каждую связь и ширина которых s служит базовым размером для определения ширины присоединенных пояска обшивки рамных связей s_{π} .

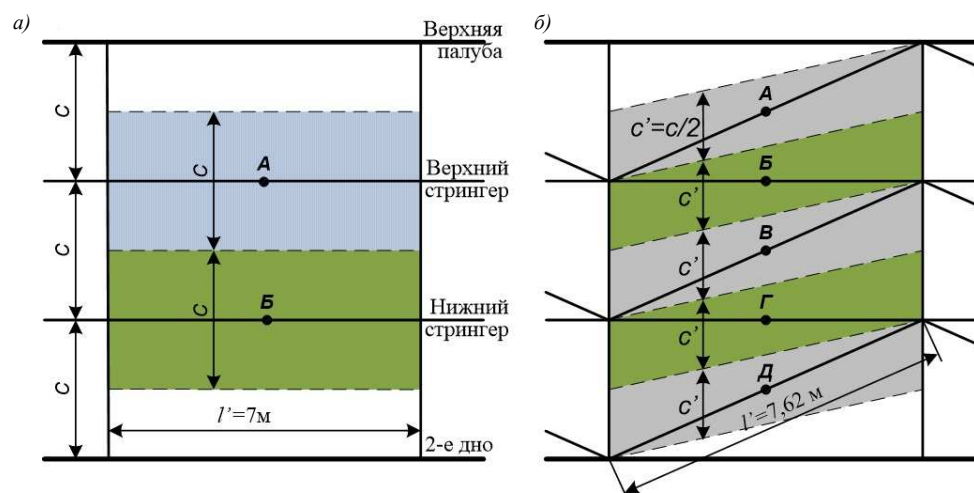


Рис. 5 К определению ширины c пояса обшивки, приходящегося на рассматриваемую связь:
 а) — перекрытие без диагональных элементов; б) — то же при наличии диагональных элементов;
 А — Д — точки, на уровне которых определяется расчетное давление для соответствующих связей

Для перекрытия с диагональными элементами расчет требуемых моментов сопротивления и площадей сечения стенок выполнен по тем же формулам, что и для бортовых стрингеров. При этом следует иметь в виду появление неизбежных погрешностей, так как формулы для определения размеров, приведенные в правилах, опираются на классические системы набора, как и подходы из правил для расчета ширины присоединенного пояса и для определения нагрузки на рамные балки. Очевидна необходимость разработки методики расчета размеров связей судовых перекрытий с диагональными элементами набора. Разумеется, обоснованность примененного в статье подхода к определению размеров рамных связей при такой нестандартной системе набора нуждается в подтверждении, а погрешность, возникающая в таких расчетах — в оценке. Однако в силу ограниченного объема статьи такого рода исследование в ее рамках не выполнялось в предположении, что возможные погрешности принципиально не повлияют на полученные результаты.

Расчетная схема бортового перекрытия с диагональными элементами приведена на рис. 5б. Видно, что ширины полос обшивки, приходящихся на каждую балку, уменьшилась в 2 раза по сравнению с перекрытием без диагональных элементов, а кромки этих полос не параллельны поддерживающей их связи. Кроме того, для диагональных элементов при определении сил Q и $N_{\max}$, входящих в расчетные формулы для W и $f_{\max}$, принимается длина $l = 7$ м, равная расстоянию между рамными шпангоутами, а при вычислении W — фактическая длина связи $l' = 7,62$ м. Это обусловлено тем, что произведение $(a \cdot l)$, входящее в формулы для расчета Q и $N_{\max}$, определяет площадь полосы обшивки, приходящейся на рассчитываемый диагональный элемент, а в формуле для вычисления W учитывается пролет связи l' . Расчет требуемых геометрических характеристик сечений бортовых стрингеров и диагональных элементов для обоих конструктивных вариантов бортового перекрытия (рис. 5а и б) выполнен в табл. 1.

Определение конструктивных размеров стенок и свободных поясков сварных рамных связей возможно только после выбора размеров балок основного набора, т.к. от них зависят размеры вырезов в стенках рамных балок, которые, в свою очередь, регламентируют минимальную высоту этих стенок.

Таблица 1

Требуемые характеристики бортовых стрингеров и диагональных элементов

Рамная связь		l , м	p , кПа	k_{σ}	Q , кН	W , см ³	$N_{\max}$, кН	$f_{\min}$, см ²
Без ДЭ	Верхний стрингер	7	29,2	0,57	613	1780	307	35,3
	Нижний стрингер	7	54,2	0,65	1136	2892	569	65,5
При наличии ДЭ**	Верхний диагональный элемент	7*/7,62*	23,3	0,51	258	911	129	16,0
	Верхний стрингер	7	29,2	0,57	307	891	153	17,7
	Средний диагональный элемент	7*/7,62*	41,7	0,63	438	1252	219	27,2
	Нижний стрингер	7	54,2	0,65	569	1449	285	32,8
	Нижний диагональный элемент	7*/7,62*	66,7	0,575	700	2193	350	43,5
*) $l=7$ м — при вычислении Q и $N_{\max}$; $l=7,62$ м — при вычислении W ; **) ДЭ — диагональный элемент.								

РАЗМЕРЫ И МАССЫ БАЛОК ОСНОВНОГО НАБОРА И БОРТОВЫХ СТРИНГЕРОВ ПЕРЕКРЫТИЯ БЕЗ ДИАГОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для сопоставления рассмотрены два варианта профилей основного набора — полособульб по ГОСТ 21937-76 и неравнополочный уголок по ГОСТ 8510-86. При принятой поперечной системе набора балками основного набора являются обыкновенные шпангоуты. Минимальные моменты сопротивления шпангоутов для каждой из трех панелей перекрытия определялись в соответствии с 2.5.4.2 по формуле (1.6.4.1) без учета запаса на коррозию. Пролет балок равен расстоянию между бортовыми стрингерами или расстоянию между бортовыми стрингерами и верхней палубой или вторым дном. Влияние на расчетный пролет шпангоутов характера их закрепления (наличие книц) не учитывалось, т.к. в рамках решаемой задачи не было необходимости в детальной разработке конструкции перекрытия. Во всех случаях расчетный пролет $l=3$ м (см. рис. 3). В качестве расчетного давления принято давление на середине пролетов шпангоутов (см. рис. 4). В соответствии с 1.6.3.3 ширина присоединенного пояска обшивки для балок основного набора принята $a_{\text{п}}=l/6=3/6=0,5$ м, что меньше шпации.

В результате расчетов минимальные требуемые моменты сопротивления шпангоутов составили:

- для верхней панели $W=94,9$ см³;
- для средней панели $W=172$ см³;
- для нижней панели $W=268$ см³.

Этим моментам сопротивления с учетом присоединенных поясков обшивки удовлетворяют полособульбы 14а, 18а и 20б или неравнополочные уголки 125 × 80 × 7, 140 × 90 × 10 и 180 × 110 × 11 соответственно.

Процедура определения конструктивных размеров стенок и свободных поясков сварных тавровых балок бортовых стрингеров начиналась с определения размеров поперечных сечений стенок, которые одновременно должны удовлетворять двум условиям: площадь сечения стенки за вычетом вырезов должна быть не менее оговоренной Правилами (см. табл. 1), а ее высота должна быть не менее двукратной высоты вырезов и в сочетании со свободным пояском и присоединенным пояском обшивки должна обеспечивать требуемый Правилами момент сопротивления (см. табл. 1). Кроме того, соотношения размеров сечений элементов составного профиля должны быть по возможности оптимальными с точки зрения обеспечения минимального веса при достаточной прочности. Для этого в качестве ориентировочных были использованы соотношения размеров элементов сечений двутавровых профилей по ГОСТ 8239-86.

Полную высоту стенки можно представить в виде суммы

$$h = h' + h'', \quad (1)$$

где h' — высота выреза в стенке для прохода балок основного набора; принята равной высоте профиля балки основного набора плюс 10 мм;
 $h''=f_{\min}/s$ — высота части стенки над вырезом;
 $f_{\min}$ — требуемая Правилами минимальная площадь сечения стенки за вычетом выреза;
 s — толщина стенки.

Для двутавров большого размера (№ 45 — 70) отношение толщины стенки к ее высоте практически постоянно $\beta = s/h \approx 0,02$. Откуда можно принять $h = s/\beta$. Выполнив подстановки, запишем:

$$s/\beta = h' + f_{\min}/s,$$

или после алгебраических преобразований:

$$s^2 - h'\beta d - \beta f_{\min} = 0. \quad (2)$$

Толщина стенки определяется корнем полученного квадратного уравнения (2), т.е.:

$$s = h'\beta/2 + \sqrt{(h'\beta/2)^2 + \beta f_{\min}} = 0,01h' + \sqrt{(0,01h')^2 + 0,02f_{\min}}.$$

В силу малости первого слагаемого под корнем по сравнению со вторым с погрешностью порядка 1 — 2 % можно окончательно записать

$$s = 0,01h' + \sqrt{0,02f_{\min}}. \quad (3)$$

Далее определялась высота части стенки над вырезом h'' , которая должна быть не менее h' , и полная высота стенки по формуле (1). Следует иметь в виду, что полученная таким образом высота стенки является ориентировочной и при неприемлемой по конструктивным соображениям величине она может быть скорректирована путем увеличения толщины стенки при неизменной $f_{\min}$, однако это будет сопровождаться увеличением массы конструкции.

Ширина присоединенного пояска обшивки для балок рамного набора определялась в соответствии с 1.6.3.4.

При полученных размерах сечений стенки и присоединенного пояска обшивки, варьированием размеров свободного пояска, определяется их величина, обеспечивающая требуемый момент сопротивления сечения стрингера. В табл. 2 приведены размеры и массы балок основного набора двух профилей и бортовых стрингеров для бортового перекрытия без диагональных элементов (см. рис. 5а).

Массы балок набора определялась без учета присоединенных поясков обшивки.

Таблица 2

Расчетные размеры и массы балок основного набора двух профилей и бортовых стрингеров для бортового перекрытия без диагональных элементов (рис. 5а)

Часть борта	Элементы набора перекрытия		$W_{\text{Тр}}/W_{\text{Ф}}^*$	f_{min} , см ²	Масса, кг
Верхняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора  № 14a	102/99,4	—	300
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора  125 × 80 × 7	102/102	—	297
Средняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора  № 18a	172/187	—	470
		Бортовой стрингер (верхний)  $\frac{143 \times 12}{543 \times 10}$ 1430 × 10	1780/1783	35,3	400
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора  140 × 90 × 10	172/171	—	473
		Бортовой стрингер (верхний)  $\frac{150 \times 14}{503 \times 10}$ 1430 × 10	1780/1780	35,3	399
Нижняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора  № 20б	268/277	—	664
		Бортовой стрингер (нижний)  $\frac{110 \times 12}{736 \times 12}$ 1430 × 10,5	2892/2931	65,5	588
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора  180 × 110 × 10	268/278	—	599
		Бортовой стрингер (нижний)  $\frac{120 \times 12}{736 \times 12}$ 1430 × 10,5	2892/2892	65,5	575
Суммарная масса набора m_{Σ} , кг		Балки основного набора из полособульба			2422
		Балки основного набора из неравнополочного уголка			2343
*) Требуемый/фактический моменты сопротивлений сечений балок.					

РАЗМЕРЫ И МАССА БАЛОК ОСНОВНОГО НАБОРА И РАМНЫХ СВЯЗЕЙ ПЕРЕКРЫТИЯ С ДИАГОНАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Процедура определения размеров балок основного набора и рамных связей для перекрытия с диагональными элементами, схема части которого приведена на рис. 5б, аналогична процедуре, представленной в предыдущем разделе. Однако есть отличие, состоящее в том, что расчетные пролеты балок основного набора, пересекаемого диагональным элементом, на котором они, как и на бортовых стрингерах, жестко закреплены, меняются по длине панели перекрытия (см. рис. 6).

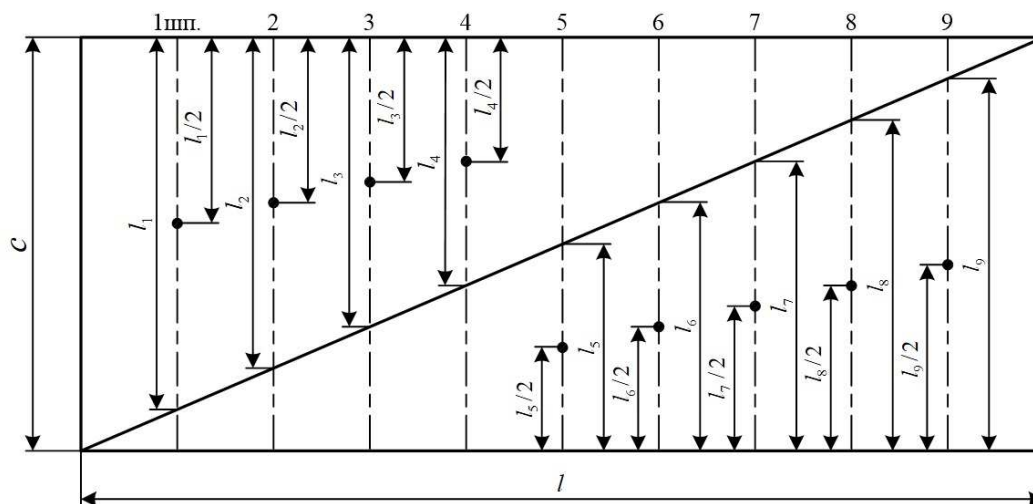


Рис. 6 Определение пролетов балок основного набора и точки, на уровне которых определяется расчетное давление

Одновременно от балки к балке меняется величина расчетного давления, которое определяется в точках, расположенных в середине пролетов. Более того, если длины расчетных пролетов по длине панели перекрытия распределены симметрично относительно средней балки, т.е. $l_1 = l_9$, $l_2 = l_8$ и т.д., то расчетные давления оказываются различными для всех балок набора. В результате требуемые минимальные моменты сопротивления для всех балок основного набора также оказываются различными.

Балки основного набора делятся диагональным элементом на две неравные по длине части, за исключением средней балки 5 (см. рис. 6). Так как в пределах каждой из трех панелей сечение балок основного набора постоянно, момент сопротивления их сечений определяется по большей для данной балки величине, во всех случаях соответствующей большей части длины пролета.

Кроме того, для балок основного набора вследствие изменения пролетов изменилась ширина присоединенных поясков обшивки ($a_{ni} = l_i/6$), а для балок рамного набора на 20 % уменьшилась ширина присоединенных поясков обшивки и вдвое уменьшилась ширина полос обшивки, через которые передается давление и, следовательно, в такой же мере суммарная нагрузка.

В табл. 3 приведены размеры и массы балок основного набора двух профилей, а также бортовых стрингеров и диагональных элементов для бортового перекрытия с диагональными элементами (см. рис. 5б).

Таблица 3

Расчетные размеры и массы балок основного набора двух профилей и балок рамного набора для бортового перекрытия с диагональными элементами (рис. 5б)

Часть борта	Элементы набора перекрытия		$W_{\text{Тр}}/W_{\Phi}^*$	f_{min} , см ²	Масса, кг
Верхняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора  № 14а-9	111/110	—	219
		Диагональная рамная связь  $\frac{148 \times 12}{350 \times 8}$ $\frac{1190 \times 11}{1190 \times 11}$	911/912	16	277
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора  110 × 70 × 7 — 80 × 50 × 6	89,5/86,8	—	216
		Диагональная рамная связь  $\frac{160 \times 12}{335 \times 8}$ $\frac{1190 \times 11}{1190 \times 11}$	911/909	16	264
Средняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора  № 16а-12	135/138	—	319
		Бортовой стрингер (верхний)  $\frac{132 \times 10}{381 \times 9}$ $\frac{1190 \times 10}{1190 \times 10}$	891/893	17,7	266
		Диагональная рамная связь  $\frac{138 \times 10}{472 \times 9}$ $\frac{1190 \times 10}{1190 \times 10}$	1252/1259	27,1	343
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора  125 × 80 × 10 — 100 × 63 × 6	144/135	—	299
		Бортовой стрингер (верхний)  $\frac{135 \times 12}{346 \times 9}$ $\frac{1190 \times 10}{1190 \times 10}$	891/891	17,7	265
		Диагональная рамная связь  $\frac{144 \times 12}{437 \times 9}$ $\frac{1190 \times 10}{1190 \times 10}$	1252/1251	27,1	345
Нижняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора  № 18б-14а	214/206	—	418
		Бортовой стрингер (нижний)  $\frac{115 \times 10}{535 \times 10}$ $\frac{1190 \times 10,5}{1190 \times 10,5}$	1449/1450	32,8	364
		Диагональная рамная связь  $\frac{160 \times 12}{479 \times 9}$ $\frac{1190 \times 10,5}{1190 \times 10,5}$	2194/2176	43,5	509
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора  160 × 100 × 10 — 110 × 70 × 7	214/206	—	409
		Бортовой стрингер (нижний)  $\frac{132 \times 10}{515 \times 10}$ $\frac{1190 \times 10,5}{1190 \times 10,5}$	1449/1449	32,8	362
		Диагональная рамная связь  $\frac{180 \times 12}{565 \times 11}$ $\frac{1190 \times 10,5}{1190 \times 10,5}$	2194/2199	43,5	511
Суммарная масса набора m_{Σ} , кг		Балки основного набора из полособульба			2715
		Балки основного набора из неравнополочного уголка			2671

УНИФИКАЦИЯ БАЛОК ОСНОВНОГО НАБОРА ПО РАЗМЕРАМ ПРОФИЛЕЙ

Для бортового перекрытия с диагональными элементами в результате расчета по Правилам требуемых характеристик балок основного набора и подбора для них двух типов профилей (полособульбов и неравнополочных уголков), соответствующих размеров, около половины из 9 балок по указанным выше причинам имеют разные размеры сечений. При этом имеют место от 4 до 6 типоразмеров профилей по их высоте. Изготовление перекрытия с таким набором противоречит требованиям по унификации размеров балок, однако такой их комплект соответствует минимальной массе основного набора.

Были выполнены расчеты по оценке влияния степени унификации балок основного набора на их массу. При этом предполагалось симметричное относительно середины длины панели перекрытия l расположение одинаковых по размеру балок. В рассматриваемом примере с девятью балками основного набора ось симметрии совпадает с балкой 5 (см. рис. 6). Рассмотрено несколько вариантов унификации.

1. Все балки имеют одинаковые сечения, соответствующие сечению балки с наибольшими из 9 балок размерами — 1 типоразмер.

2. Все балки разделены по размерам сечений на 2 группы. Балки в группе имеют одинаковые сечения, соответствующие сечению балки с наибольшими из балок группы размерами — 2 типоразмера. В данном случае при общем количестве балок, равном 9, возможны 4 различные комбинации по количеству балок в группах. Для каждой комбинации была определена суммарная масса балок и окончательно был выбран вариант с наименьшей массой.

3. Аналогично для случая, когда все балки разделены на 3 группы — 3 типоразмера. В данном случае возможны 6 различных комбинаций, из которых также была выбрана комбинация балок с минимальной массой.

В табл. 4 и 5 в качестве примера приведены результаты расчетов и их графическая интерпретация, соответственно, для основного набора нижней панели перекрытия.

Таблица 4

**Варианты комбинаций основного набора нижней панели бортового перекрытия
при различных уровнях унификации профилей балок**

Варианты основного набора		Основной набор из полособульба по ГОСТ 21937-76	Масса, кг	Основной набор из неравнополочного уголка по ГОСТ 8510-86	Масса, кг
Без диагонального элемента	1 типоразмер	20б	664	180 × 110 × 11	599
При наличии диагонального элемента	По расчету при мини- мальном весе	5 типоразмеров 18б, 18а, 16а, 14а, 14а, 14б, 16а, 18а, 18б	418	6 типоразмеров 160 × 100 × 10, 140 × 90 × 10, 125 × 80 × 10, 110 × 70 × 10, 110 × 70 × 7, 125 × 80 × 7, 125 × 80 × 10, 140 × 90 × 10, 160 × 100 × 10	409
	Унифици- рованные	3 типоразмера 2-18б, 2-16а, 1-14а, 2-16а, 2-18б	447	1-160 × 100 × 10, 2-140 × 90 × 10, 3-125 × 80 × 7, 2-140 × 90 × 10, 1-160 × 100 × 10	428
		2 типоразмера 2-18б, 5-16а, 2-18б	456	3-160 × 100 × 10, 3-125 × 80 × 7, 3-160 × 100 × 10	455
		1 типоразмер 18б	551	160 × 100 × 10	535

Таблица 5

**Варианты комбинаций основного набора нижней панели бортового перекрытия
при различных уровнях унификации профилей балок (графическая интерпретация)**

Варианты основного набора		Основной набор из полособульба по ГОСТ 21937-76	Основной набор из неравнополочного уголка по ГОСТ 8510-86
Без диагональных элементов	1 типоразмер		
При наличии диагонального элемента	По расчету при мини- мальном весе		
	Унифици- рованные	3 типоразмера 	
		2 типоразмера 	
		1 типоразмер 	

На рис. 7 представлены диаграммы характеризующие соотношения суммарных масс всего набора трех панелей части перекрытия между двумя рамными шпангоутами. Массы всего перекрытия могут быть получены умножением на 3, что не изменит их соотношений.

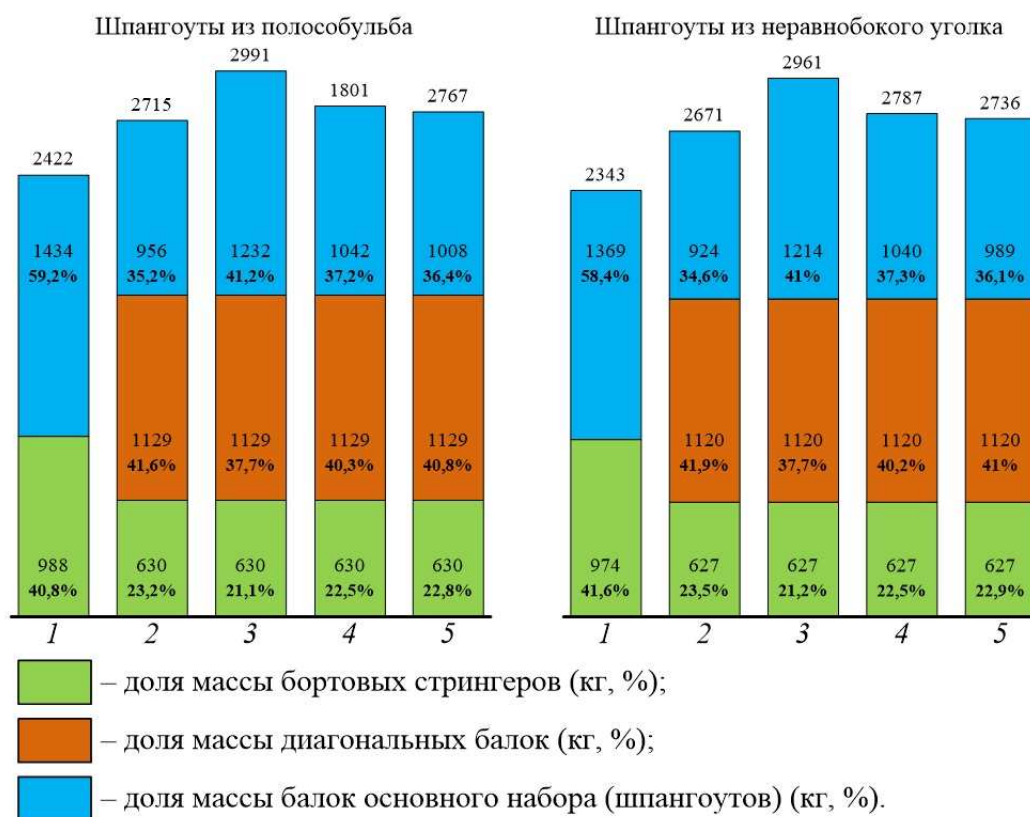


Рис. 7 Соотношение масс элементов набора бортового перекрытия, содержащего диагональные рамные связи, при различных вариантах унификации размеров балок основного набора:
 1 — перекрытие без диагональных связей; 2, 3, 4, 5 — перекрытия с диагональными связями без унификации набора (2), при одном (3), двух (4) и трех (5) типоразмерах балок основного набора

Диаграммы построены для двух типов профилей основного набора. Представлены диаграммы для исходного перекрытия без диагональных элементов, а также для перекрытия с диагональными элементами для варианта неунифицированного основного набора и трех рассмотренных вариантов его унификации.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Сопоставление полученных размеров и весовых характеристик набора бортового перекрытия традиционной конструкции и такого же перекрытия с диагональными элементами, представленных, соответственно, в табл. 2 — 5 и диаграммой на рис. 7, дает возможность констатировать следующее.

Суммарные расчетные массы набора части исходного перекрытия без диагональных элементов составили при основном наборе из полосоубльба и уголка соответственно 2422 кг и 2343 кг, а для такого же перекрытия с диагональными элементами — 2715 кг и 2671 кг, т.е. увеличились на 12,1 % и 14,0 % при том, что масса добавляемых диагональных элементов составляет 46,6 % и 47,8 % от масс набора исходного перекрытия.

Это связано с тем, что при установке диагональных элементов одновременно уменьшились массы бортовых стрингеров на 36,2 % и 35,6 %, а массы основного набора в неунифицированном варианте — на 33,3 % и 32,5 %. Два значения, как и ранее, соответствуют двум типам профилей балок основного набора.

Оказалось, что не только балки основного набора из неравнополочного уголка, но и соответствующие им рамные связи имеют меньшие массы, чем массы тех же элементов при использовании в качестве балок основного набора полосоубльбов, хотя последние считаются оптимальными для судового набора. Это можно объяснить двумя причинами.

1. В ГОСТ 21937-76 предусмотрены только два варианта толщин профилей полосоубльбов для каждого типоразмера, соответствующих индексам *a* и *б*. В то же время ГОСТ 8510-86 варьированием толщин

обеспечивает более мелкую градацию типоразмеров уголков (по 3 — 4 варианта толщины на один размер), что дает возможность подобрать профили с более близкими к требуемым параметрами.

2. Неравнополочные уголки при одинаковых с полособульбами моментах сопротивления имеют меньшие высоты профилей, что обеспечивает меньшие высоты стенок балок рамного набора и, как следствие, меньшие массы этих балок.

Следует также сказать несколько слов об унификации балок основного набора. В принципе конструкция перекрытия с регулярным набором из балок разных по размерам профилей, обеспечивающих минимальный вес конструкции, не представляется абсолютно недопустимой по каким-либо прагматическим соображениям. Риторический вопрос — если размеры сечений шпангоутов на разных уровнях по высоте борта могут быть разными, т.е. меняются вслед за изменением давления на борт, то почему они не могут меняться в горизонтальном направлении от балки к балке? Безусловное неприятие такой конструкции может быть обусловлено сложившимися представлениями и традициями, хотя ее изготовление при современном уровне развития технологии производства судовых сварных конструкций не вызовет серьезных затруднений.

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с диагональным элементом наблюдается снижение массы с увеличением числа групп унифицированных размеров балок. За базу сравнения принята масса неунифицированного набора, являющаяся минимально возможной (см. рис. 7). Если все балки одинакового сечения — 1 типоразмер, то их масса на 28,9 % и 31,4 % больше массы базового варианта. При двух типоразмерах превышение массы составляет 9,0 % и 12,6 %, а при трех — 5,4 % и 7,0 %. Первое значение соответствует балкам набора, изготовленным из полособульба, а второе — из неравнополочного уголка.

Подводя итог, можно сделать следующие выводы.

1. При использовании в составе набора перекрытий диагональных элементов наблюдается незначительное увеличение массы набора, некоторое усложнение конструкции и технологии изготовления перекрытия, что может быть вполне оправдано при существенном влиянии диагональных элементов на прочность и жесткость корпуса при кручении.

2. При установке диагональных элементов их масса добавляется к массе набора перекрытия, но одновременно снижается расчетная масса основного и рамного набора. В итоге наблюдается увеличение суммарной массы набора перекрытия на 12 — 14 %.

3. Масса всего набора перекрытия с балками основного набора, изготовленными из неравнополочного уголка, при прочих равных условиях меньше массы аналогичного перекрытия с основным набором из полособульба.

4. Унификации сечений балок основного набора по размерам во всех случаях ведет к увеличению их массы, но с увеличением числа типоразмеров масса уменьшается, стремясь к массе неунифицированного расчетного набора.

5. Размеры сечения диагональных элементов набора, основное назначение которых состоит в увеличении сопротивляемости корпуса судна кручению, но определенные из условия местной прочности, могут быть скорректированы в большую сторону при выполнении соответствующих расчетов на кручение.

Все расчеты выполнены для бортового перекрытия с поперечной системой набора. Необходимо выполнить аналогичный анализ для перекрытия с продольной системой набора, и рассмотреть возможность установки диагональных элементов в днищевом перекрытии.

Таким образом, с точки зрения местной прочности и при ожидаемых преимуществах в отношении прочности корпуса судна при кручении предложенная диагональная система набора (ДСН) представляется перспективной для использования в конструкциях корпусов судов с широким раскрытием палубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климов С.О., Аносов А.П. Исследование напряженного состояния узла соединения рамных балок набора, включающего диагональный элемент. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Специальный вып. 2: с. 43 — 48.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. — СПб, Российский морской регистр судоходства, 2022.
3. Узел соединения балок. Патент на изобретение № 2667203 / Д.И. Пантюшин, Д.В. Козырев, Н.И. Восковщук, А.П. Аносов. БИ № 15, 27.05.2015.

REFERENCES

1. Klimov S.O., Anosov A.P. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya uzla soedineniya ramnykh balok nabora, vklyuchayushchego diagonalny element* [Stressed state of webbed framing joints with diagonal element]. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2019. Special Issue 2. pp. 43 — 48.
2. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ship. Part II. Hull. — St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2022. (in Russian)
3. Connection unit of the beams. Patent for invention No. 2667203 / D.I. Pantyushin, D.V. Kozyrev, N.I. Voskovshchuk, A.P. Anosov. BI No. 15, 05/27/2015.

УДК 629.5:656.6

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ БЕЗОПАСНОСТИ БУКСИРОВКИ СУДНА ЛЕДОКОЛОМ МЕТОДОМ БУКСИРОВАНИЯ ВПЛОТНУЮ

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

В.Г. Арутюнян, ФГБУ «Главсевморпуть», Мурманск, e-mail: VIGArutyunyan@rosatom.ru

Буксировка «на усах» — сложнейшая морская операция. Недостаточное внимание к вопросу обеспечения безопасности может привести к временному выводу судна из эксплуатации, финансовым потерям, а также к серьезным логистическим сбоям на трассах Северного морского пути. Цель настоящего исследования — выработка единого подхода к оценке пригодности судна для буксировки «на усах». Акцент в работе сделан на суда в эксплуатации, ключевыми проблемами для которых являются ограниченное время на любые инженерные проработки, а также, зачастую, неполнота исходных данных. В результате сформулированы основные критерии безопасности, проверка по которым в рамках предварительного инженерного анализа позволит в короткие сроки обосновано сделать заключение о пригодности судна к буксировке «на усах» или дать соответствующие рекомендации по его модернизации.

Ключевые слова: буксировка судов во льдах, буксировка вплотную за ледоколом, буксировка «на усах», критерии безопасности, кранцевая защита ледокола, Северный морской путь, ледокол

ESSENTIAL SAFETY CRITERIA FOR SHIP CLOSE COUPLED TOWING BY AN ICEBREAKER

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

V.G. Arutyunyan, FSBI NSR General Administration, Murmansk, e-mail: VIGArutyunyan@rosatom.ru

Close coupled towing is a very difficult marine operation. Insufficient attention to the issue of safety may lead to the temporary lay-up of the ship, financial losses, as well as serious logistical failures along the Northern Sea Route. The purpose of this study is to develop a unified approach to assessing the suitability of a ship for close coupled towing. The emphasis in the work is on ships in operation, the key problems of which are the limited time for any engineering studies, and also, often, the incompleteness of the initial data. As a result, the main safety criteria have been formulated, the verification of which, within the framework of a preliminary engineering analysis, will help shortly draw a reasonable conclusion about the suitability of the ship for close coupled towing or give appropriate recommendations for its modernization.

Keywords: towing ships in ice, notch towing, close coupled towing, safety criteria, icebreaker fender protection, Northern Sea Route, icebreaker

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Указом Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» грузопоток по трассам Северного морского пути (далее — СМП) к 2024 году должен составить 80 млн т в год. Несмотря на то, что количественно данный целевой показатель может быть пересмотрен в сторону уменьшения [1, 2], динамика грузопотока в ближнесрочной перспективе останется положительной [3]. При этом очевидно, что в пределах двух лет увеличение грузопотока только за счет новых судов невозможно, а значит необходимо привлекать к работе суда, эксплуатирующиеся в других регионах, что уже происходит последние 5 лет. На вторичном рынке грузовых судов существует дефицит судов высоких ледовых классов (выше **Arc6**), способных к круглогодичному самостоятельному плаванию по СМП; большинство доступных к приобретению судов построены по правилам иностранных классификационных обществ и, в лучшем случае, имеют балтийский ледовый класс **IA Super**, а чаще — **IA**. Плавание судов данного ледового класса в средних и тяжелых ледовых условиях в акватории СМП возможно только под проводкой ледокола [4], причем длительность этого ограничения, исходя из многолетнего опыта ледокольных проводок ФГБУ «Главсевморпуть», может составлять до 6 мес — с декабря по май. В соответствии с Правилами плавания по СМП [4, п. 30] тип проводки судов определяется Штабом морских операций в зависимости от ледовой и гидрометеорологической обстановки на конкретном маршруте, ледового класса и технических характеристик судов. Наиболее распространенным и широко применяемым на практике типом проводки судов классов **Arc4**, **Arc5**, **IA** и **IA Super** в средних и тяжелых ледовых условиях является буксировка «вплотную» («на усах») (см. рис. 1).



Рис. 1 Буксировка судна «на усах» АЛК «Таймыр» (фото: АО «ЦНИИМФ»)

Данный тип буксировки является весьма сложным с точки зрения обеспечения безопасности, поэтому в советское время грузовые суда, предназначенные для работы в Арктике, проектировались с учетом особенностей этой операции: совместимость носовых обводов судов с кормовым вырезом ледокола с учетом осадок ледокола и судна, усиление носовой части судна в месте контакта с кормовым вырезом ледокола, битенги и кнехты специальной конструкции с соответствующим усилением палубы, учет водоизмещения судна в грузу относительно ледокола (например, СА-15 типа «Норильск», суда типа «Дмитрий Донской»). Иностранные же суда конструктивно и технически для такой операции не предназначены, о чем свидетельствует рост числа инцидентов, связанных с повреждениями носовых оконечностей, буксирного оборудования и т.п. (информация ФГБУ «Главсевморпуть»). Каждый подобный инцидент приводит к необходимости внепланового ремонта, который не всегда может быть осуществлен на СМП, и, как следствие, к временному выводу судна из эксплуатации. Это, в свою очередь, помимо финансовых потерь, может привести к серьезным логистическим сбоям и снижению общего темпа грузоперевозок по СМП. Для решения этой проблемы предлагается выработать единый подход к оценке пригодности судна для буксировки «на усах». Иными словами, для каждого судна, ранее не проводимого данным методом, выполнять предварительный инженерный анализ, учитывающий минимальные и достаточные критерии безопасности буксировки «на усах», которые будут рассмотрены далее¹.

¹Все приводимые в настоящей статье критерии применимы для случая, когда водоизмещение буксируемого судна сопоставимо или меньше водоизмещения ледокола. В противном случае анализ возможности буксировки «на усах» должен охватывать более широкий круг вопросов, а часть приведенных здесь критериев могут быть пересмотрены. Как правило, подобный анализ включает компьютерное моделирование движения тандема, оценку погодных условий, разработку специальных инструкций для экипажей и т.д.

1. ФОРМА НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ БУКСИРУЕМОГО СУДНА

Форма носовой оконечности — одна из самых важных характеристик судна, буксируемого «на усах», оказывающая существенное влияние на безопасность операции. Рассмотрению подлежат расстояние между носовой оконечностью судна и винто-рулевым комплексом (ВРК)/корпусом ледокола и зона контакта форштевня судна с кринолином ледокола.

1.1. Расстояние между носовой оконечностью судна и ВРК/корпусом ледокола должно быть таким, чтобы при всех предполагаемых в процессе буксировки осадках судна и ледокола была исключена возможность контакта подводной части корпуса судна с ВРК или корпусом ледокола. В первую очередь это актуально для судов с бульбообразной носовой оконечностью. На сегодняшний день в нормативной документации отсутствуют строгие и научно обоснованные ограничения этого расстояния, есть лишь рекомендации Руководства по применению Финско-шведских правил для судов ледового класса [5], в соответствии с которыми расстояние между корпусами судна и ледокола не должно быть менее 2,0 м при длине бульба не более 2,5 м (см. рис. 2).

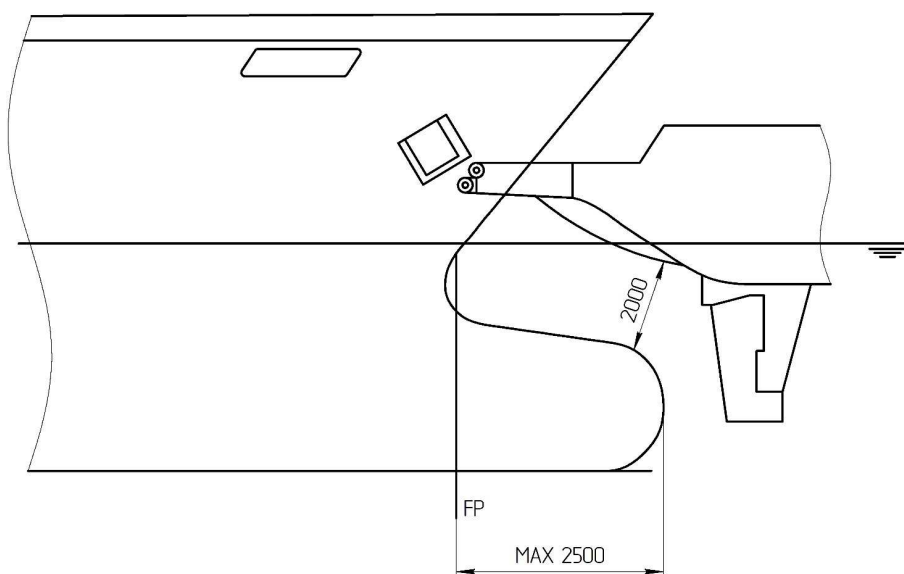


Рис. 2 Рекомендации [4] по минимальному расстоянию между корпусами судна и ледокола

По мнению сотрудников ФГБУ «Главсевморпуть» на данном этапе это расстояние вполне может быть использовано в качестве одного из критериев безопасности, однако со следующей оговоркой: поскольку ледовые условия Балтийского моря, для которого разрабатывалось Руководство [5], значительно легче, чем в арктических морях, необходимо дополнительно учесть последствия нестационарности движения тандема, вызванной, например, резким снижением хода (вплоть до остановки) при входе в гряды торосов. В таких случаях ледокол «набегает» на лед и наблюдается резкое увеличение дифферента на корму, а для судна — наоборот — возрастает дифферент на нос, в результате чего может произойти не только контакт между корпусами, но и между корпусом судна и ВРК ледокола, поэтому, в отличие от [5] необходимо нормировать это расстояние как минимальное между корпусом судна и корпусом / ВРК ледокола для всех возможных сочетаний осадок судна и ледокола. Ввиду описанной выше разницы между буксировкой в Балтийском море и арктических морях, можно предполагать, что величина 2,0 м уже назначена с неким запасом на непредвиденную ситуацию, однако для ее обоснованного учета предлагается отдельно выделять «неэксплуатационные» расчетные случаи и назначить для них минимальное расстояние 0,5 м.

1.2. Зона контакта носовой оконечности с кранцевой защитой ледокола должна обеспечивать надежное удержание форштевня в кринолине, не повреждая при этом элементы кранцевой защиты. На рис. 3 приведены примеры размещения в кринолине атомного ледокола (АЛК) проекта 22220 судов с различной остротой обводов.

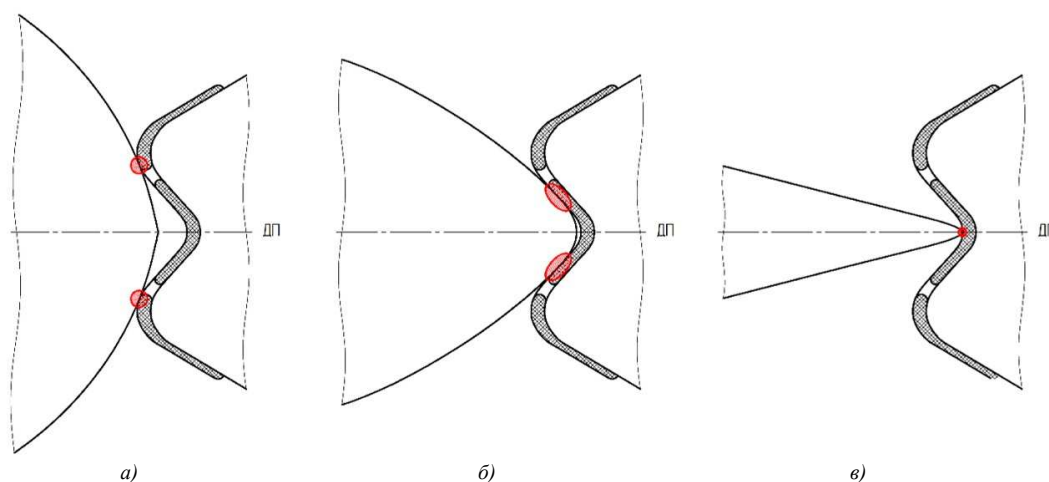


Рис. 3 Размещение судов с различной остротой обводов в кринолине АЛК проекта 22220. Красным цветом обозначены зоны (пятна) контактов

Очевидно, что показанная на рис. 3а, зона контакта будет недостаточной для надежного удержания судна в кринолине при маневрировании, а на рис. 3в — угол притыкания носовой ветви ватерлинии к ДП слишком острым, способным повредить элементы кранцевой защиты, поскольку все нагрузки на кринолин от буксируемого судна будут приходиться практически в точку. Рис. 3б, демонстрирует наилучшее сочетание формы носовой оконечности судна и кормового выреза ледокола. Таким образом, в качестве критерия безопасности может выступать диапазон углов α_0 , измеряемого на тех осадках, при которых предполагается буксировка

$$[\alpha_0^{\min}] \leq \alpha_0 \leq [\alpha_0^{\max}],$$

(1)

где α_0 — угол наклона расчетной ватерлинии, определяемый по аналогии с рис. 3.10.1.2.1-3 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов [6];

$[\alpha_0^{\min}]$ — минимальный допускаемый угол α_0 , менее которого возможно повреждение элементов кранцевой защиты ледокола;

$[\alpha_0^{\max}]$ — максимальный допускаемый угол α_0 , более которого возникает вероятность выхода носовой оконечности судна из кринолина ледокола.

Численные значения углов $[\alpha_0^{\min}]$ и $[\alpha_0^{\max}]$ должны определяться в зависимости от фактической формы кринолина конкретного ледокола.

2. ПРОЧНОСТЬ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ В РАЙОНЕ СТЫКОВКИ С КРИНОЛИНОМ

Одним из частых и наиболее серьезных по тяжести последствий инцидентов, происходящих при буксировке «на усах», является повреждение носовой оконечности буксируемого судна (см. рис. 4).

Причины, приводящие к таким повреждениям, можно разделить на две группы: судоводительские и конструктивные. Нормирование первой группы затруднительно, особенно в постоянно меняющихся условиях арктической навигации, поэтому главным способом их предотвращения является «хорошая морская практика» — термин, хоть и не имеющий строгого определения, но широко применяющийся в судоходстве. Таким образом, основной и достижимой задачей при подготовке судна к буксировке «на усах» является предотвращение повреждений, вызванных недостаточной прочностью конструкций носовой оконечности. При решении этой задачи основной трудностью является корректное определение нагрузок, вызванных динамическим взаимодействием буксируемого судна и ледокола. В работе [7] выполнен обзор существующих методик определения этих нагрузок, в результате которого установлено, что для целей оперативных расчетов прочности судов в эксплуатации наиболее оптимальной является методика А.М. Купермана [8]. В соответствии с данной методикой, величина усилия, действующего на кранцевую защиту ледокола, определяется следующим образом:

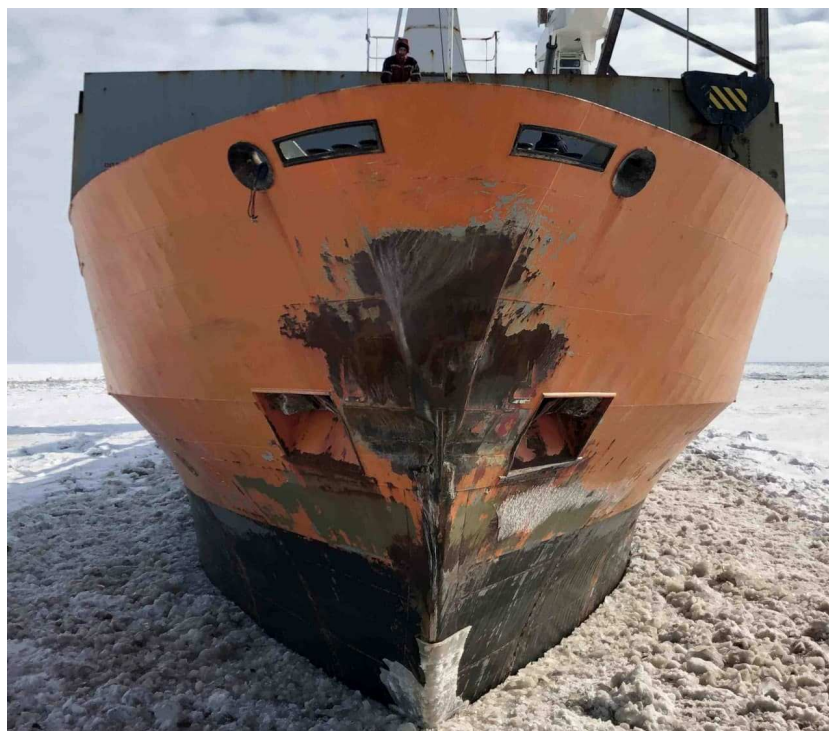


Рис. 4 Повреждение носовой оконечности судна в результате буксировки «на усах»
(фото: ФГБУ «Главсевморпуть»)

$$F = \ddot{x}m_2; \quad (2)$$

$$\ddot{x} = -1,31^3 \sqrt{(V_0 \sin \varphi / c)^2 \sigma_c \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi / m}; \quad (3)$$

$$c = \frac{\sin^2 \varphi}{1 + k_{11}} + \frac{\cos^2 \varphi}{1 + k_{33}} + \frac{\cos^2 \varphi}{0,28 \alpha_B (1 + k_{13})}, \quad (4)$$

где $m = m_1 + m_2$, m_1 , m_2 — массы ледокола и буксируемого судна соответственно;
 V_0 — скорость буксировки перед началом взаимодействия ледокола с торосом;
 φ , α — углы наклона форштевня и носовой ветви ватерлинии ледокола соответственно;
 σ_c — предел прочности льда на смятие;
 k_{11} , k_{33} , k_{13} — коэффициенты присоединенных масс воды;
 α_B — коэффициент полноты носовой ветви ватерлинии ледокола.

Поскольку формула (2) позволяет определить усилие, возникающее в кранцевом устройстве, для уточнения нагрузок, передаваемых на носовую оконечность буксируемого судна, необходимо ввести коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства кранцевой защиты, а также привести сосредоточенную нагрузку к распределенной по площади контакта. Таким образом, окончательное выражение для определения нагрузки на носовую оконечность буксируемого судна P_{CT} (индекс CT — от "close towing" — «буксировка вплотную») будет иметь вид

$$P_{CT} = \gamma_f \frac{F}{A_{CT}}, \quad (5)$$

где F — см. формулу (2);
 γ_f — демпфирующий коэффициент кранцевой защиты (индекс f — от "fender" — «кранец»), зависящий от материала кранцевой защиты и ее размеров;
 A_{CT} — площадь контакта носовой оконечности судна с кранцевой защитой.

Нагрузку, вычисленную по формуле (5), можно использовать в качестве расчетной при определении размеров конструкции носовой оконечности, обеспечивающих достаточную прочность. Для этих целей могут быть использованы зависимости раздела 1.6.4 части II «Корпус» [8], справочники по строительной механике корабля или прямые расчеты численными методами.

3. РАСПОЛОЖЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЯКОРНОГО УСТРОЙСТВА

По способу расположения якорей по-походному различают четыре типа носовых якорных устройств: с нормальными клюзами, с открытыми клюзами, с выступающими клюзами и с якорными нишами [9]. Для первых трех типов якоря в положении по-походному не должны создавать угрозу для кранцевой защиты ледокола, в том числе при маневрировании ледокола, когда изменение курса может достигать 20°. Рекомендуется нормировать минимальное расстояние от якоря до кранцевой защиты в зависимости от размеров якоря: не менее половины габаритной ширины якоря (в общем случае — расстояния между лапами). В противном случае на время буксировки якоря должны быть выбраны на палубу, при этом для судов с выступающими клюзами необходимо убедиться в достаточности их удаления от кранцевой защиты, а также в том, что они не будут препятствовать маневрированию ледокола и обеспечению разницы между курсовыми углами в 20°. Для судов с якорными нишами необходимо убедиться, что в положении по-походному якорь или выступающие элементы ниши не будут соприкасаться с криволинейной ледокола.

4. РАСПОЛОЖЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ БУКСИРНО-ШВАРТОВНЫХ УСТРОЙСТВ

Недостаточное внимание к элементам буксирно-швартовных устройств судна может привести как к повреждениям непосредственно этих устройств (см. рис. 5), так и корпуса судна и ледокола, а при наихудшем сценарии — к травмам экипажа.



Рис. 5 Оторванные в результате буксировки «на усах» кнехты
(фото: ООО «Севнор Менеджмент»)

При буксировке «на усах» на буксируемом судне может быть использован как собственный буксирный строп, так и строп, подаваемый с ледокола. В первом случае разрывная нагрузка буксирного стропа и несущая способность буксирных кнехтов, как правило, согласованы, во втором — кнехты буксируемого судна должны соответствовать минимальному разрывному усилию буксирного стропа ледокола, которое может быть различным на ледоколах разных проектов.

Центральный клюз на судне должен быть на 0,5 м выше кормового клюза ледокола. В любом случае, при этом буксирная линия не должна касаться вертолетной площадки ледокола при всех возможных в процессе буксировке осадках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает практика, в распоряжении судовладельцев не всегда есть запас времени, необходимый для выполнения углубленного инженерного анализа, и решение о выборе того или иного судна для работы на СМП может приниматься незадолго до самого рейса. Однако это обстоятельство не должно отрицательно влиять на безопасность ледокольной проводки судна, поскольку любые инциденты и внештатные ситуации способны привести как к локальным сбоям в транспортной системе СМП, так и к серьезным логистическим проблемам (например, когда ремонт требуется не проводимому судну, а ледоколу). Очевидно, что такие происшествия могут поставить под угрозу выполнение стратегических задач по увеличению грузопотока по СМП. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо предварительно оценить пригодность судна к эксплуатации в Арктике. И если в целом такая оценка выполняется в рамках анализа соответствия судна требованиям Полярного кодекса и освидетельствования для выдачи Свидетельства судна полярного плавания, то одна из важнейших составляющих такой эксплуатации — буксировка судна вплотную за ледоколом — до настоящего времени оставалась без должного внимания. Предложенный в настоящей статье подход содержит необходимые и достаточные критерии безопасности буксировки судна вплотную за ледоколом и может быть реализован в короткие сроки. Предварительная оценка соответствия судна этим критериям может способствовать повышению эффективности выбора судов для работы на СМП и надежности планирования деятельности всех участников процесса грузоперевозок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трутнев допустил снижение целей по загрузке Севморпути из майского указа//Группа компаний «РосБизнесКонсалтинг»: официальный сайт. 21.07.2020. URL: <https://www.rbc.ru/business/21/07/2020/5f16b1059a794726d980f231> (дата обращения: 29.11.2021).
2. «Росатом» предложил снизить на 25 % прогноз по объему грузов в Арктике//Группа компаний «РосБизнесКонсалтинг»: официальный сайт. 10.09.2020. URL: <https://www.rbc.ru/business/10/09/2020/5f589b189a794752254570fb> (дата обращения: 29.11.2021).
3. Грузопоток по СМП в 2024 году может достичь 60 млн тонн//Информационное агентство ТАСС: официальный сайт. 11.02.2021 г. URL: <https://tass.ru/ekonomika/10677863> (дата обращения: 29.11.2021).
4. Постановление Правительства РФ № 1487 от 18.09.2020 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути»//ФГБУ «Главсевморпуть»: официальный сайт. URL: <https://nsr.rosatom.ru/ofitsialnaya-informatsiya/pravila-plavaniya-v-akvatorii-severnogo-morskogo-puti/> (дата обращения: 07.03.2023).
5. Guidelines for the Application of the 2017 Finnish-Swedish Ice Class Rules. Finnish Transport and Communication Agency & Swedish Transport Agency. — 2019. — 47 с.
6. Петров А.А. Анализ методик определения нагрузок на носовую оконечность судна, буксируемого вплотную за ледоколом/А. А. Петров, М.С. Шилкина//Труды Крыловского государственного научного центра. Спец. выпуск 1. 2022. — с. 11 — 17.
7. Куперман, А.М. Кранцевые устройства морских судов//А.М. Куперман. — Л.: Судостроение, 1973. — 128 с.
8. Правила классификации и постройки морских судов, в 17 частях. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2021.
9. Гурович, А.Н. Справочник по судовым устройствам/А.Н. Гурович, В.И. Асиновский, Б.Н. Лозгачев, Д.А. Гринберг: в 2 т. — Л.: Судостроение, 1975. — Т. 1: Рулевые, якорные и швартовные устройства. — 352 с.

REFERENCES

1. *Trutnev dopustil snizhenie tseley po zagruzke Sevmorputi iz mayskogo ukaza* [Trutnev allowed for the reduction of targets for loading the Northern Sea Route from the May decree]. Webpage: <https://www.rbc.ru/business/21/07/2020/5f16b1059a794726d980f231> (accessed on: 29.11.2021).
2. *"Rosatom" predlozhit snizit' na 25 % prognoz po ob'emu gruzov v Arktike* [Rosatom has proposed to reduce by 25% the forecast for the volume of cargo in the Arctic]. Webpage: <https://www.rbc.ru/business/10/09/2020/5f589b189a794752254570fb> (accessed on: 29.11.2021).
3. *Gruzopotok po SMP v 2024 godu mozhet dostich' 60 mln tonn* [Cargo traffic on the NSR in 2024 may reach 60 million tons]. Webpage: <https://tass.ru/ekonomika/10677863> (accessed on: 29.11.2021).
4. *Postanovlenie Pravitelstva RF № 1487 ot 18.09.2020 "Ob utverzhdenii Pravil plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti"* [Decree of the RF Government No. 1487 dated 18.09.2020 "On approval of the Rules of navigation in the Northern Sea Route area"]/ФГБУ "Главсевморпуть" official webpage: <https://nsr.rosatom.ru/ofitsialnaya-informatsiya/pravila-plavaniya-v-akvatorii-severnogo-morskogo-puti/> (accessed on: 07.03.2023).
5. Guidelines for the Application of the 2017 Finnish-Swedish Ice Class Rules. Finnish Transport and Communication Agency & Swedish Transport Agency. — 2019. — 47 p.
6. Petrov A.A., Shilkina M.S. *Analiz metodik opredeleniya nagruzok na nosovuyu okonechnost sudna, buksiruemogo vplotnuyu za ledokolom* [Analysis of methods for determining loads on the bow end of a vessel towed close behind an icebreaker]. Transactions of the Krylov State Research Centre. Spec.issue 1, 2022, pp. 11 — 17.
7. Kuperman, A.M. *Krantsevyye ustroystva morskikh sudov* [Fender devices of marine vessels]. Leningrad, Sudostroenie, 1973. 128 p.
8. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, in 17 parts. Russian Maritime Register of Shipping, 2022. (In Russian)
9. Gurovich A.N., Asinovskiy V.I., Lozgagev B.N., Grinberg D.A. *Spravochnik po sudovym ustroystvam* [Guide of ship equipment]. Leningrad. Sudostroenie, 1975, Pt. 1, 352 p.

УДК 629.5.015

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В КОРПУСЕ СУДНА-ГАЗОВОЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА

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

Статья посвящена описанию и практическому применению аналитического метода расчета параметров теплового потока в корпусе и тепловой изоляции судна-газовоза. Рассматриваются суда, предназначенные для транспортировки сжиженного природного газа наливом. Числовые параметры, характеризующие тепловой поток, используют для определения интенсивности образования отпарного газа: газа, который испаряется с поверхности груза в процессе транспортировки, и определения расчетной температуры смежных с грузовой емкостью корпусных конструкций. В статье выполнены тестовые расчеты теплового потока для трех судов-газовозов. Два судна оборудованы мембранными емкостями общей грузоемкостью 361000 м³ и 172000 м³ соответственно. Третье тестовое судно оборудовано двумя емкостями типа С емкостью по 2900 м³. Выполнены расчеты для стандартных параметров окружающей среды в соответствии с требованиями отраслевых нормативных документов, проведена оценка адекватности полученных результатов и модели в целом. Выполнены количественные и качественные оценки влияния параметров окружающей среды на параметры теплового потока. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы при совершенствовании требований нормативных документов и разработке конструкции системы хранения сжиженного газа.

Ключевые слова: газозов, тепловой поток, отпарной газ, мембранная технология, емкость типа С

CALCULATION OF HEAT FLOW IN GAS CARRIER STRUCTURE BASED ON ANALYTICAL METHODS OF HEAT EXCHANGE THEORY

M.S. Boyko, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

The aims of the article is to describe and demonstrate the practical application of analytical heat flow calculation in ship hull and thermal insulation of liquefied gas carriers. Numerical parameters describing the heat flow are used to calculate the amount of boil-off gas evaporating from liquefied gas surface in tank. Also, such numerical parameters are used to define the design temperature of hull structures adjacent to gas containment system. The article gives the results of test heat flow calculations for three ships. Two of the ships are equipped with membrane containment system and have the total cargo capacity of 361000 m³ and 172000 m³, respectively. The third test ship is equipped with two type C tanks of 2900 m³ capacity each. The calculations corresponding to the standard environment conditions as per industry normative documents have been performed. Reliability of the results, as well as the mathematical model itself, has been checked. Case studies have been done to assess the influence of external conditions to heat flow parameters, both numerically and qualitatively. The results given in the article may be used to improve the requirements of normative documents, and in practical cargo containment system design.

Keywords: gas carrier, heat flow, boil-off gas, membrane technology, type C tank

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования в настоящей статье являются суда-газовозы, предназначенные для транспортировки сжиженного газа наливом. Характерной особенностью таких судов является низкая расчетная температура груза. Емкости для хранения сжиженного газа покрывают тепловой изоляцией, необходимой для того, чтобы обеспечить требуемый технологический режим транспортировки груза и не допустить снижение температуры корпусных конструкций ниже расчетного значения. Изоляцию изготавливают из материалов, которые характеризуются низкой способностью проводить тепло: пенополиуретан, стекловата, перлит, березовая фанера и т.п. [1, 2]. Несмотря на это, полностью исключить теплообмен между грузом и окружающей средой невозможно.

Предметом исследования в настоящей статье является тепловой поток в корпусе судна и тепловой изоляции. Тепловой поток характеризует интенсивность теплообмена между окружающей судно средой — воздушной и водной — и грузом в емкости. Величина теплового потока, Q , Вт, определяется с помощью основного уравнения теплопередачи [2, 3]:

$$Q = UA\Delta T, \quad (1)$$

где U — коэффициент теплопередачи (тепловое сопротивление), Вт/(м²с);
 A — площадь поверхности теплопередачи, м²;
 $\Delta T = T_1 - T_2$ — разность температуры теплоносителей, °С;
 T_1 и T_2 — значения температуры «горячей» и «холодной» среды, соответственно, °С.

Необходимость выполнения расчета теплового потока в корпусе судна-газовоза и тепловой изоляции емкости обозначена в требованиях Международного кодекса постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекса МКГ) [4]. Данный документ внедрен в нормативную базу Российского морского регистра судоходства (РС) [5], а также единообразно внедрен в документы других классификационных обществ.

В соответствии с требованиями Кодекса МКГ, результаты расчета теплового потока должны использоваться для решения следующих задач.

1. Выбор материала корпусных конструкций, прилегающих к грузовой емкости. В результате расчета теплового потока должна быть определена расчетная температура корпусных конструкций T_i .

2. Проектирование системы контроля давления и температуры груза при транспортировке. Величина суммарного теплового потока в емкость Q_Σ используется для определения интенсивности образования отпарного газа: газа, который испаряется с поверхности груза в процессе транспортировки.

Интенсивность образования отпарного газа характеризуется параметром BOR (от англ. "boil-off rate") и измеряется в процентах уменьшения объема груза в сутки по отношению к первоначальному объему. Величина BOR определяется по следующему выражению:

$$BOR = \frac{Q_\Sigma}{\rho \cdot V \cdot h_{vap}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ρ — плотность груза, кг/м³;
 V — первоначальный объем жидкого груза в емкости, м³;
 h_{vap} — теплота парообразования, Дж/кг.

Для сжиженного природного газа, который в настоящей статье рассматривается в качестве груза, принимается $\rho \cong 425$ кг/м³, $h_{vap} \cong 510$ кДж/кг.

Кодекс МКГ конкретизирует, при каких **стандартных условиях** должна быть определена величина суммарного теплового потока Q_Σ и величина расчетной температуры корпусных конструкций. Данные условия представлены в табл. 1. Кодексом МКГ допускается изменять стандартные внешние условия расчета. Например, при определении температуры конструкций могут учитываться низкие значения T_{air} для судов, эксплуатирующихся длительное время в условиях низкой температуры. При определении Q_Σ также допускается изменять стандартные значения T_{air} и T_{water} в зависимости от района эксплуатации судна. Во всех указанных выше случаях Кодекс МКГ не требует учитывать влияние ветра и течения.

Таблица 1

Стандартные условия расчета теплового потока в соответствии с Кодексом МКГ

Условие	Температура воздуха T_{air} , °С	Температура воды T_{water} , °С
Определение расчетного суммарного теплового потока в емкость*	45	32
Определение расчетной температуры корпусных конструкций**	5	0
* — первичный и вторичный барьер не повреждены. ** — первичный барьер поврежден, вторичный барьер не поврежден.		

Кодекс МКГ не приводит описание методов выполнения теплового расчета. В документе указаны расчетные внешние условия и общие указания о допущениях, которые должны приниматься в расчете. В связи с этим актуальной является задача развития нормативных документов РС и разработка соответствующей методики, которая учитывала бы опыт технического наблюдения за проектированием и постройкой судов, существующие отраслевые нормативные документы, научные и технические публикации.

Перед внедрением методика должна проходить апробацию, должны быть выполнены тестовые расчеты, выполнена оценка адекватности полученных результатов.

В настоящей статье приведено описание возможного пути решения указанной выше задачи.

1. МЕТОД РАСЧЕТА

Методы расчета теплового потока можно разделить на три группы:

1. экспериментальные;
2. численные;
3. аналитические.

Экспериментальные методы отличаются высокой сложностью организации и проведения. Они нашли широкое применение при определении отдельных тепловых характеристик материалов и изделий [1]. Экспериментальные методы не рассматриваются в рамках настоящей статьи.

Примером численного метода расчета является метод конечных элементов (метод конечных объемов), практическая реализация которого возможна при наличии соответствующего программного обеспечения, например, ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, ABAQUS. Пример расчета теплового потока численными методами приведен в работе [6] для судна, оборудованного мембранной емкостью. Отмечена универсальность численных методов и возможность получить требуемые результаты для конструкций любой сложности.

В работе [7] приводится пример расчета теплового потока для емкости типа С с применением численных методов. Выполнено сопоставление характеристик тепловой эффективности изоляции грузовой емкости с применением пенополиуретана и пеностекла. Отмечено, что применение численных методов позволяет получить адекватные оценки величины теплового потока в емкость, но тем не менее не позволяет полностью учесть все особенности транспортировки сжиженного газа на судне.

Недостатком численных методов является высокая трудоемкость подготовки расчетной модели и высокая длительность расчетов. В работе [6] указано, что в зависимости от точности модели тепловой расчет может занимать от 2 ч до 1 нед. «машинного времени». В связи с этим широкое применение для оперативной оценки величины теплового потока получили аналитические методы расчета.

Основные принципы применения аналитического метода применительно к судам-газовозам приведены, например, в монографии [1]. В работе [8] на основе аналитических методов проведена серия тепловых расчетов для ряда типоразмеров емкостей типа С. Рассматриваются малотоннажные суда-газовозы и газомоторные суда, дана оценка влияния процессов захлаживания емкости и бункеровки на потерю груза. Аналитические методы теплового расчета рекомендуются несколькими авторитетными классификационными обществами [9, 10]. Преимуществом аналитических методов является относительно высокая скорость расчетов. В общем случае для применения таких методов не требуется использование высокопроизводительной вычислительной техники.

Ниже приведены основы аналитического метода расчета. Рассматривается изолированный грузовой трюм вместе с емкостью, тепловой изоляцией и окружающими конструкциям корпуса. Корпус судна разделяется на зоны стационарных тепловых потоков, т.е. областей конструкции, для которых величина потока и условия теплообмена остаются постоянными во времени. В рассматриваемых зонах выделяются замкнутые пространства, которые окружены непроницаемыми (условно) стенками и находятся в состоянии теплового баланса (теплового равновесия).

Для пространства, находящегося в состоянии теплового баланса, справедливо следующее выражение:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (3)$$

где Q_{Σ} — суммарный тепловой поток внутрь пространства;
 n — количество тепловых потоков внутрь пространства (входящих и исходящих).

Пример замкнутого пространства, окруженного непроницаемыми стенками и находящегося в состоянии теплового баланса, схематично изображен на рис. 1.

На рис. 2 приведены примеры конфигурации замкнутых пространств, на которые может быть разделено поперечное сечение корпуса судна, оборудованного мембранными емкостями.

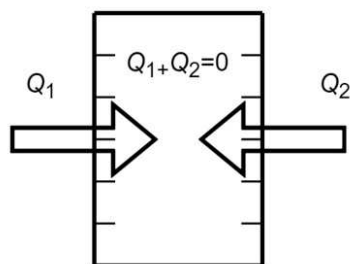


Рис. 1 Замкнутое пространство, которое находится в состоянии теплового баланса

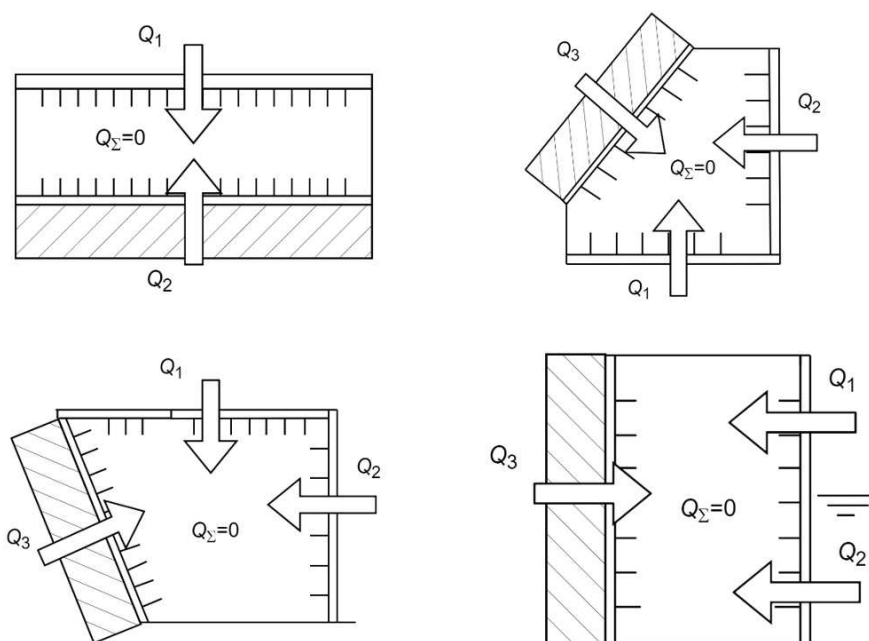


Рис. 2 Примеры конфигураций замкнутых пространств в корпусе судна, находящихся в состоянии теплового баланса

Непроницаемые стенки выполняют роль «термических сопротивлений» на пути теплового потока. Предполагается, что тепло внутрь пространства, замкнутого внутри непроницаемых стенок, может передаваться в общем случае с помощью трех механизмов:

- теплопроводность;
- тепловая конвекция;
- тепловое излучение.

Механизм передачи тепла с помощью теплового излучения не рассматривается в связи с тем, что его вклад меньше по сравнению с указанными выше механизмами. Возможность пренебречь данным видом теплообмена также обозначена в нормативных документах некоторых классификационных обществ [9].

Коэффициент теплопередачи U при передаче тепла вследствие теплопроводности можно определить следующим образом:

$$U = k/s,$$

(4)

где k — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°C);
 s — толщина элемента, м.

Величина коэффициента теплопроводности для материалов, применяемых при изготовлении корпуса судна и тепловой изоляции, определяется по результатам испытаний. По данным [6] коэффициент теплопроводности армированного пенополиуретана в зависимости от температуры T может быть приближенно определен по следующему выражению:

$$k \cong 0,022 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot T. \quad (5)$$

По данным того же источника [6] коэффициент теплопроводности стали нормальной и повышенной прочности может приниматься постоянным $k \cong 45$ Вт/(м·°С).

Коэффициент теплопередачи U при передаче тепла конвекцией можно принимать равным:

$$U = h, \quad (6)$$

где h — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С).

Определение коэффициента конвективной теплоотдачи — сложная задача теории теплообмена. Приближенная методика определения значения h основана на использовании критериев подобия тепловых процессов [9, 10]. Величина коэффициента h в этом случае принимается равной:

$$h = Nu k / L_s, \quad (7)$$

где Nu — число Нуссельта;
 k — коэффициент теплопроводности жидкой среды;
 L_s — характерная длина поверхности теплопередачи.

Более детально процедура определения значения h приведена в справочниках по теплопередачи и в некоторых документах классификационных обществ [9, 10]. Приблизленно значения h в рамках настоящей статьи оцениваются следующим образом:

- $h \cong 3 \div 4$ Вт/(м²·°С) для свободной конвекции и гладкой горизонтальной поверхности;
- $h \cong 4 \div 5$ Вт/(м²·°С) для свободной конвекции и гладкой вертикальной поверхности;
- $h \cong 16$ Вт/(м²·°С) при вынужденной конвекции и скорости ветра 5 уз;
- $h \cong 116$ Вт/(м²·°С) при свободной конвекции гладкой поверхности в морской воде.

Интенсивность конвективного теплообмена гладкой поверхности и поверхности с ребрами жесткости отличаются. Ребра жесткости увеличивают площадь поверхности теплообмена, которая взаимодействует с окружающей средой. Данный эффект называют «эффектом оребрения». Его учитывают с помощью введения откорректированного значения коэффициента конвективной теплоотдачи h^* [9]:

$$h^* = h \cdot \Phi, \quad (8)$$

где $\Phi > 1$ — коэффициент оребрения.

Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности емкости типа С в рамках настоящей статьи принимается равным $h = 14$ Вт/(м²·°С) в соответствии с данными, приведенными в [14]. В источнике указано, что h может принимать значения от 14 до 58 Вт/(м²·°С), где меньшее значение соответствует отсутствию ветра, а большее значение соответствует скорости ветра 35 м/с.

Суммарное тепловое сопротивление, которое характеризует тепловой поток через непроницаемую стенку (см. рис. 3) одновременно включает составляющие, обусловленные теплопроводностью и тепловой конвекцией. Результирующий коэффициент теплопередачи U_Σ может быть определен следующим образом:

$$U_\Sigma = \frac{1}{1/U_1 + 1/U_2 + 1/U_3 + \dots + 1/U_n}, \quad (9)$$

где $U_1, U_2, \dots, U_n$ — составляющие теплового сопротивления, которое встречает на своем пути тепловой поток, проходящий через непроницаемую стенку.

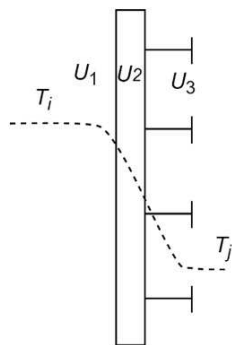


Рис. 3 Прохождение теплового потока через непроницаемую стенку

Для каждой непроницаемой стенки, таким образом, могут быть записаны уравнения вида (1) с учетом (9), а для каждого замкнутого пространства могут быть записаны уравнения вида (3). Полученные уравнения решаются относительно неизвестных значений равновесной температуры внутри замкнутых пространств. После определения значений температуры внутри пространства можно определить значения температуры на непроницаемых стенках. Результаты расчета позволяют определить расчетную температуру каждой рассмотренной конструкции судна и тепловой изоляции, а также определить результирующий суммарный тепловой поток в емкость.

Для учета зависимости теплопроводности изоляционных материалов от температуры расчета следует выполнять методом последовательных приближений.

2. РАСЧЕТЫ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ СТАНДАРТНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЯХ КОДЕКСА МКГ

Для проверки работоспособности предложенной методики при решении практических задач проектирования судна были выполнены тестовые расчеты. Выбраны проекты существующих судов-газовозов различной грузопместимости и с различными типами емкости. Обозначения и параметры тестовых судов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры тестовых судов

	Судно 1	Судно 2	Судно 3
Тип судна	Плавучее газохранилище	Газовоз	Газовоз-бункеровщик
Грузопместимость, м ³	361000	172000	2 × 2900
Тип емкости	Мембранная	Мембранная	Вкладная, тип С
Объем емкости, м ³	65326	53800	2900
Толщина изоляции, мм (первичная + вторичная)	100 + 170	100 + 170	385

Для судов с мембранной емкостью принимается, что общая толщина тепловой изоляции емкостей равна 270 мм, включая толщину первичной изоляции $h_{prim} = 100$ мм и толщину вторичной изоляции $h_{sec} = 170$ мм. Для судна с емкостью типа С толщина изоляции принимается равной 385 мм. Материалом изоляции по всей толщине теплоизоляционного слоя для всех судов принимается армированный пенополиуретан.

На рис. 4 приведены схемы поперечного сечения рассмотренных судов. Сечения разделены на зоны стационарного теплового потока, указаны замкнутые пространства внутри корпуса судна. Принимается допущение, что емкости полностью заполнены сжиженным природным газом при температуре -163 °С.

Для Судна 1 и Судна 2 учитывается тепловой поток в емкость со стороны носового и кормового обогреваемого коффердама. Величина данного теплового потока со стороны коффердама определяется при условии, что температура воздуха внутри коффердама поддерживается на уровне 5 °С, а температура полотнища поперечной переборки равна 0 °С. Для Судна 3 предполагается, что тепловой поток со стороны поперечных переборок внутрь грузового трюма отсутствует, т.е. температура внутри смежных по длине трюмов одинаковая.

Расчеты выполняются в специально разработанных рабочих книгах Microsoft Excel, с применением стандартного модуля «Поиск решения» на персональном компьютере «офисной» комплектации. Результаты расчета теплового потока в емкость **при стандартных условиях** Кодекса МКГ приведены в табл. 3. Эпюра температуры корпусных конструкций для стандартных условий Кодекса МКГ приведены на рис. 5 — 7.

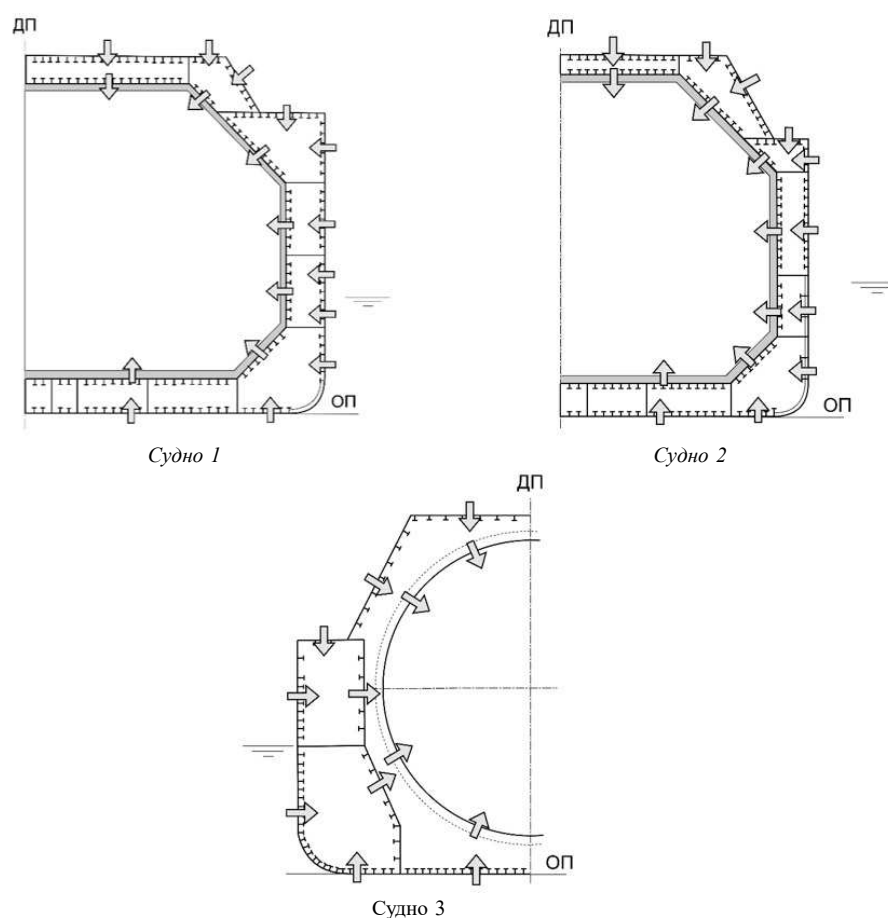


Рис. 4 Схемы поперечного сечения тестовых судов

Таблица 3

Результаты расчета теплового потока в емкость при стандартных условиях Кодекса МКГ

	Тепловой поток, Вт		BOR, %
	Со стороны коффердамов	Суммарный, Q_{Σ}	
Судно 1	31443	123176	0,075
Судно 2	25822	108740	0,080
Судно 3	—	19044	0,131

Под оценкой адекватности результатов понимается качественная и количественная оценка того, насколько полученные результаты соответствуют реально наблюдаемой на практике величине теплового потока и BOR. Измерение величины образовавшегося за рейс отпарного газа не всегда позволяет определить, какая его часть обусловлена тепловым потоком в емкость со стороны окружающей среды. Для судов в эксплуатации интенсивность образования отпарного газа зависит не только от теплового потока, но и других факторов, трудно поддающихся численной оценке: например, слошинг и брызгообразование, приток тепла от элементов системы обработки груза, охлаждение емкости перед погрузкой, химический состав газа.

Учитывая указанные выше аргументы, проверка адекватности результатов выполнялась с помощью качественного и количественного сравнения полученных результатов с результатами решения аналогичных задач, опубликованными в открытых источниках.

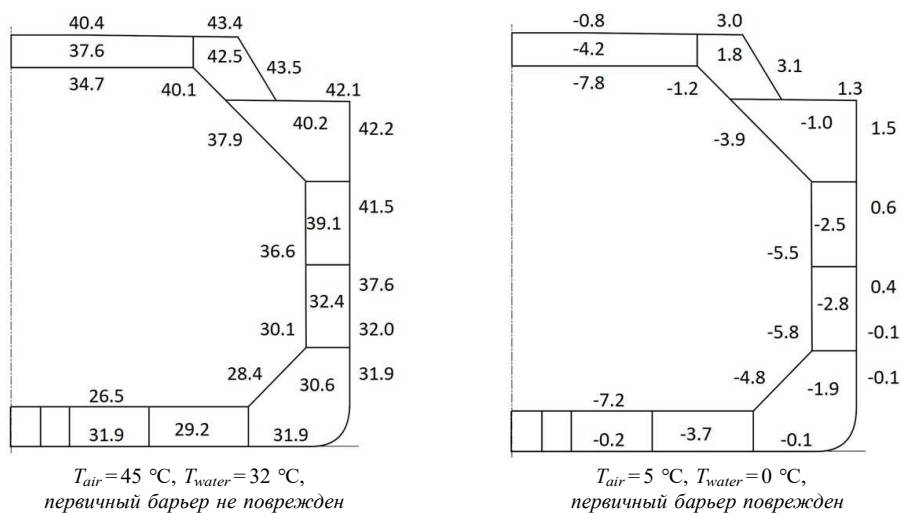


Рис. 5 Эпюры температуры корпусных конструкций для Судна 1

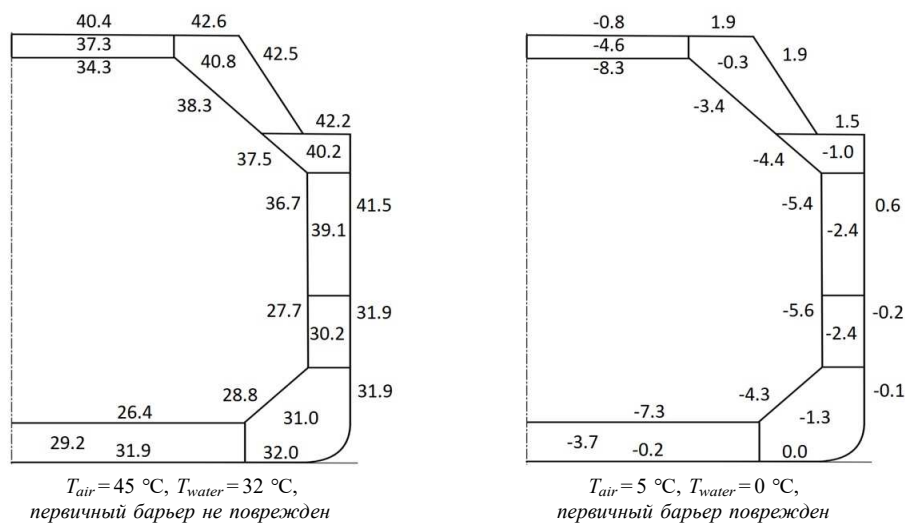


Рис. 6 Эпюры температуры корпусных конструкций для Судна 2

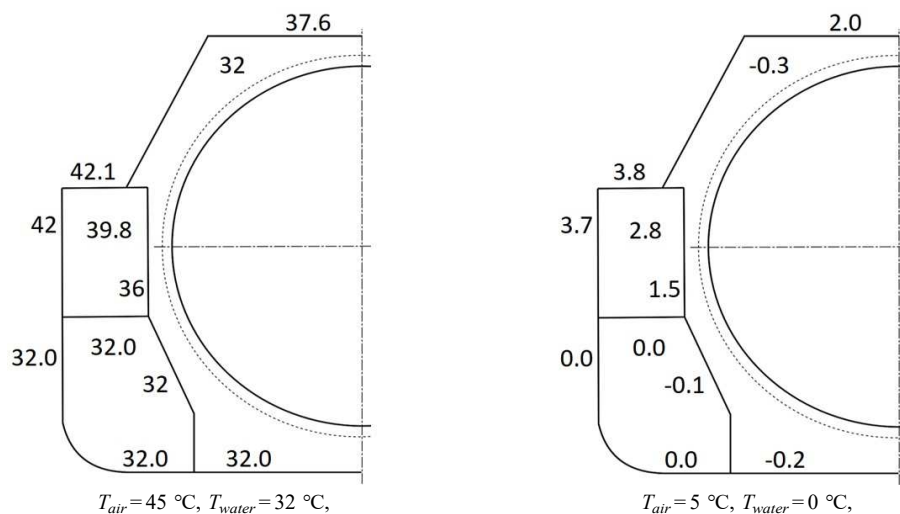


Рис. 7 Эпюры температуры корпусных конструкций для Судна 3

В статье [6] приведены результаты расчета теплового потока численными методами для судна грузовой вместимостью 165000 м³ и объемом емкости 49391 м³. Рассматривается судно, оборудованное мембранными емкостями. Используются стандартные условия Кодекса МКГ, а теплоизоляция емкости также изготовлена из пенополиуретана. По сравнению с Судном 2 отличие объема емкости составляет менее 10 %. Получена величина расчетного теплового потока 104197 Вт и $BOR=0,0856\%$. Результаты близки к значениям в табл. 2: разница в величине теплового потока составляет менее 5 %, разница в расчетной величине BOR составляет менее 7 %.

Для судов с мембранными емкостями также целесообразно сопоставить полученные значения BOR со значениями, которые заявляются разработчиками мембранных технологий в коммерческих публикациях. Параметры тепловой изоляции, которые в настоящей статье используются для Судна 1 и Судна 2, близки к технологии Mark III компании GTT. Компания GTT указывает в качестве проектных значений $BOR=0,125...0,15\%$ [15]. Полученные для Судна 1 и Судна 2 значения BOR не превышают заявленные максимальные значения производителя.

По результатам расчета в табл. 2 видно, что для Судна 3 значение BOR выше, чем для судов с мембранной емкостью при равных температурных условиях окружающей среды. Это качественно согласуется с опытом проектирования судов, использующих емкости типа С и информацией производителей [8, 11 и 12]. В соответствии с данными компании Wartsila [16], величина BOR для судна грузовой вместимостью 3000 м³ СПГ в емкостях типа С составляет 0,2 %. Данное значение близко к полученному по расчетам в рамках настоящей статьи.

В работе [8] авторами получены значения массы испарившегося СПГ для грузовой емкости объемом 5600 м³ для различных значений длительности рейса и температуры воздуха, окружающего емкость. Учитывая поправку на величину теплового потока из-за разницы в толщине тепловой изоляции емкости ориентировочное значение BOR для рассмотренного в статье [8] судна составляет $BOR \cong 0,116\%$ при средней температуре 30 °С. Разница со значением в табл. 2 составляет около 12 %. Очевидно, что отличия в значениях станут еще меньше, если учесть разницу в 2 °С между расчетными значениями температуры окружающей среды (см. рис. 7).

На основании вышеуказанного полагаем, что описанная в настоящей статье методика позволяет получить адекватные результаты и может применяться для решения практических задач при проектировании элементов емкости и смежных конструкций судна.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ

Рассмотрим примеры решения нескольких исследовательских задач, связанных с оценкой влияния параметров внешней среды на величину теплового потока в емкость и расчетную температуру корпусных конструкций.

Проведем оценку влияния ветра на результаты расчета теплового потока. Актуальность такой оценки обусловлена различиями между стандартными условиями Кодекса МКГ и дополнительными требованиями Морских Администраций некоторых стран, которые предъявляются к судам, заходящим в территориальные воды. Например, в соответствии с требованиями Береговой охраны США [9] при выборе материалов корпусных конструкций следует учитывать особо оговоренные температурные условия, а также скорость ветра 5 уз. При учете ветра коэффициент конвективной теплоотдачи между корпусом и воздухом увеличивается примерно в 4 раза.

Выполнены расчеты теплового потока при стандартных условиях Кодекса МКГ, но с учетом ветра. Получены значения суммарного теплового потока в емкость: для Судна 1 $Q_{\Sigma} \cong 123176$ Вт; для Судна 2 $Q_{\Sigma} \cong 109360$ Вт; для Судна 3 $Q_{\Sigma} \cong 19232$ Вт. Для всех судов увеличение величины теплового потока составило не более 1 %.

Для оценки влияния ветра на температуру конструкций для корпуса судов выбраны репрезентативные — наиболее «холодные» — конструктивные элементы:

- для Судна 1 и Судна 2 наиболее «холодной» конструкцией принимается горизонтальный участок верхней палубы;
- для Судна 3 наиболее «холодными» конструкциями принимаются надводный участок наружной обшивки и палуба тронка.

По результатам расчета температура верхней палубы Судна 1 и Судна 2 увеличивается при учете ветра более чем в 2 раза. Для Судна 1 расчетная температура верхней палубы увеличивается до $-3,4$ °С, для Судна 2 увеличивается до $-3,9$ °С. Расчетная температура рассматриваемых конструкций Судна 3 также увеличивается, но менее существенно: до $4,6$ °С и $2,4$ °С, соответственно.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что учет ветра при стандартных температурных условиях Кодекса МКГ привел к незначительному увеличению теплового потока в емкость. При этом учет ветра привел существенному увеличению расчетной температуры корпусных конструкций. Такой результат также подтверждает обоснованность минимальных стандартных требований Кодекса МКГ, не предусматривающих учет ветра при конвективном теплообмене с корпусом судна.

При проектировании судна может возникнуть необходимость выполнить оценку влияния температуры окружающего воздуха на расчетную температуру конструкций.

Указанная выше задача актуальна для судов, предназначенных для длительной эксплуатации в условиях низкой температуры: например, для судов ледового класса. В этом случае стандартные температурные условия Кодекса МКГ следует откорректировать, уменьшив величину расчетной температуры воздуха. Например, для судов ледового класса **Arc5** минимальная расчетная температура окружающего воздуха должна приниматься $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при эксплуатации с заходом в устья северных рек не должна превышать $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13].

На рис. 8 приведены эпюры расчетной температуры конструкций тестовых судов, полученные при $T_{air} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{water} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ с применением аналитического метода.

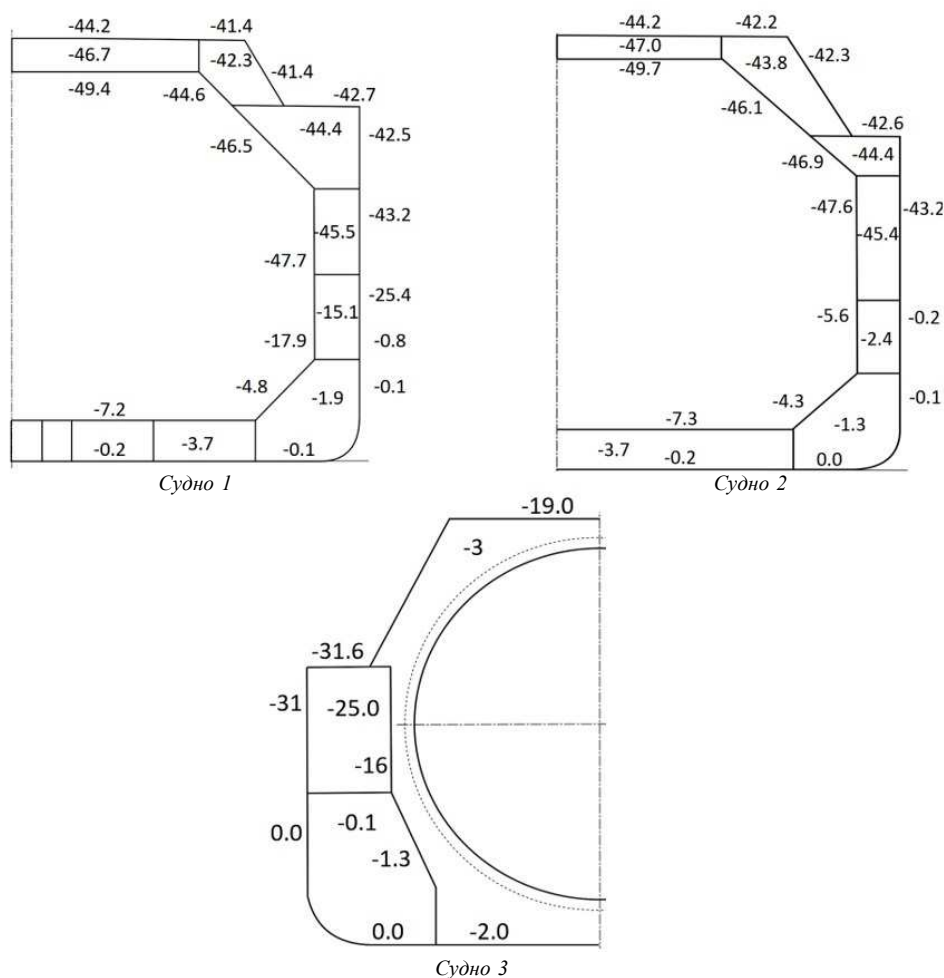


Рис. 8 Эпюры расчетной температуры корпусных конструкций при $T_{air} = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 9 приведены результаты определения расчетной температуры верхней палубы для Судна 1 и Судна 2 при изменении температуры окружающего воздуха. Следует отметить, что для одной и той же конструкции двух судов получен близкий результат. Причиной является схожесть архитектурно-конструктивного типа судов и схожесть конструкции в рассматриваемом районе. На рис. 9 приведено также приближенное выражение для определения расчетной температуры верхней палубы в зависимости от T_{air} .

На рис. 10 приведены результаты определения расчетной температуры надводного борта и палубы тронка для Судна 3 при изменении температуры окружающего воздуха, а также приближенное выражение для определения величины расчетной температуры палубы тронка и надводного участка бортовой обшивки в зависимости от T_{air} .

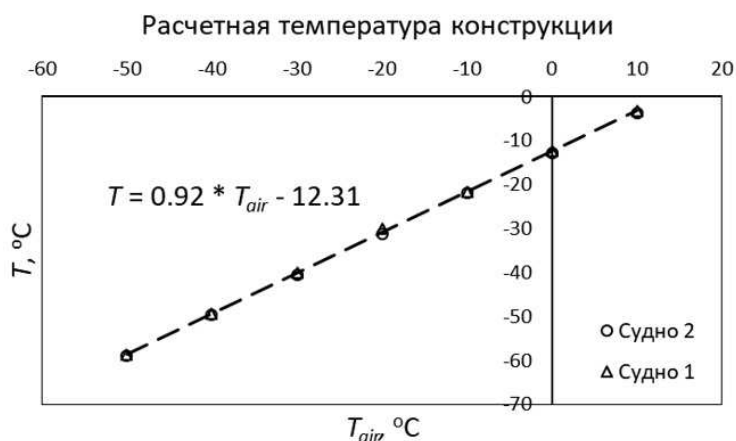


Рис. 9 Влияние температуры окружающего воздуха на температуру верхней палубы для Судна 1 и Судна 2

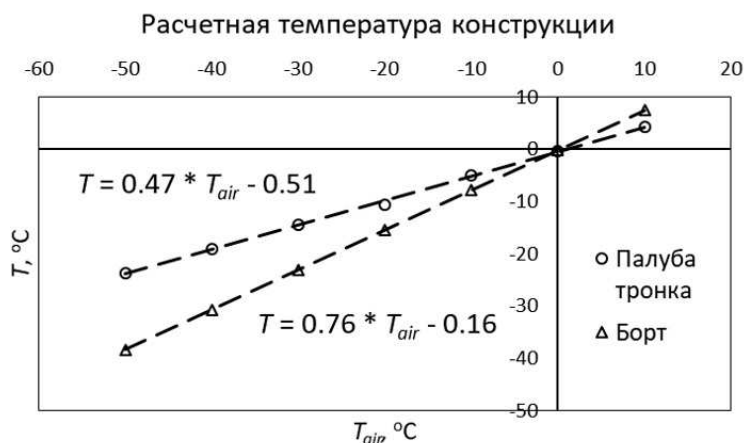


Рис. 10 Влияние температуры окружающего воздуха на температуру конструкций для Судна 3

На рис. 11 приведены результаты оценки влияния температуры окружающего воздуха на величину теплового потока в емкость. Расчеты выполняются при фиксированном значении температуры воды $T_{water} = 0^\circ\text{C}$. Значения теплового потока приведены в безразмерном виде: Q^* равен отношению рассчитанного теплового потока к максимальному значению суммарного теплового потока Q_Σ , определенного при стандартных температурных условиях Кодекса МКГ (см. табл. 2).

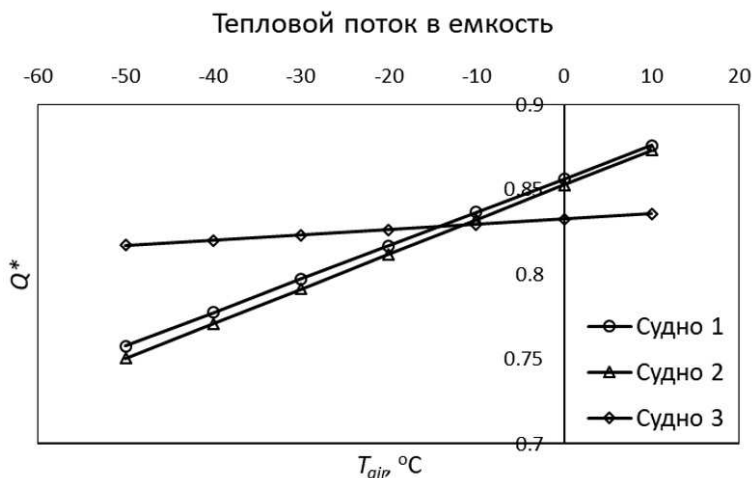


Рис. 11 Влияние температуры окружающего воздуха на величину теплового потока в емкость

Для Судна 1 и Судна 2 выявлены близкие оценки относительного снижения теплового потока, что обусловлено схожим архитектурно-конструктивным типом судов и одинаковой технологией хранения груза. Для Судна 3 выявлено незначительное влияние низкой температуры окружающего воздуха на снижение теплового потока в емкость. Такой результат можно также отнести ко влиянию архитектурно-конструктивного типа судна: наличию «защитного кожуха» в виде палубы тронка, отсутствию второго дна и значительному влиянию теплового потока со стороны воды.

Для оценки эффективности изоляции перевозимого груза может быть использовано значение BOR , полученное по формуле (2), а также значение суммарного теплового сопротивления конструкции U_{Σ}^{Equiv} , которое оказывает корпус судна и тепловая изоляция по отношению к общему тепловому воздействию на судно [6].

Значение коэффициента U_{Σ}^{Equiv} можно использовать для оценки конструктивных мероприятий, принятых на судне для защиты перевозимого груза от теплового потока. Значение U_{Σ}^{Equiv} может быть представлено следующим выражением:

$$U_{\Sigma}^{Equiv} = \frac{Q_{\Sigma}}{A_{LNG}(T_{Env} - T_{LNG})}, \quad (10)$$

где Q_{Σ} — суммарный тепловой поток в емкость;
 A_{LNG} — площадь поверхности соприкосновения перевозимого груза с границами емкости;
 T_{Env} — средневзвешенная по площади воздействия температура внешней среды;
 T_{LNG} — температура перевозимого груза.

В табл. 3 приведены результаты расчета суммарного теплового сопротивления конструкции тестовых судов. Для судов близкого архитектурно-конструктивного типа получены схожие значения U_{Σ}^{Equiv} . Сходные оценки U_{Σ}^{Equiv} получены для судов с мембранной емкостью в работе [6]. Для судна, оборудованного емкостью типа С, суммарное конструктивное сопротивление оказалось выше, чем для судов с мембранной емкостью.

Таблица 3

Суммарное тепловое сопротивление конструкции судна

	Q_{Σ} , Вт	A_{LNG} , м ²	T_{Env} , °C	U_{Σ}^{Equiv} , Вт/(м ² °C)
Судно 1	123176	9508	39,39	0,064
Судно 2	108740	8286	38,84	0,065
Судно 3	19044	1349	39,01	0,070

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведено описание аналитического метода расчета теплового потока в корпусе и тепловой изоляции судов, предназначенных для транспортировки сжиженного газа наливом. Приведены примеры решения ряда практических задач, которые могут возникать при проектировании современных судов-газовозов.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании предложений для развития требований РС к системам хранения сжиженного газа на судне. Кроме этого, результаты могут оказать содействие при формировании и развитии компетенций отечественных проектных организаций в области проектирования судов-газовозов.

В дальнейших исследованиях предполагается выполнить расчеты для более широкой номенклатуры судов и материалов тепловой изоляции, оценить влияние частичного заполнения емкостей на величину теплового потока, провести сопоставление результатов с более широкой номенклатурой источников и оценить влияние перетекания тепла между смежными замкнутыми пространствами. Также предполагается сформулировать на основе выполненных исследований предложения по дополнению требований нормативных документов Регистра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко М.С. Основы мембранной технологии хранения сжиженного природного газа на судне: учебное пособие. / Бойко М.С. Научный ред. Тряскин В.Н. СПб.: Издательство СПбГМТУ, 2023. 220 с.
2. Зайцев В.В., Коробанов Ю.Н. Суда-газовозы. — Л.: Судостроение, 1990. 304 с.
3. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt D.P. // JOHN WILEY & SONS, INC, 2002. 1040 с.
4. Резолюция MSC.370(93) от 22.05.2014. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (с изменениями на 1 января 2016 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/499003330> (дата обращения: 16.02.2023).
5. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом. Часть IV. Хранение груза. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2023. 57 с.
6. Miana M. Calculation of boil-off rate of liquefied natural gas in MARK III tanks of ships carriers by numerical analysis/Miana M., Legorburo R., Diez D., Hwang Y.H.//Applied Thermal Engineering, Vol. 93, January 2016. Pp. 279 — 296.
7. Triaskin J.V. Numerical study of evaporation rate of liquefied natural gas from a cargo tank while transported by LNG vessels/Triaskin J.V., Tryaskin V.N.//Proceedings of The Thirteenth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. October 2018. Paper No. ISOPE-P-18-063. 5 p.
8. Реуцкий А.С., Таровик О.В., Павловский В.А. Определение потерь сжиженного природного газа при выполнении бункеровки и сопутствующих технологических операций//Труды Крыловского государственного научного центра, 2020. Специальный выпуск 1. с. 122 — 130.
9. Guidance Notes on Thermal Analysis of Vessels with Tanks for Liquefied Gas. American Bureau of Shipping. September 2019. 30 с.
10. Guidance of Heat Transfer Analysis for Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk/ Ships Using Liquefied Gases as Fuels. Korean Register. 2020. 23 с.
11. Completion of largest LNG Bi-Lobe Type C. URL: <https://www.tge-marine.com/completion-of-largest-lng-bi-lobe-type-c-tanks/> (дата обращения: 17.02.2023).
12. Hongjun Fan. IMO type C tank and FGSS solution for a retrofitted 10,000 TEU LNG-fuelled container ship. C-LNG Solutions Pte. Ltd. Technical report. Singapore, 2021. 17 с.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2023. 336 с.
14. Реуцкий А.С. Особенности проектирования судов-бункеровщиков сжиженным природным газом: дисс. канд. техн. наук: 05.08.03: защищена 22.04.2021 / Реуцкий Александр Сергеевич. СПб., 2021. 346 с.
15. Официальный сайт GTT. URL: www.gtt.fr (дата обращения: 24.05.2023).
16. Czernski K. Workshop on modernization of Danube vessel fleet. Wartsila Portfolio. 18.04.2018. 56 с.

REFERENCES

1. Boyko M.S. *Osnovy membrannoy tehnologii hraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza na sudne: uchebnoe posobie* [Basics of membrane technology for liquefied natural gas containment of ship: textbook]. Boyko M.S. scient. ed. Tryaskin V.N. St. Petersburg, SMTU Publishing, 2023. 220 p.
2. Zajcev V.V., Korobanov Ju.N. *Suda-gazovozy* [Gas carrier ships]. Leningrad, Sudostroenie, 1990. 304 p.
3. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt D.P. Introduction to heat transfer. JOHN WILEY & SONS, INC, 2002. 1040 p.
4. Resolution MSC.370(93) adopted on 22.05.2014. *Mezhdunarodnyj kodeks postrojki i oborudovaniya sudov, perevozyashchikh szhizhennyye gazy nalivom (s izmeneniyami na 1 yanvarya 2016 goda)* [Amendments to The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (with updates as per 1 Jan 2016)] URL: <https://docs.cntd.ru/document/499003330> (accessed on 16.02.2023).
5. Rules for the Classification and Construction of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. Part IV. Cargo Containment. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023. 57 p. (in Russian)
6. Miana M., Legorburo R., Diez D., Hwang Y.H. Calculation of boil-off rate of liquefied natural gas in Mark III tanks of ships carriers by numerical analysis. Applied Thermal Engineering, Vol. 93, January 2016. Pp. 279 — 296.
7. Triaskin J.V., Tryaskin V.N. Numerical study of evaporation rate of liquefied natural gas from a cargo tank while transported by LNG vessels. Proceedings of the thirteenth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. October 2018. Paper No. ISOPE-P-18-063. 5 p.
8. Reuckij A.S., Tarovik O.V., Pavlovsky V.A. *Opredelenie poter szhizhennogo prirodnogo gaza pri vypolnenii bunkerovki i soputstvuyushchikh tehnologicheskikh operatsiy* [Evaluation of liquefied natural gas losses during bunkering and accompanying working operations]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020, Special Edition 1, pp. 122 — 130.
9. Guidance Notes on Thermal Analysis of Vessels with Tanks for Liquefied Gas. American Bureau of Shipping. September 2019. 30 p.
10. Guidance of Heat Transfer Analysis for Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk/ Ships Using Liquefied Gases as Fuels. Korean Register. 2020. 23 p.
11. Completion of largest LNG Bi-Lobe Type C. URL: <https://www.tge-marine.com/completion-of-largest-lng-bi-lobe-type-c-tanks/> (accessed on 17.02.2023).
12. Hongjun Fan. IMO type C tank and FGSS solution for a retrofitted 10,000 TEU LNG-fuelled container ship. C-LNG Solutions Pte. Ltd. Technical report. Singapore, 2021. 17 p.
13. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going ships. Part II. Hull. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023. 336 p. (In Russian)
14. Reuckij A.S. *Osobennosti proektirovaniya sudov-bunkerovshchikov szhizhennym prirodnym gazom* (Specifics of LNG bunkering ships design). Dissertation to fulfill the requirements for Cand. of tech. sciences. Presented 22.04.2021, 2021. 346 p.
15. Official site of GTT: URL: www.gtt.fr (accessed on: 24.05.2023).
16. Czernski K. Workshop on modernization of Danube vessel fleet. Wartsila Portfolio. 18.04.2018. 56 p.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.54, 621.64

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К СУДАМ, ОБОРУДОВАННЫМ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

С.В. Вербицкий, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбМГТУ), Санкт-Петербург, e-mail: ser_verb@mail.ru

К.Г. Бережной, СПбМГТУ, Санкт-Петербург, e-mail: berezhnoik@mail.ru

И.Г. Чеснокова, канд. хим. наук, СПбМГТУ, Санкт-Петербург, e-mail: irene750@mail.ru

В статье обоснована целесообразность разработки требований к судам, оборудованным для использования сжиженного нефтяного газа (СНГ) в качестве топлива. В связи с этим рассмотрены физические и химические свойства пропан-бутановой смеси, выполнен анализ требований по применению СНГ в качестве топлива для различных видов транспорта, обобщены данные по существующим судам, использующим пропан-бутановую смесь в качестве топлива. Рассмотрены дизельные энергетические установки в контексте их функционирования на СНГ, выполнен анализ требований правил зарубежных квалификационных обществ и ИМО по исследуемому вопросу. В конечном итоге разработан новый раздел части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС.

Ключевые слова: пропан-бутановая смесь, физико-химические свойства, сжиженный нефтяной газ, дизельные двигатели, способы заправки, проект новых требований

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR SHIPS EQUIPPED TO USE LIQUEFIED PETROLEUM GAS AS FUEL

S.V. Verbitskiy, PhD, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: ser_verb@mail.ru

K.G. Berezhnoi, SMTU, St. Petersburg, e-mail: berezhnoik@mail.ru

I.G. Chesnokova, PhD, SMTU, St. Petersburg, e-mail: irene750@mail.ru

The article substantiates the expediency of developing requirements for ships equipped to use liquefied petroleum gas (LPG) as a fuel. In this regard, the physical and chemical properties of the propane-butane mixture have been considered, an analysis of the requirements for the use of LPG as a fuel for various types of transport has been carried out and data on existing ships using a propane-butane mixture as fuel have also been summarized. Diesel power plants have been considered in the context of their operation on LPG, an analysis of the requirements of the rules of foreign qualification societies and IMO on the issue under study have been carried out. Ultimately, a new Section of Part XVII "Distinguishing Marks and Descriptive Notations in the Class Notation Specifying Structural and Operational Particulars of Ships" of the RS Rules has been developed.

Keywords: propane-butane mixture, physical and chemical properties, liquefied petroleum gas, diesel engines, filling methods, new requirements draft

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире все большее количество судов используют сжиженный нефтяной газ (СНГ) в качестве топлива. Соответственно, применительно к рассматриваемым объектам должны быть разработаны требования, определяющие безопасность их эксплуатации. Зарубежные классификационные общества, такие как DNV, BV и ABS уже имеют требования к судам, работающим на СНГ-топливе. В России в настоящее время нормативы отсутствуют (если не принимать во внимание автомобильный транспорт).

В связи с указанным Российский морской регистр судоходства (РС) заказал проведение научно-исследовательской работы (НИР) по разработке требований в части применения на судах СНГ (пропан-бутановой смеси) в качестве топлива, которую выполнил Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

Далее в статье представлены основные результаты исследований, касающиеся физико-химических свойств СНГ; данных по существующим и перспективным судам, применяющим пропан-бутановую смесь в качестве топлива; дизельных энергетических установок, работающих на СНГ; общего анализа опасностей и требований нормативных документов.

1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Сжиженный нефтяной газ представляет собой смесь пропана и бутана (нормального и изобутана) с небольшим процентным содержанием ненасыщенных углеводородов (этилен, пропилен, бутилен) и следами более легких углеводородов (этан), а также более тяжелых углеводородов (пентан). Состав СНГ зависит от источника, из которого он добывается (месторождения сырой нефти и природного газа или нефтепереработка). В большинстве стран сжиженный нефтяной газ представляет собой пропан, в то время как в некоторых странах он состоит только из бутана или смеси пропана и бутана.

Некоторые свойства пропана и н-бутана как основных компонентов СНГ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства основных компонентов СНГ

Показатели	Пропан	н-Бутан
Температура кипения, °С при 101,3 кПа	–42,1	–0,5
Давление паров, кПа:		
при 15 °С	730	180
при 45 °С	1530	430
Относительная плотность (по воздуху) газовой фазы	1,5545	2,0905
Кинематическая вязкость ν , $10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	3,82	2,56
Высшая объемная теплота сгорания Q_v , кДж/м ³	99170	128500
Температура самовоспламенения t_v , °С	445	372
Концентрационные пределы распространения пламени, % об.	1,7 — 10,9	1,4 — 9,3
Октановое число	125	91,20

Как следует из приведенных в табл. 1 данных, газообразный нефтяной газ значительно тяжелее воздуха и поэтому при утечке в помещении оседает в нижних зонах. Вязкость сжиженных газов очень мала, что облегчает их транспортировку по трубопроводам, но создает предпосылки к утечкам.

Сжиженные нефтяные газы имеют более высокую, чем обычные природные газы (основной компонент — метан), объемную теплоту сгорания (приблизительно в три раза). Низшая теплота сгорания 1 кг различных углеводородов примерно одинакова (около 46500 кДж), что дает возможность вести сравнительные расчеты для сжиженных газов по их массовой характеристике.

СНГ — нестабильная двухфазная система. Его хранение осуществляется в жидком состоянии. Это обусловлено, главным образом, тем, что жидкая фаза СНГ в 300 раз меньше по объему, чем паровая.

Чтобы газ самопроизвольно не менял свое агрегатное состояние, объем жидкости и пара должен иметь такое соотношение, при котором создается равновесная система «жидкость — пар». Это означает, что внутри резервуара не происходит ни конденсации паров, ни испарения жидкости. Для этого внутренний объем емкости заполняется лишь на 85 %, тем самым образовывается необходимая для сохранения равновесной системы упругость насыщенных паров. С увеличением температуры повышается давление насыщенных паров.

Параметры хранения сжиженных углеводородных газов по ГОСТ Р 52087-2003 «Газы углеводородные сжиженные топливные» [1] следующие:

- рабочее давление до 1,6 МПа;
- температура хранения — от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- давление насыщенных паров — выше 0,07 — 0,16 МПа (при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), выше 0,07 МПа (при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$), до 1,6 МПа (при $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- объемная доля жидкого остатка при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ — не более 0,7 — 1,8 %.

Чем больше в СНГ пропана, тем легче смесь будет испаряться в холодное время года. Однако сжиженные газы с повышенной концентрацией пропана дороже стоят, поэтому их обычно используют лишь в качестве «зимнего» топлива. В любом случае, в условиях российского климата нельзя использовать смесь с содержанием бутана более 60 % — такая смесь будет испаряться только при наличии испарителя.

Повышенное количество в СНГ непредельных углеводородов негативно влияет на техническое состояние газового оборудования. Непредельные углеводороды не сгорают полностью, а полимеризуются и коксуются. Твердые остатки загрязняют оборудование и резко сокращают срок его службы. Примеси воды и щелочи остаются в резервуаре и трубопроводах в виде конденсата, который снижает эффективность газотопливной системы. Кроме того, примеси не дают такого количества тепла, как пропан и бутан, поэтому их повышенная концентрация понижает КПД топлива.

Вместе с тем, по результатам выполненных исследований можно выделить следующие основные преимущества СНГ по сравнению с СПГ: экологичность, простота транспортировки, большее количество тепла при сжигании, отсутствие в составе коррозионно-активных веществ.

2. СУДА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ПРОПАН-БУТАНОВУЮ СМЕСЬ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

Как показано на рис. 1 [2], суда, заказанные и работающие на СПГ, составляют практически половину всего флота на альтернативных видах топлива. Это в первую очередь газовозы, за которыми следуют паромы, контейнеровозы, суда нефтегазового флота и т.п.

С учетом выполненного анализа наиболее перспективным видится применение СНГ топлива на газовозах СНГ, рыболовных судах, круизных лайнерах и пассажирских судах, а также портовых буксирах, земснарядах.

В настоящее время единственными судами, использующими СНГ в качестве топлива, являются крупно- и среднетоннажные газовозы, всего 19 единиц, из которых всего один среднетоннажный. При этом очевидно (см. рис. 1), что активно ведется проектирование судов на СНГ-топливе, а также модернизация судов, использующих традиционные виды топлива.

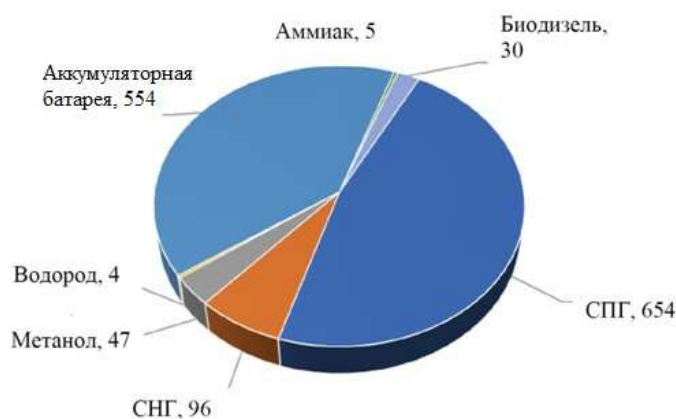


Рис. 1 Количество судов в эксплуатации и в портфеле заказов на альтернативных «зеленых» видах топлива (по состоянию на декабрь 2021 года)

Для хранения СНГ могут использоваться танки типа А, В и С (цилиндрические), а также мембранные танки, бытовые баллоны и сфера Хортона. Наиболее предпочтительный способ хранения СНГ-топлива в танках типа С (цилиндрических) на открытой палубе. Основные требования к системам хранения СНГ следующие:

- срок службы не менее срока службы судна или 25 лет (что больше);
- системы хранения СНГ должны проектироваться в соответствии с условиями окружающей среды;
- криогенные емкости хранения топлива должны быть снабжены полным вторичным непроницаемым барьером.

Существенно отметить, что бункеровка СНГ доступна по всему миру, существует более 1000 хранилищ и терминалов, а также более 700 небольших газозовозов, осуществляющих бункеровку от судна к судну. Все указанное в данном разделе позволяет констатировать, что использование СНГ-топлива для широкой номенклатуры судов весьма перспективно, в том числе с экологических позиций.

3. СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

В настоящее время большинство судов оборудовано дизельными энергетическими установками (ДЭУ). Общая вместимость судов с ДЭУ составляет 67 % тоннажа морского мирового флота. Доля ДЭУ в общем объеме строящихся морских судов превышает 90 %, а среди судов речного флота — более 97 %, что объясняется прежде всего их высокой топливной экономичностью и автоматизацией, значительным ресурсом и хорошей надежностью [3]. В качестве судового топлива на этих судах используются топлива с вязкостью до 700 сСт.

С ужесточением требований к СЭУ в части содержания и количества вредных выбросов с выхлопными газами производители двигателей внутреннего сгорания стали переходить на использование таких видов топлива как СПГ и СНГ.

Двигатели, использующие газовое топливо, создаются на базе серийно выпускаемых четырех и двухтактных двигателей, работающих на жидком топливе. Ведущие производители судовых двигателей, такие как MAN, Wärtsilä, Rolls-Royce, Caterpillar, Cummins и GE уже освоили выпуск двигателей, работающих на газовом топливе.

Эти двигатели можно разделить на однопаливные, двухтопливные и трехтопливные.

Однопаливные газовые поршневые двигатели используют в качестве топлива исключительно СПГ или СНГ. Данный тип двигателей представлен четырехтактными двигателями с внешним смесеобразованием, так и внутренним с воспламенением топливно-воздушной смеси от электрической искры или форкамерно-факельным зажиганием.

Двухтопливный газодизельный двигатель является обычным дизельным двигателем, на который установили дополнительные устройства для работы с газовым топливом.

Технология трехтопливных двигателей предполагает возможность работы дизельного двигателя на тяжелом и легком жидком топливе, а также на газообразном топливе с использованием одного из жидких топлив в качестве запального топлива.

Данные двигатели уже эксплуатируются на судах, обеспечивающих перевозку сжиженных газов, при этом судовое дизельное топливо и мазут используют при работе на газе в качестве запального топлива. Эта концепция была разработана совместно компаниями Wärtsilä и MAN для газозовозов, в настоящее время проводятся исследования и разработки для использования трехтопливного двигателя на контейнеровозах.

В табл. 2 представлены основные характеристики двигателей, работающих на газовом топливе.

Работа на газовом топливе обеспечивает повышение ресурса цилиндропоршневой группы двигателя за счет: полного сгорания газовой смеси;

отсутствия серы, вызывающей коррозию металла;

сохранения масляной пленки на стенках цилиндров (газ не смешивается с маслом в отличие жидкого топлива).

Однако работа поршневых двигателей на газовом топливе содержит опасные факторы, такие как: скопление паров СНГ в нижней части машинного отделения в результате их утечек из-за неплотности соединений топливных систем и возможность образования газозовозной смеси взрывоопасной концентрации в ресивере продувочного воздуха, газозовозном коллекторе и картерном пространстве дизеля. Очевидно, что должны быть проработаны мероприятия, позволяющие минимизировать указанные опасные факторы. Соответствующие требования включены в новый раздел Правил РС.

Таблица 2

Основные характеристики поршневых двигателей, работающих на газе

Четырехтактные двигатели	
Газопоршневые (тип SG) Мощностной диапазон ВОД при частоте вращения от 1000 — 1500 об/мин составляет от 0,1 до 4,5 МВт, а СОД при частоте вращения 500 — 750 об/мин составляет 4 — 18 МВт.	Топливо — различные виды газа, включая СНГ и этан (газовоздушная смесь внешним смесеобразованием) Воспламенение — от электрической искры или форкамерно-факельным зажиганием Экологические показатели — по сравнению с дизельными, имеют меньший уровень выбросов в атмосферу CO ₂ (на 25 %) и NO _x (примерно на 80 %), а выбросы SO _x , сажи и твердых частиц практически отсутствуют
Дизельные четырехтактные двухтопливные (тип DF) Мощностной диапазон ВОД — от 37 до 2000 кВт при частоте вращения от 1300 до 1800 об/мин. Мощностной диапазон СОД — от 1 до 20,8 МВт при частоте вращения от 600 до 1000 об/мин.	Топливо — СПГ, допускается возможность работы на СНГ и попутном нефтяном газе. Жидкое топливо MDO, MGO, HFO и сырая нефть. Основное — газовоздушная смесь с внутренним смесеобразованием Запальное (пилотное) — жидкое топливо. Количество пилотного топлива эквивалентно примерно 5% энергии всего топлива, поступающего в двигатель при полной нагрузке. Давление впрыска газа — 35 МПа Воспламенение — от запального топлива Экологические показатели — полностью соответствует требованиям Приложения VI к МАРПОЛ 73/78 (уровень Tier III) для особых районов контроля выбросов NO _x
Двухтактные двигатели	
Дизельные двухтопливные (тип — LGL, LGIP) Агрегатная мощность — от 4,35 до 22,7 МВт при 72 — 167 об/мин	Топливо — СПГ, СНГ, жидкое топливо Основное — сжиженный газ Запальное (пилотное) — жидкое топливо (3 %). Воспламенение От запального топлива Давление впрыска газа — 30 — 60 МПа Экологические показатели — полностью соответствует требованиям Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 (уровень Tier III) для особых районов контроля выбросов NO _x (до 18 % снижено содержание CO ₂ и около 90 % твердых частиц по сравнению с HFO)

4. АНАЛИЗ ОПАСНОСТЕЙ

Использование газового топлива на морском транспорте помимо экологических и экономических преимуществ приводит к возникновению дополнительных рисков в сфере эксплуатации, которые необходимо минимизировать.

Чрезвычайные ситуации, связанные с применением СНГ, происходят все чаще в связи с нарастанием объемов производства и применения. Ущерб от пожаров и взрывов имеет колоссальные размеры и тенденцию постоянного роста. По мере повышения уровня технической оснащенности производства, повышается и его пожаровзрывоопасность. Пожары и взрывы являются составной частью большинства чрезвычайных ситуаций на предприятиях нефтегазопереработки, что обуславливает необходимость и актуальность разработки мер, направленных на их предупреждение.

К наиболее тяжелым последствиям приводят аварии, связанные с разрушением емкостей, содержащих сжиженные газы, или со взрывами газовых смесей внутри резервуаров при их переполнении, повышении температуры сверхдопустимой, применении несоответствующих материалов и низком качестве изготовления сосудов.

На основании статистики на предприятиях нефтегазопереработки и учетом особенностей морского применения СНГ выделяются следующие виды опасностей [4, 5], обусловленных присутствием на судне рассматриваемого топлива:

- 1) объемный взрыв газа, возникающий в результате его утечки в газообразном состоянии в замкнутом объеме при наличии источника воспламенения (источником воспламенения может служить открытое пламя, электрическая искра или поверхность, нагретая выше температуры самовоспламенения газа, для пропана + 445 °С);
- 2) взрыв емкостей для хранения газа вследствие повышения давления;
- 3) пожар в результате разлившегося газа или струйный пожар в результате горения газа под давлением;
- 4) газовое облако, в котором может возникнуть пожар;
- 5) быстрое фазовое превращение при попадании сжиженного газа в воду, аналогичное взрыву без возгорания;
- 6) удушье в результате попадания человека в облако газа;
- 7) загрязнение атмосферы в результате утечки газа.

Для минимизации или исключения указанных опасностей предлагается предусмотреть следующие технические мероприятия:

- установка системы подачи и подготовки СНГ на верхней палубе;
- обеспечение качества топлива, одоризация СНГ;
- установка трубопроводов СНГ, расположенных в машинном отделении, с двойными стенками, пространство между которыми заполняется инертным газом;
- осуществление контроля утечек и концентрации паров СНГ в машинном отделении;
- применение в составе машинного отделения электрооборудования во взрывобезопасном исполнении;
- постоянное вентилирование и контроль состава воздуха нижней части машинного отделения и в помещениях, где проходят трубопроводы с СНГ;
- аварийное отключение подачи СНГ в машинное отделение в случае возникновения любой потенциальной проблемы, связанной с системой подачи топлива СНГ и автоматическим переводом работы главного двигателя на жидкое топливо.

Многие из вышеперечисленных требований уже отражены в зарубежных нормативных документах (см. ниже) и, как следствие, рекомендованы к использованию РС.

5. АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

При подготовке нового раздела Правил было проанализировано несколько десятков нормативных документов, касающиеся перевозки, хранения и применения СНГ в качестве топлива. Эти документы включали в себя ГОСТы, своды правил, Технические регламенты, действующие Правила РС, Правила ЕЭК ООН, международные стандарты, требования Международной морской организации, правила зарубежных классификационных обществ: BV, ABS и DNV.

Резюмируя результаты выполненного анализа можно сделать вывод, что основные отличия нормативных требований по применению СНГ в качестве топлива по сравнению с другими газами с низкой температурой вспышки связаны с высокой плотностью СНГ, в виду которой он представляет большую опасность с точки зрения накопления при утечках, что в свою очередь, накладывает повышенные требования на системы обнаружения утечек, вентиляции, бункеровки, компоновку помещений и т.д. [6, 7 и 8].

Основополагающими документами, которые использовались при подготовке нового раздела Правил, являлись Кодекс МГТ [9], принятый резолюцией Комитета по безопасности на море ИМО MSC.391(95) от 11 июня 2015 года, и Временное руководство по обеспечению безопасности судов, использующих СНГ в качестве топлива, представленное в резолюции CCC 7/3/Rev.1, выпущенной 30 апреля 2021 года подкомитетом по перевозке грузов и контейнеров ИМО.

Следующие основные положения содержатся во Временном Руководстве:

- внесены дополнения в соответствующие разделы Кодекса МГТ, отражающие специфику СНГ по сравнению с другими топливными газами с низкой температурой вспышки;
- усилены требования к проведению оценки риска;
- с учетом специфики свойств СНГ ужесточены и конкретизированы требования к вентиляции;
- рекомендуется концепция газобезопасных машинных помещений;
- ужесточаются требования к оборудованию поддонов, двойных ограждений, осушительным системам и прочим средствам для обнаружения утечек;
- вводятся дополнительные меры безопасности и обнаружения газа, связанные со слабой летучестью СНГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышесказанному, можно констатировать, что создана хорошая основа для подготовки требований по применению на судах СНГ в качестве топлива как самостоятельного раздела части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил классификации и постройки морских судов РС. Указанное стало возможным благодаря выполненным исследованиям и анализу зарубежной и российской нормативной документации.

В качестве основных базовых постулатов разработанных требований рассматривались преимущественно те, которые нацелены на обеспечение безопасности эксплуатации морских судов.

В результате был подготовлен новый раздел Правил РС, состоящий из следующих подразделов: общие положения, общие требования к конструкции судна, общие требования к конструкции емкостей для топлива, система регулирования давления и температуры топлива при хранении, топливная система, потребители газового топлива на судне, требования к противопожарной защите, вентиляция помещений, инертзация и контроль среды, системы контроля, управления и автоматики, электрическое оборудование, защита экипажа, оценка рисков.

Авторы полагают, что разработанные требования будут основой для проектирования, строительства и эксплуатации судов на СНГ-топливе в Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52087-2003. Газы углеводородные сжиженные топливные. — М.: Госстандарт России, 2003. 12 с.
2. Decision-Making on the Selection of Clean Energy Technology for Green Ships Based on the Rough Set and TOPSIS Method. URL: <https://www.mdpi.com> (дата обращения: 01.06.2022).
3. Беспалов В.И., Пискунов В.А., Садеков М.Х. Эксплуатация судовых энергетических установок. — Н. Новгород: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2010, 75 с.
4. ТУ 0272-048-00151638-01 Газы углеводородные сжиженные. Технические условия. с изм №№ 1 — 5, 2001.
5. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. — М.: Стандартинформ, 2007, 7 п.
6. Guidance Note NI 647 DT R00 E "LPG-Fuelled Ships — Tentative Rules". BV, 2018, 12 p.
7. Guide for Vessels Intended to Carry Compressed Natural Gases in Bulk. ABS, 2020, 227 p.
8. Rules for Classification: Ships. Part 6 Additional class notations. Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. Section 13 Gas Fuelled Ship Installations — Gas Fuelled LPG. DNV-GL, 2021, 337 p.
9. International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). International Maritime Organization, 2015, 121 p.

REFERENCES

1. GOST R 52087-2003. Hydrocarbon liquefied fuel gases. Moscow, Gosstandart Rossii, 2003. 12 p. (In Russian).
2. Decision-Making on the Selection of Clean Energy Technology for Green Ships Based on the Rough Set and TOPSIS Method. Available at URL: <https://www.mdpi.com> (accessed on: 01.06.2022).
3. Bepalov V.I., Piskunov V.A., Sadekov M.H. *Ekspluatatsiya sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Operation of ship power plants]. N. Novgorod, Izdatelstvo FGOU VPO "VGAVT", 2010, 75 p.
4. TU 0272-048-00151638-01 *Gazy uglevodorodnye szhizhenyye. Tekhnicheskie usloviya, s izm Nos. 1 — 5* [Liquefied hydrocarbon gases. Specifications. with revs Nos. 1 — 5], 2001.
5. GOST 12.1.007-76. System of labor safety standards. Harmful substances. Classification and general safety requirements. Moscow, Standartinform, 2007. 7 p. (In Russian).
6. Guidance Note NI 647 DT R00 E "LPG-Fuelled Ships — Tentative Rules" BV, 2018, 12 p.
7. Guide for Vessels Intended to Carry Compressed Natural Gases in Bulk, ABS, 2020, 227 p.
8. Rules for Classification: Ships. Part 6 Additional class notations. Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. Section 13 Gas Fuelled Ship Installations — Gas Fuelled LPG. DNV-GL, 2021, 337 p.
9. International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). International Maritime Organization, 2015, 121 p.

УДК 629.5.06

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ПО ЗАЩИТЕ ОТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ТРУБОПРОВОДАХ СУДОВЫХ СИСТЕМ

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

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

В статье приведены основные результаты научно-исследовательской работы по разработке требований по контролю вибрационного состояния трубопроводов судовых систем. Выполнен анализ различных нормативных документов (стандартов ИСО и ГОСТ Р, отраслевых стандартов нефтегазовой промышленности и судостроительной отрасли, Правил классификационных обществ) в части требований по контролю вибрации трубопроводов. Рассмотрены и проанализированы различные виды повреждений судовых трубопроводов по причине воздействия вибрации. Показано, что в условиях эксплуатации на механизмы и трубопроводы судовых систем действует комплекс статических и динамических нагрузок и совокупность воздействия этих нагрузок определяет уровень вибрации в системе «механизм — трубопровод». Предложен критерий обеспечения защиты судовых трубопроводов от возникновения резонанса и рекомендации для отстройки от резонансных частот. Разработаны и сформированы требования к контролю вибрации судовых трубопроводов как дополнения для включения в 1.4 части VIII «Системы и трубопроводы» Правил классификации и постройки морских судов.

Ключевые слова: судовые трубопроводы, собственная частота колебаний, резонансные колебания, вибрационное состояние, нормирование, контроль, оценка

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR PROTECTION AGAINST RESONANCE IN PIPING OF SHIP SYSTEMS

E.S. Golub, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: golub@cniimf.ru

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

The article presents the main results of research work on the development of requirements for monitoring the vibration state of pipelines of ship systems. The analysis of various technical regulations (ISO and GOST R standards, industry standards for the oil and gas industry and the shipbuilding industry, the Rules of Classification Societies) in terms of the requirements for pipeline vibration control has been carried out. Various types of damage to ship pipelines due to vibration exposure have been considered and analyzed. It has been shown that under operating conditions, a set of static and dynamic loads acts on the mechanisms and pipelines of ship systems, and the combination of the impact of these loads determines the level of vibration in the system "mechanism — pipeline". A criterion for ensuring the protection of ship pipelines from the occurrence of resonance and recommendations for detuning from resonant frequencies has been proposed. Requirements for the control of vibration of ship pipelines have been developed and formed to be included in 1.4, Part VIII "Systems and Pipelines" of the Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships.

Keywords: ship pipelines, natural vibration frequency, resonant vibrations, vibration state, standardization, control, evaluation

ВВЕДЕНИЕ

Наличие источников вибраций в трубопроводах энергетических установок приводит к тому, что осуществление рабочих процессов неизбежно связано с появлением переменных сил, которые отрицательно влияют на прочность и надежность трубопроводов, несущих конструкций и технологического оборудования. Статистика показывает, что более половины поломок и аварий энергетических установок обусловлено динамическими или вибрационными нагрузками [1]. Значительную часть этих отказов составляют повреждения элементов трубопроводных систем. Это обстоятельство приводит к необходимости контроля вибрации трубопроводов судовых систем.

Норвежская ассоциация морских страховщиков (The Nordic Association of Marine Insurers), более широко известная как Cefor, представляет интересы страховщиков северных стран. В своих ежегодных отчетах эта организация публикует сведения об аварийности морского флота и проводит анализ размеров страховых выплат по различным видам аварий для различных типов судов. В отчете Cefor за 2021 год [2] приводятся данные о распределении исков по видам аварий за период 2017 — 2021 гг. Из представленных данных следует, что почти половина всех исков (44 %) приходится на случаи, связанные с авариями энергетической

установки, 2 % случаев составляют пожары. Аварии, связанные с различными навигационными ошибками, в сумме составляют 38 % и плохие погодные условия отнесены к причинам всего 2 % аварий.

Несколько другая картина появляется при рассмотрении величины ущерба — на пожары приходится 15 % суммарного ущерба и 65 % суммарного ущерба по самым крупным выплатам (более 10 млн USD). При этом из отчетов Cefog прослеживается тенденция к существенному увеличению числа пожаров в машинных отделениях за последние годы. Для рассмотрения причин пожаров в машинных помещениях была создана совместная рабочая группа Cefog и МАКО, которая проанализировала данные по авариям и в 2019 году представила доклад о результатах своей работы. Рабочей группой были рассмотрены 56 случаев пожаров в машинных отделениях за период с 2008 по 2018 год. В подавляющем количестве рассмотренные аварии связаны с утечками топлива из трубопроводов низкого давления, питающими главные и вспомогательные двигатели (75 %), подавляющее большинство которых (95 %) среднеоборотные 4-тактные дизельные двигатели.

Были выделены следующие виды отказов трубопроводов, приведшие к пожару (в процентах от общего количества случаев с известной причиной):

- слабая затяжка путевых соединений трубопроводов — 27 %;
- слабая затяжка фланцевых болтов топливного насоса высокого давления — 22 %;
- усталость, вызванная вибрацией в результате неправильного закрепления труб — 22 %;
- разрыв прокладки во фланцевом соединении — 11 %;
- трещины в соединении сваркой трубы и фланца — 5 %;
- гибкие соединения — 5 %;
- несанкционированные модификации системы — 5 %;
- перелив — 3 %.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что для более 75 % утечек топлива, приведших к пожару в машинном отделении, коренной причиной является вибрация трубопровода, которая может привести как к самоотдаче резьбовых соединений, так и к усталостным трещинам. При этом в Правилах Регистра, равно как и в правилах иностранных классификационных обществ (ИКО), в настоящее время отсутствуют какие-либо указания по контролю вибрации трубопроводов. Приведенные данные послужили причиной проведения научно-исследовательской работы (НИР) по разработке требований Регистра по контролю вибрации трубопроводов судовых систем, результаты которой кратко изложены в настоящей статье.

1. ПРИЧИНЫ ВИБРАЦИИ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

При эксплуатации судов на механизмы и трубопроводы судовых систем действует комплекс статических, повторно-статических, динамических, ударных и циклических нагрузок, обусловленных конструктивно-технологическими и эксплуатационными факторами. Совокупность воздействия указанных нагрузок вызывает постоянные и переменные напряжения, оказывающие влияние на надежность судовых механизмов и трубопроводов.

Как известно из сопротивления материалов, нагрузки, приложенные к конструкции, обычно делят на статические, неизменные или медленно изменяющиеся во времени и динамические нагрузки, изменяющиеся за короткий промежуток времени. Динамическое воздействие сил приводит к возникновению ускорений и сил инерции в элементах рассматриваемого тела. При этом динамические нагрузки разделяют на ударные и циклические. Если возникающее ускорение не меняет знак во времени, то силы инерции просто следует учитывать в расчетах на прочность. Если ускорение периодически меняет знак, то появляются колебания, при которых может возникнуть явление резонанса и связанное с этим резкое увеличение напряжений и деформаций. Применительно к судовым трубопроводам нагрузки можно классифицировать как это показано на рис. 1. Эти нагрузки определяют вибрационное состояние и являются источниками вибронпряженности основных конструктивных элементов судовых систем: механизмов, трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры.

Эксплуатационные исследования [1, 3 и 4] показывают, что источниками повышенной вибрации судовых трубопроводов чаще всего оказываются пульсирующий поток рабочей среды и возмущающие силы вращающихся неуравновешенных роторов механизмов судовых систем.

Неустойчивая по амплитуде и частоте вибрация участков трубопроводов при малых возмущениях от пульсирующего потока может быть вызвана большой податливостью участков трубопроводов из-за отсутствия необходимого количества опор, недостатков их конструкции или неудовлетворительного технического состояния.



Рис. 1 Классификация нагрузок в трубопроводах судовых систем

Возникающие недопустимые напряжения, вызванные высоким уровнем вибрации, приводят к повреждениям и разрушениям трубопроводов и их элементов. Большая часть разрушений трубопроводов вызвана циклическим воздействием вибрации, приводящим к усталостным повреждениям. Ниже в этом разделе приведены основные характерные повреждения судовых трубопроводов, возникающие во время эксплуатации морских судов в результате воздействия вибрации, по информации из доступных источников [1, 3 и 4] и опыта технического наблюдения.

Повреждения по технологическим причинам

Наиболее распространенными повреждениями, связанными с дефектами изготовления и монтажа трубопровода, являются микротрещины, шероховатости, неоднородности материала в соединениях и как следствие, образование и развитие трещин. При эксплуатации трубопроводов повреждения выполняют роль концентраторов напряжений и под действием вибрационных нагрузок эти дефекты развиваются в усталостные разрушения трубопроводов.

Монтажные напряжения

Причинами монтажных напряжений является перекосом осей труб в соединениях и смещение труб относительно промежуточных опор. В результате затяжки разъемных соединений трубопроводов, выполненных с перекосом, возникают усилия, которые приводят к возникновению изгибающих и скручивающих моментов. По данным [5] монтажные напряжения нередко достигают предела текучести, особенно это актуально для труб малых диаметров. В этой работе даже предлагается нормировать монтажные напряжения в трубах на уровне $0,6 \div 0,8$ предела текучести и исходя из этого нормировать контролируемые параметры (отклонение от соосности стыкуемых труб) для оценки монтажных напряжений.

Разрушения в местах сварки

Разрушения в местах сварки имеют усталостный характер. Наиболее слабым местом являются границы сварного шва. Снижение прочности материала трубы в зоне сварного шва связано с наличием остаточных сварочных напряжений и изменением структуры материала во время сварки. Вибрация, при наличии сварочных напряжений и дефектов сварки (непроваров), выполняющих роль концентраторов напряжений, снижает усталостную прочность трубопровода. Воздействие вибрации ускоряет разрушение трубопроводов при некачественном выполнении сварного шва.

Разрушения в местах изгиба труб

Вибрационные колебания вызывают в местах изгиба трубопроводов появление трещин, которые располагаются вдоль образующей. В местах изгиба усталостные явления связаны с изменением формы поперечного сечения трубопровода. Возникновение трещин вдоль образующей на криволинейных участках от воздействия вибрации носят усталостный характер и обусловлены колебаниями внутреннего давления перекачиваемой среды.

Повреждения в местах креплений

При наличии поперечных вибраций возникают разрушения и потертости в зоне крепления трубопровода. Эти зоны располагаются около зажимов подвесок или колодок креплений и служат концентраторами напряжений, при наличии которых даже не высокий уровень вибрации может приводить к усталостным разрушениям. Усталостные разрушения трубопроводов происходят особенно быстро при возникновении резонансных колебаний.

Повреждения разъемных соединений

Негерметичность разъемных соединений является следствием вибрационных нагрузок, которые приводят к самоотдаче резьбовых соединений, раскрытию фланцевых соединений, образованию трещин в зоне развальцованной части трубы. В результате во всех перечисленных выше случаях нарушается герметичность соединений и возникает течь.

Устранение негерметичности, как правило, выполняется дополнительной затяжкой соединения. Однако при повторении и продолжении вибрационного воздействия происходит повреждение соединения.

Повреждения арматуры

При эксплуатации судовых систем на вибрационное состояние запорной, регулирующей и распределительной арматуры оказывают влияние уровень вибрации трубопровода и динамическое воздействие потока рабочей среды на элементы проточной части арматуры.

Высокий уровень вибрации трубопровода приводит к потере герметичности затвора, пропуску рабочей среды через уплотнения, разрушению клапанов. При импульсных режимах работы (открытие и закрытие) возможно появление кавитации, вихреобразования, увеличение пульсации давления, что вызывает повышение вибрации арматуры. Колебания давления пульсирующего потока рабочей среды вызывает вибрацию в клапанах, что приводит к трещинам клапанных тарелок. Воздействие высокого уровня вибрации является причиной отказов различных типов приводов дистанционного управления арматурой.

Высокое давление, коррозионные воздействия, значительный уровень статических и динамических нагрузок приводят к отказам трубопроводов судовых систем по причине высокой вибрации, что обуславливает необходимость выполнения контроля вибрации трубопроводов. Характерно, что почти все рассмотренные повреждения и разрушения, возникающие в результате воздействия вибрации на трубопроводы и его элементы проявляются в местах концентрации напряжений и коррозионно-эрозионного износа. Места этих повреждений приведены в Приложении 26 «Инструкция по освидетельствованию судовых трубопроводов» к Руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации.

2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАБОТАЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ НА ВИБРАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Анализ выполненных исследований свидетельствует, что вибрация трубопроводов судовых систем может вызываться передачей возмущений от агрегатов судовой системы через присоединенные трубопроводы и от корпусных конструкций судна через опоры трубопроводов. При этом уровни вибрации судовых трубопроводов в значительной степени зависят от режимов работы присоединенных механизмов системы. Многочисленные трубопроводы различных по своим функциям судовых систем одновременно сами являются источниками вибрации.

Поэтому вибрационное состояние следует рассматривать в связи с техническим состоянием судовых механизмов как полигармоническую вибрационную систему «механизм — трубопровод».

Опасное вибрационное состояние системы «механизм — трубопровод» связано с возникновением резонансных явлений при совпадении частот возмущающих сил с собственными частотами колебаний трубопроводов. Причем, поскольку судовые механизмы обладают широким спектром частот, возможно возбуждение нескольких резонансных режимов при действии полигармонического возбуждения.

Такие показатели технического состояния как основные диагностические признаки неисправностей, спектры вибрации и характерные частоты вибрации практически всех судовых механизмов представлены в [3]. Данные получены на основе обширных измерений вибрации во время эксплуатации морских судов.

Как уже отмечалось, главным источником вибрации судовых трубопроводов в большинстве случаев являются колебания давления пульсирующего потока рабочей среды, возбуждаемые насосами различного типа.

Основной частотой спектра вибрации центробежных насосов, вызванной гидродинамическими причинами, является лопаточная частота

$$f_{\text{л}} = n \cdot Z_{\text{л}},$$

где n — частота вращения, сек^{-1} ;
 $Z_{\text{л}}$ — число лопаток.

Работа насосов на нерасчетных режимах может вызвать срыв потока и часто сопровождается повышенной вибрацией присоединенных трубопроводов. Возможно возникновении одной или нескольких зон вращающегося срыва потока. Вибрация из-за срыва потока на нерасчетных условиях работы насоса проявляется на частотах от $f_{\text{л}} = (0,52 \div 0,92)n$ и до $f_{\text{л}} = n \cdot Z_{\text{л}} k_n$, где k_n — число ступеней насоса [3].

На частотах $f_{\text{л}} = (0,25 \div 0,43)n$ в насосах проявляются кавитационные явления. При переходе кавитации в стадию срыва возникает низкочастотная вибрация, сопровождаемая ударными воздействиями в проточной части насоса.

Основным источником вибрации насосного агрегата является ротор. Появление дисбаланса связано с неуравновешенностью деталей ротора из-за некачественного изготовления и плохой балансировки или повреждения их в эксплуатации, появления отложений. Дисбаланс вращающегося ротора приводит к появлению периодических центробежных сил, повышению уровня вибрации на частоте вращения и появлению нескольких частотных составляющих в спектре вибрации.

Колебания, связанные с взаимодействием гармонических сил неуравновешенного ротора, характерны также для электродвигателей в силу больших масс роторов.

Плунжерные насосы судовых систем могут служить источником колебаний рабочей среды и воздействия на присоединенные трубопроводы. Работа таких насосов сопровождается вибрацией приемных и нагнетательных трубопроводов. Причиной вибрации является неравномерность подачи плунжерных насосов, которая зависит от объема и числа цилиндров. Для исключения вибрации трубопроводов необходимо обеспечивать давление подпора на входе плунжерного насоса, чтобы исключить возникновение кавитации [1].

В процессе эксплуатации коррозионный и эрозионный износы деталей насосов и судовых трубопроводов, засорение трубопроводов могут привести к изменению вибрации на лопаточных частотах и в области высоких частот [3 и 4].

Чаще всего это происходит в трубопроводах систем забортной воды из-за отложений продуктов коррозии, солеотложения. Отложения в трубопроводах теплообменников приводит к увеличению их сопротивления и возрастанию напора насоса. В связи с изменением режима работы повышается вибрация насосов и присоединенных трубопроводов.

Вибрации поршневых компрессоров и присоединенных к ним трубопроводов проявляется на дискретных составляющих, кратных частоте вращения вала. Амплитуда перемещений, замеренных при работе поршневых компрессоров даже при их исправном состоянии, может достигать сотен микрон.

Основными неисправностями поршневых компрессоров, влияющими на вибрационное состояние трубопроводов, являются: нарушение или плохая балансировка коленчатого вала, расцентровка и повреждение муфт, неисправности, связанные с неуравновешенностью сил инерции второго порядка [3].

Рассматривая вибрационное состояние трубопровода можно выделить факторы, влияющие на усталостную прочность, известные из сопротивления материалов:

1. величина амплитуды колебаний переменных напряжений, возникающих в результате вибрации σ_A ;
2. статическая постоянная нагрузка σ_R , действующая в трубопроводе, обусловленная постоянно действующими нагрузками.

На величину статических нагрузок в трубопроводе повлиять сложно, так как эти напряжения зависят в наибольшей степени от назначения трубопровода. Только монтажные напряжения в трубах могут быть уменьшены при условии строгого контроля за соблюдением технологии изготовления и монтажа трубопроводов.

Величина переменных напряжений в трубах зависит от размаха колебаний напряжений в материале труб и коэффициента концентрации напряжений $K_{\text{ц}}$ в элементах труб. Поскольку уменьшение $K_{\text{ц}}$ требует изменение конструкции и технологии труб и исключения внутренних дефектов в трубах. Величина коэффициентов концентрации напряжений, встречающиеся в судовых трубопроводах требует отдельного

исследования. В результате для уменьшения вибронпряжений можно повлиять путем уменьшения размаха колебаний труб за счет исключения возникновения резонанса.

При рассмотрении вибрации трубопроводов необходимо учитывать, что повышенная вибрация элементов системы «механизм — трубопровод» может быть вызвана:

- резонансом в гидродинамической системе трубопроводной обвязки агрегата системы;
- механическим резонансом собственных частот трубопроводной системы с возбуждающими частотами (как правило, от агрегата системы);
- совместным проявлением обоих типов резонансов;
- формированием в агрегатах системы или неоднородностях (тройники, переходы, отводы, запорная и регулирующая арматура и т.п.) гидродинамических структур, инициирующих интенсивные узкополосные пульсации давления рабочей среды.

Для предотвращения возникновения опасных резонансных колебаний в системе «механизм — трубопровод» необходимо, чтобы в зоне рабочей частоты вращения не было совпадения собственных частот и частот возбуждения. Эта проблема решается методом частотной отстройки от резонанса за счет выполнения ряда мероприятий.

Очевидно, что задачей проектирования трубопроводных систем, кроме выбора основных параметров агрегатов, определения трассы и компонентов, является оптимизация числа опор и мест их расстановки по длине трубопровода [6], выбор конструкции подвесок обеспечивающих эффективную работу в широком диапазоне частот [7, 8 и 9].

3. КРИТЕРИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТСУТСТВИЯ РЕЗОНАНСА В ТРУБОПРОВОДАХ

Определение и анализ собственных частот f_i и форм колебаний судовых трубопроводов необходимо проводить для оценки опасности возникновения резонанса и принятия мер для отстройки от частот возбуждения f_{ip} .

С этой целью предложены требования по оценке частот собственных и вынужденных колебаний трубопроводов. Требования сформулированы как дополнительные пункты 1.4.7 и 1.4.8 для введения в 1.4 части VIII «Системы и трубопроводы» Правил классификации и постройки морских судов.

В пункте 1.4.7, содержащем требования к защите трубопроводов от резонансных колебаний, приводится условие, по которому трубопроводы судовых систем должны быть защищены от резонанса путем отстройки собственных частот колебаний трубопровода f_i от частот возбуждающих нагрузок f_{ip} . В случае возникновения во время швартовных или ходовых испытаний судна на каких-либо режимах эксплуатации недопустимых уровней вибрации трубопроводов, должны быть приняты меры по исключению возникновения резонанса.

Критерием обеспечения защиты судовых систем от резонанса является выполнение условия (1)

$$f_{ip}/f_i \leq 0,75 \text{ или } f_{ip}/f_i \geq 1,3, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ — форма колебаний трубопровода (номер гармоники).

Для снижения напряжения в трубопроводах судовых систем в пункте 1.4.7 приводятся следующие рекомендации.

При необходимости отстройки собственных частот колебаний трубопровода f_i от частот возбуждающих нагрузок может проводиться путем изменения расстояния между опорами или другими доступными методами:

- выбором типа опор и подбором их жесткости;
- изменением расположения сосредоточенных масс при их наличии;
- изменением конфигурации трубопровода за счет спрямления и уменьшения поворотов;
- варьированием диаметром трубопровода.

Для отстройки от резонанса могут применяться упругие опоры с целью уменьшения жесткости трубопроводной системы и снижения собственных частот колебаний трубопровода f_i .

При этом сосредоточенные массы, имеющие самостоятельные опоры, следует рассматривать как разделители трубопроводной системы на отдельные пролеты с заделками в местах присоединения.

Расчет частот собственных колебаний трубопровода f_i и частоты возбуждающих нагрузок f_{ip} выполняется согласно Рекомендациям по расчету частот собственных колебаний и частот возбуждающих нагрузок трубопровода, которые должны войти в приложение 2 к части VIII «Системы и трубопроводы» Правил

классификации и постройки морских судов или определяются другими, согласованными с Регистром методами.

В пункте 1.4.8, содержащем требования к контролю и оценке вибрационного состояния трубопроводов, устанавливается, что параметры вибрационных колебаний контролируются измерениями на трубопроводах судовых систем во время швартовых, приемо-сдаточных испытаний и по мере необходимости во время эксплуатации судна.

При контроле вибрации трубопроводов с целью оценки вибрационного состояния и выявления причин повышенных уровней вибрации необходимо проводить контроль уровня вибрации присоединенного оборудования.

Методология Рекомендаций по расчету частот собственных колебаний и частот возбуждающих нагрузок трубопровода предусматривает расчет собственных частот колебаний трубопровода f_i по стержневой схеме, с учетом массы рабочей среды и изоляции, что соответствует методу расчета, который используется отечественными стандартами [10 — 13] и рекомендациями DNV [14].

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ЧАСТОТ ВОЗБУЖДАЮЩИХ НАГРУЗОК ТРУБОПРОВОДА

Для трубопроводов с постоянным поперечным сечением на двух опорах собственная частота f_i (Гц), соответствующая i -той форме собственных колебаний, определяется по формуле (2)

$$f_i = \frac{k_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{EI/m}, \quad (2)$$

где k_i — частотный коэффициент, зависящий от условий закрепления трубопровода и формы колебаний (см. таблицу);
 L — длина трубопровода между опорами, м;
 m — погонная масса трубопровода с учетом изоляции и рабочей среды, кг/м;
 E — модуль продольной упругости материала, МПа;
 I — момент инерции поперечного сечения трубы, м⁴;
 $I = \pi(D_n^4 - D_b^4)/64$,
 где D_n — наружный диаметр трубы, м;
 D_b — внутренний диаметр трубы, м.

Основные расчетные схемы и значения частотного коэффициента k_i для однопролетных трубопроводов приведены в таблице.

Таблица

Частотные коэффициенты k_i для расчета собственных частот колебаний трубопровода

Расчетная схема трубопровода	Формулы расчета k_i , где $i = 1, 2, 3$	Значение k_i для частоты		
		первой	второй	третьей
Свободно лежащая на опорах труба (шарнир-шарнир)	πi	3,14	6,28	9,42
Один конец зашце́млен, а другой свободно лежит на опоре (шарнир-заделка)	$\pi(i + 0,25)$	3,93	7,07	10,21
Оба конца зашце́млены (заделка-заделка)	$\pi(i + 0,5)$	4,71	7,85	11,0
Один конец зашце́млен, другой — свободный конец (консоль)	для $i = 1$	1,88	—	—
	для $i = 2, 3$	—	4,7	7,86
Примечание. В судовых условиях:				
заделка — неподвижная опора с зашце́млением от поворота, фиксирующая расположение трубы к корпусным конструкциям и оборудованию с помощью фланцевых соединений или сваркой (переборочные стаканы, донно-бортовые патрубки, фланцевое подсоединение к механизмам, теплообменным аппаратам, цистернам и т.п.);				
шарнир — неподвижная опора без зашце́мления от поворота, допускает свободный поворот трубопровод;				
свободный конец — участок или соединительная деталь (компенсаторы различной конструкции) для восприятия деформаций трубопровода за счет своей податливости.				

Частоты возбуждающих нагрузок, генерируемые поршневыми и центробежными машинами f_{ip} , определяются согласно (3):

$$f_{ip} = i \cdot m \cdot n / 60, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ — форма колебаний трубопровода (номер гармоники);

n — частота вращения вала, об/мин;

m — число цилиндров поршневых машин или число рабочих элементов насосов (зубьев шестеренных, лопаток центробежных и вихревых, пластин шиберных насосов, для винтовых насосов $m = Z_{\text{зах}} Z_{\text{в}}$, где $Z_{\text{зах}}$ — число заходов винта, $Z_{\text{в}}$ — число винтов).

При определении собственных частот сложных разветвленных трубопроводов следует представить как совокупность однопролетных трубопроводов. Для разветвленных судовых систем допускается использование расчетных методик на основе компьютерных программ, согласованных с Регистром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет собственных частот судовых трубопроводов необходим для того, чтобы рационально определять расстояния между опорами труб и защитить трубопроводы от возникновения резонанса. Разработанные технические требования позволяют осуществить защиту судовых трубопроводов от возникновения вибрационного резонанса при проектировании, во время приемки и на ранней стадии эксплуатации судна.

Требования по контролю и защите судовых трубопроводов от резонансных колебаний, планируется включить в главу 1.4 части VIII «Системы и трубопроводы» Правил классификации и постройки морских судов, что позволит выполнять модальный анализ для определения собственных частот трубопроводов судовых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин А.А. Вибрация трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. М.: Энергия, 1979, 288 с.
2. The Nordic Association of Marine Insurers. Annual report 2021. Электронный ресурс. URL: <https://cefor.no/globalassets/documents/about-cefor/annual-report/cefor-annual-report-2021.pdf> (дата обращения: 23.12.2022).
3. Розенберг Г.Ш. Вибродиагностика: монография / Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др.; под ред. Г.Ш. Розенберга. СПб.: ПЭИПК, 2003, 284 с.
4. Попков В.И., Мышинский Э.Л., Попков О.И. Виброакустическая диагностика в судостроении. (2-е изд.). Л.: Судостроение, 1989, 256 с.
5. Петров Н.В. Индустриальные методы монтажа судового оборудования на основе цифровых технологий. СПб.: АО «ЦТСС», 2019, 157 с.
6. Шурпяк В.К. Сравнение требований нормативных документов по установке опор и подвесок судовых трубопроводов. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. № 35. 2012, с. 123 — 135.
7. Волкова Н.В., Голованов В.И., Никишов С.Ю. Эффективные подвески для судовых трубопроводов малых диаметров. Выступление на XXVII сессии РАО. Санкт-Петербург, 16 — 18 апреля 2014 года.
8. Железнов Е.П. Виброизолирующие подвески корабельных трубопроводных систем. Морской вестник. № 2 (54), 2015г. с. 9
9. Шинкаренко И.А., Сутырин В.И. Эффективная виброизолирующая подвеска судового трубопровода. Научный журнал «Известия КГТУ». № 53, 2019, с. 193 — 201.
10. ГОСТ 32388-2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и технологические воздействия.
11. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах.
12. РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов.
13. СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
14. DNV-RP-D101. Structural analysis of piping systems, Edition July 2017. Электронный ресурс. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/dnvg1-rp-d101-structural-analysis-of-piping-systems-64f8fb.html> (дата обращения: 02.02.2023).

REFERENCES

1. Samarin A.A. *Vibratsiya truboprovodov energeticheskikh ustanovok i metody ikh ustraneniya* [Vibration of pipelines of power plants and methods for their elimination]. Moscow: Energy, 1979, 288 p.
2. The Nordic Association of Marine Insurers. Annual report 2021. URL: <https://cefor.no/globalassets/documents/about-cefor/annual-report/cefor-annual-report-2021.pdf> (accessed on: 23.12.2022).
3. Rozenberg G.Sh., Madorsky E.Z., Golub E.S. etc. *Vibrodiagnostika* [Vibrodiagnostics]. St. Petersburg. PEIPC, 2003, 284 p.
4. Popkov V.I., Myshinsky E.L., Popkov O.I. *Vibroakusticheskaya diagnostika v sudostroenii* [Vibroacoustic diagnostics in shipbuilding. 2nd edition]. Leningrad: Shipbuilding, 1989, 256 p.
5. Petrov N.V. *Industrialnye metody montazha sudovogo oborudovaniya na osnove tsifrovyykh tekhnologiy* [Industrial methods of installation of ship equipment based on digital technologies]. St. Petersburg: JSC "CTSS", 2019, 157 p.
6. Shurpyak V.K. *Sravnenie trebovaniy normativnykh dokumentov po ustanovke opor i podvesok sudovykh truboprovodov* [Comparison of the requirements of normative documents for the installation of supports and hangers of ship pipelines.] Research Bulletin of the Russian Maritime Register of Shipping No. 35. 2012. pp. 123 — 135.
7. Volkova N.V., Golovanov V.I., Nikishov S.Yu. *Jefferktivnye podveski dlja sudovykh truboprovodov malyykh diametrov* [Efficient hangers for small diameter marine pipelines.] Presentation at XXVII session of the Russian Academy of Education, St. Petersburg, April 16 — 18, 2014
8. Zheleznov E.P. *Vibroizoliruyushchie podveski korabelnykh truboprovodnykh sistem* [Vibration-isolating hangers for ship pipeline systems]. Marine Bulletin No. 2 (54), 2015, p. 9
9. Shinkarenko I.A., Sutyryn V.I. *Vibroizoliruyushchie podveski korabelnykh truboprovodnykh sistem* [Efficient vibration-isolating suspension of the ship's pipeline.] Scientific journal "Izvestiya KSTU" No. 53, 2019, pp. 193 — 201.
10. GOST 32388-2013. Technological pipelines. Norms and Methods for Calculating Strength, Vibration and Technological Impacts. (In Russian)
11. GOST 32569-2013. Technological steel pipelines. Requirements for the device and operation in explosive and chemically hazardous industries. (In Russian)
12. RTM 38.001-94. Guidelines for calculating the strength and vibration of technological steel pipelines. (In Russian)
13. SA 03-003-07. Strength and vibration calculations of steel process pipelines. (In Russian)
14. DNV-RP-D101. Structural analysis of piping systems, edition July 2017. Webpage. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/dnvgl-rp-d101-structural-analysis-of-piping-systems-64f8fb.html> (accessed on: 02.02.2023).



НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 629.563.2

ПРИМЕНЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК НА СООРУЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА РОССИИ

О.А. Григорьева, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: grigoryeva.oa@rs-class.org

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

А.С. Большев, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, e-mail: bolshev_as@spbstu.ru

С.А. Фролов, канд. техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, e-mail: frolov_as@spbstu.ru

В статье представлено описание подходов к учету нагрузок на морские сооружения в Правилах ПБУ/МСП Регистра, в том числе случайных нагрузок от ветра и волнения при детерминистическом и вероятностном подходе, особенности расчета ледовой нагрузки. Приводятся результаты расчета ледовой нагрузки на морские стационарные сооружения по правилам Регистра и сравнение их с данными других источников. Обсуждается опыт применения правил Регистра при компьютерном моделировании морских сооружений и внешних нагрузок, и направление развития Правил ПБУ/МСП Регистра в области формирования новых подходов к обоснованию проектных решений на основе математического моделирования поведения цифровых двойников морских сооружений под действием случайно изменяющихся во времени природных нагрузок на протяжении длительных интервалов времени.

Ключевые слова: волновые и ледовые нагрузки; морские сооружения и платформы; ветро-волновые режимы; вероятностное моделирование

APPLICATION OF NORMATIVE DOCUMENTS OF RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING IN DETERMINATION OF EXTERNAL LOADS FOR THE RUSSIAN CONTINENTAL SHELF OFFSHORE STRUCTURES

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

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

A.S. Bolshev, DSc, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU),
St. Petersburg, e-mail: bolshev_as@spbstu.ru

S.A. Frolov, PhD, assistant professor, SPbPU, St. Petersburg, e-mail: frolov_as@spbstu.ru

The article presents a description of the approaches to accounting for the impact on offshore structures in the MODU/FOP Register Rules, including random phenomena from wind and waves with a deterministic and probabilistic approach, and features of the calculation of ice loads. The results of calculation of ice load on fixed offshore structures in accordance with the Register rules and comparison of the data with other sources have been presented. The experience of applying the Register rules in computer modeling of marine offshore structures and external loads, as well as the direction of development of the MODU/FOP Register Rules in the field of developing of new approaches to justifying design solutions based on mathematical modeling of the digital twins of offshore structures behavior under the influence of randomly changing natural loads over long time intervals have been discussed.

Keywords: wave and ice loads; offshore structures and platforms; wind wave regimes; probabilistic modeling

ВВЕДЕНИЕ

В связи с освоением шельфа морей России, Регистром в 1979 году были изданы Правила классификации и постройки плавучих буровых установок [1], а в 2001 году — Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ [2], (Правила ПБУ/МСП). Периодически Правила ПБУ/МСП обновляются в соответствии с международными требованиями и результатами научно-исследовательских работ, выполненных по заказу Регистра, и устанавливают требования, являющиеся специфичными для ПБУ и МСП, учитывают рекомендации Кодекса ИМО по конструкции и оборудованию ПБУ (2009 MODU Code) [3]. В Правилах учтены унифицированные требования, интерпретации и рекомендации Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) и соответствующие резолюции Международной морской организации (ИМО).

Требования и рекомендации к определению внешних нагрузок на сооружения континентального шельфа приводятся в части II «Корпус» Правил ПБУ/МСП. Главной особенностью Правил Регистра является последовательное внедрение элементов вероятностного подхода к определению внешних нагрузок с использованием физически обоснованных расчетных соотношений. Большинство внешних сил, представляющих наибольшую угрозу для морских сооружений (например, нагрузки от ветра, волнения и ледовых образований) носит случайный характер. В этой связи для обеспечения безопасности создаваемых морских объектов необходимо учитывать случайный характер внешних воздействий, возможные сочетания случайных сил разной физической природы, а также реакцию самого сооружения на эти внешние воздействия. В решении практических инженерных задач для достижения этой цели обычно используются детерминированные подходы с элементами вероятностного анализа и численные подходы, в полной мере реализующие возможности вероятностного подхода.

При детерминистическом подходе случайные величины задаются, как правило, в виде некоторых экстремальных значений, соответствующих сценариям действия природных нагрузок на сооружение, которые могут реализоваться в течение жизненного цикла эксплуатации этого сооружения. Инженерный анализ при таком подходе должен предусматривать проверку выполнения критериев безопасности функционирования сооружения при всех возможных сценариях взаимодействия его с внешней средой.

При вероятностном подходе случайные величины описываются при помощи законов теории вероятности. При этом инженерный анализ должен обеспечить описание поведения сооружения под действием переменных во времени и случайных по своему характеру внешних воздействий в течение длительного временного интервала, достаточного для оценки безопасности и надежности функционирования морского сооружения.

В существующих Правилах Регистра детерминированные подходы с использованием вероятностных оценок параметров внешних нагрузок нашли широкое применение, а методы вероятностного моделирования обозначены как перспективные подходы для инженерного анализа.

1. НАГРУЗКИ ОТ ТЕЧЕНИЯ

В Правилах ПБУ/МСП приводятся основные требования к учету нагрузок от течения и предлагается формула для построения профиля течения при отсутствии сведений о профиле течения в районе эксплуатации. Расчет нагрузки от течения выполняется, обычно, с учетом площади подводной парусности корпуса сооружения, его скоростного коэффициента сопротивления и постоянной во времени скорости движения жидкости.

2. НАГРУЗКИ ОТ ВОЛНЕНИЯ И ВЕТРА

Если динамикой платформы можно пренебречь (обычно это справедливо, когда период собственных колебаний сооружения не превышает 3 с), расчетная волновая нагрузка может быть определена при помощи детерминистической расчетной волны. Расчетная волна представляет собой регулярную двумерную волну, которая распространяется, не деформируясь [4].

В основе детерминистического подхода к расчету нагрузок от волнения, в Правилах ПБУ/МСП предлагается использовать высоту волны с учетом повторяемости 100 лет, т.е. так называемую столетнюю волну H_{100} . Для того, чтобы определить максимальную реакцию необходимо исследовать диапазон волновых периодов. Этот подход полностью коррелируется с подходом, изложенным в отечественном СП 38.13330 [5]. Следует отметить, что нормы СП 38.13330 [5] ориентированы на морские гидротехнические сооружения, длительность эксплуатации которых не менее 20 лет. В этом случае использование параметров волны 100-летней повторяемости выглядит вполне оправданной. В Правилах Регистра предполагается, что платформы ПБУ/МСП также эксплуатируются длительное время, если платформы типа ППБУ устанавливаются в акватории, на один сезон, для расчета системы закрепления допускается использовать нагрузки с периодом повторяемости 10 лет.

Если динамикой платформы нельзя пренебречь (обычно это справедливо, когда период собственных колебаний сооружения больше 3 с), расчетная волновая нагрузка может быть определена по теории случайных, нерегулярных волн [4].

Наиболее предпочтительным в этом случае является вероятностный анализ, основанный на использовании нерегулярного описания волнения, в основе которого лежит энергетический спектр, характеризующийся высотой волны и периодом волнения [6].

Исследование поведения морского сооружения под действием нерегулярного волнения позволяет выявить его резонансные колебания в различных степенях свободы и на разных частотах, что обеспечивает наиболее адекватную оценку его безопасности в реальных условиях эксплуатации.

Аналогичные подходы используются и при инженерном анализе ветровых воздействий на сооружения континентального шельфа. При детерминированном подходе принимается условно постоянная средняя расчетная скорость ветра с принятой повторяемостью и временем осреднения. В Правилах Регистра предлагаются также зависимости для учета изменения скорости ветра по высоте.

В ряде случаев, когда собственные частоты сооружения попадают в диапазон спектра ветра, ветровые порывы способны вызвать значительные колебания сооружения, которые влияют на оценку его безопасности. В этом случае необходимо исследовать динамику сооружения, моделируя временную диаграмму ветровой скорости с учетом случайно изменяющихся ветровых порывов. В Правилах Регистра предложен спектр Давенпорта для описания продольных пульсаций скорости ветра, который может быть использован для этой цели.

Сведения о характеристиках ветро-волновых условий отдельных морей приведены в приложении к Правилам ПБУ/МСП и в справочниках по режимам ветра и волнения на морях, которые Регистр выпускает начиная с 1962 года [7].

С середины 70-х гг. XX в. для изучения режима ветра и волнения стали привлекаться инструментальные измерения с автоматических буев и буровых установок, однако эти данные относились, в основном, к прибрежным районам. С 1975 год начались спутниковые измерения волнения, которые позволили создать в 1996 году первые атласы по режиму волнения по спутниковым данным [8], эти данные отражают пространственно-временную изменчивость режима волнения больших акваторий [7].

В настоящее время на сайте Регистра размещены справочники нового поколения (на основе спутниковых измерений волнения) по волновому климату Балтийского, Северного, Черного, Азовского, Средиземного, Японского, Карского, Берингова, Белого, Баренцева морей [7], [9], [10], [11], [12], выпущенные по результатам НИР по заказу Регистра.

В справочниках приведены данные о экстремальных скоростях ветра по 8 румбам, с различной повторяемостью, временем осреднения; длительности штормов, повторяемости разной скорости ветра по 8 румбам; данные по периодам, высотам и длинам волн с различной повторяемостью и обеспеченностью; повторяемость высот волн, движущихся с разных направлений; совместная повторяемость высот волн и средних периодов волнения.

В целом, справочная информация Регистра позволяет найти все данные для описания режимов экстремальных ветро-волновых воздействий на сооружения континентального шельфа в морях, омывающих Россию.

Правила Регистра, обеспечивающие создание и эксплуатацию сооружений континентального шельфа, формировались и длительное время развивались, опираясь на аналитические методы анализа поведения этих сооружений. К сожалению, возможности таких подходов не безграничны, и в последние десятилетия все большее значение приобретают численные подходы, с помощью которых решаются важные инженерные задачи.

В настоящее время генеральное направление в развитии инженерных методов анализа поведения создаваемых сооружений связано с созданием цифровых двойников проектируемых объектов, погружением их в виртуальную среду, имитирующую все многообразие и изменчивость природных воздействий, математическое моделирование поведения сооружения под действием природных нагрузок, и совершенствованием конструкции для безусловного обеспечения безопасности и надежности работы сооружения в течение их жизненного цикла. В рамках правил Регистра, при обосновании проектных решений такой подход может реализовываться с помощью специализированных программных средств, получивших одобрение Российского морского регистра судоходства.

На примере использования одного из таких программных комплексов [13], можно наблюдать ряд новых инженерных подходов, возникающих при проектировании, постановке и эксплуатации сооружений континентального шельфа. В частности, в рамках аналитических соотношений, используемых в правилах Регистра и СП 38.13330.2018 [5], можно рассчитать волновые нагрузки только на сооружения с характерным размером, значительно меньшим длины волны. Для многих сооружений типа МСП или ПБУ это условие не выполняется, и для расчета с учетом дифракции, предлагаются поправочные коэффициенты. При этом в Правилах ПБУ/МСП предлагается использовать для расчета волновых нагрузок пакет программ ANCHORED STRUCTURES, одобренный Регистром, в котором реализуется численное решение задач дифракции, а также возможен расчет волновых нагрузок от волн конечной высоты.

Проблемы адекватного описания поведения подвижных сооружений на нерегулярном волнении или при постановке стационарных объектов на морское дно возникают из-за зависимости гидродинамических характеристик сооружений от частоты их колебаний и расстояния от корпуса сооружения до иных объектов (или морского дна). Эта проблема преодолевается только в рамках численных моделей, путем введения так называемых ретардационных функций, перехода от дифференциальных уравнений движения сооружения к интегро-дифференциальным уравнениям и численного их интегрирования.

Использование программных средств открывает новые возможности и для реализации вероятностных подходов. Например, с помощью упомянутого выше программного комплекса [13], можно в пакетном режиме промоделировать поведение сооружения континентального шельфа во всех условно стационарных режимах, отражающих изменчивость ветро-волновых условий в акватории функционирования сооружения, статистически обработать временные реализации всех важных параметров, характеризующих его поведение, и сформировать общие статистики по всем параметрам применительно к жизненному циклу сооружения.

Следует отметить, что формирование совокупности ветро-волновых режимов, содержащих спектры ветрового и волнового воздействия, направление действия волнения и ветра, а также вероятность каждого режима, может опираться на справочные данные Регистра. Однако, форма представления результатов [7], [9], [10], [11], [12], ориентирована преимущественно на экстремальные статистики, в дальнейшем планируется развитие методики применения справочных данных для полновероятностного моделирования.

Еще одна совершенно новая возможность использования программных средств связана с проектированием якорных систем удержания. В Правилах ПБУ/МСП указано, что проектируемая система удержания плавучего сооружения должна обеспечивать нормативные коэффициенты запаса по натяжению якорных линий. С помощью программных средств [14], [15], используя цифровой двойник сооружения и подвергая его воздействию течения, нерегулярных воздействий от ветра и волнения, действующих с различных направлений, создана процедура формирования оптимальных параметров системы удержания, обеспечивающая наибольшие запасы по натяжению якорных линий в условиях выживания и наиболее широкий диапазон допустимых внешних воздействий для обеспечения безопасной работы в эксплуатационных условиях. В рамках численного подхода удастся также учесть динамику якорных линий, что ранее не удавалось при использовании аналитических расчетных соотношений.

Указанные численные подходы уже нашли широкое применение в практике обоснования проектных решений [16].

3. ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ

Правила Регистра по ледовым нагрузкам содержат расчетные соотношения, позволяющие вычислить нагрузки на сооружения вертикального профиля, конусные и многоколонные сооружения от ровных или торосистых ледяных образований. В Правилах ПБУ/МСП также приводятся рекомендации для учета локальных ледовых нагрузок.

Поскольку расчетные соотношения содержат параметры, имеющие случайный характер, в Правилах указано, что сочетания этих параметров должны иметь столетнюю повторяемость. В Правилах также отмечается допустимость полновероятностного моделирования взаимодействия ледовых образований с сооружением, но более подробные рекомендации по этому моделированию пока не представлены.

Следует отметить, что повторяемость относится именно к совокупности значения параметров, так как ряд из них коррелирован и их нельзя рассматривать как независимые. Например, наибольшую прочность льды имеют, как правило, в начале зимы, когда их толщина относительно невелика. Максимальная толщина льда встречается в начале лета, когда прочность льда резко уменьшается. В этой связи использование одновременно значений толщины и прочности льда столетней повторяемости приводит к неоправданному завышению материалоемкости и стоимости создаваемых сооружений. В практике проектирования в последнее время используются параметры льдов, привязанные к тому или иному месяцу года, чтобы учесть корреляцию этих параметров и создать набор сочетаний для определения худших расчетных случаев.

Ввиду изменчивости параметров льдов, сложности физических процессов их разрушения при взаимодействии с сооружением в мировой практике было создано много различных методик вычисления ледовых нагрузок, результаты которых нередко отличались на сотни процентов. В этой связи выбор расчетных соотношений для вычисления ледовых нагрузок, рекомендуемых Регистром, имел особое значение.

4. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ НОРМАМИ РС

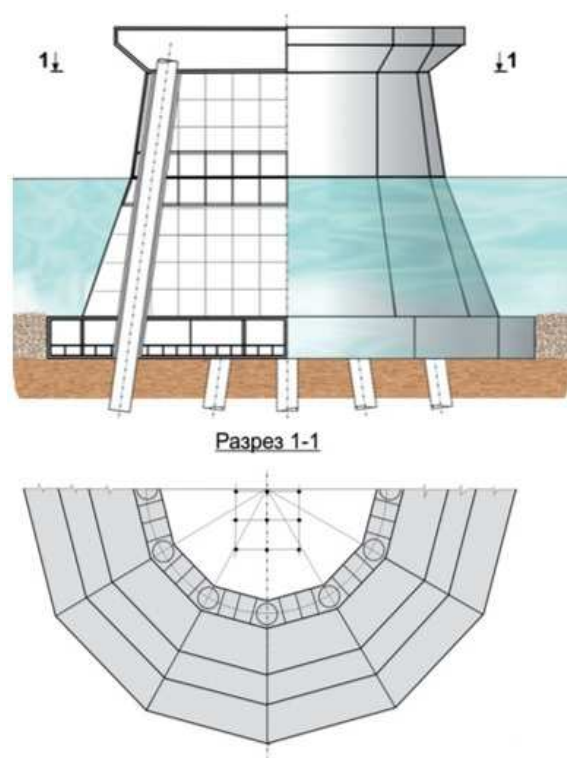
Требования к ледовым нагрузкам в Правилах ПБУ/МСП созданы на основании требований к учету ледовых нагрузок в международном стандарте ISO 19906 [17], адаптированных для условий российского шельфа (введен коэффициент формы опоры в плане в направлении движения льда, поправочные коэффициенты на скорость движения льдов, размеры сооружения, и также методика позволяет задавать прочность льда, соответствующую проектным данным). В методике ISO 19906 [17] для определения ледового давления используется усредненный региональный коэффициент прочности льда, для арктических морей, субарктических и умеренных, являющийся консервативным [17].

Основным отличием методики расчета ледовых нагрузок по Правилам ПБУ/МСП является учет различных сценариев взаимодействия льда с сооружением: режим прорезания, режим остановки и режим торшения. Итоговая глобальная ледовая нагрузка выбирается после сравнения нагрузок для всех режимов.

В статье [18] приводится сравнение значений ледовой нагрузки определенной по различным нормативным документам для двух одноопорных платформ с основанием разного диаметра: платформы Моликпак и ледостойкого блока-кондуктора (ЛБК), являющегося малогабаритной платформой для бурения эксплуатационных скважин и работающего в автоматическом безлюдном режиме (см. рис. 1), для условий двух месторождений: Северо-Каменномысского газового месторождения (СКГМ), расположенного в Обской губе, являющейся самым крупным заливом Карского моря, и Киринского газового месторождения (КГМ), расположенного в Охотском море, на шельфе острова Сахалин (см. рис. 2). В статье отсутствует пример расчета по Правилам ПБУ/МСП, но есть все исходные данные для его проведения (см. табл. 1). Сравнение результатов выполненных расчетов по Правилам ПБУ/МСП и другим нормативным документам по данным статьи [18], приведено на рис. 3 — 6. С учетом того, что в статье [18], не указан режим взаимодействия льда и сооружения, использовались данные для режима прорезывания, как наиболее часто используемого в расчетах. Как видно на рис. 3 — 6, ледовая нагрузка, полученная в результате расчетов по Правилам ПБУ/МСП, достаточно хорошо совпадает с результатами расчетов по другим нормативным документам.



Платформа «Моликпак», с опорным основанием диаметром 82,3 м



Ледостойкий блок-кондуктор, диаметром 21,3 м

Рис. 1 Примеры сооружений [18]

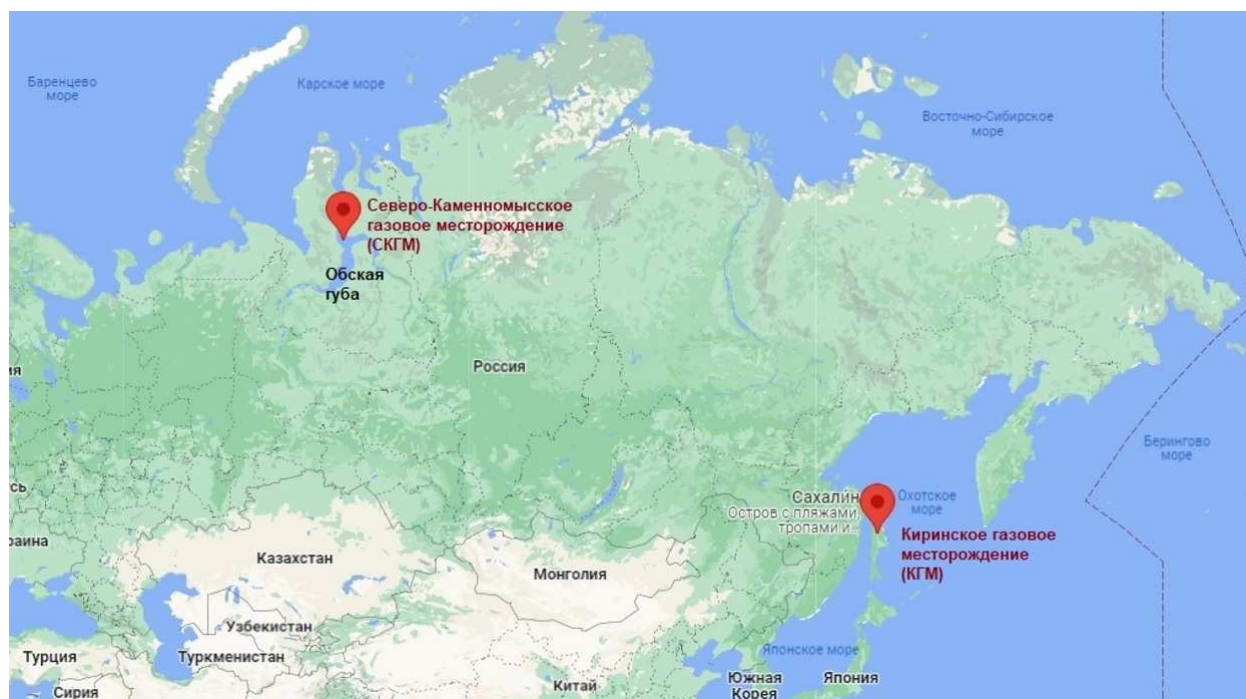


Рис. 2 Расположение месторождений СКГМ и КГМ на карте

Таблица 1

Основные расчетные параметры ледового режима [18]

Характеристика ледового покрова	Значение параметра для СКГМ	Значение параметра для КГМ
Средняя толщина ровного льда (май), м	1,4	1,8
Средняя прочность льда на одноосное, МПа	2,06	2,63
Средняя скорость дрейфа, м/с	0,4	0,5
Плотность ровного льда, кг/м ³	0,00082	0,00091
Площадь ледяного поля, км ²	2,0	2,0



Рис. 3 Нормативная ледовая нагрузка от воздействия ровного ледяного поля на платформу Моликпак, с опорным основанием диаметром 82,3 м, для условий КГМ (шельф о. Сахалин), МН



Рис. 4 Нормативная ледовая нагрузка от воздействия ровного ледяного поля на платформу Моликпак, с опорным основанием диаметром 82,3 м, для условий СКГМ (Обская губа), МН



Рис. 5 Нормативная ледовая нагрузка от воздействия ровного ледяного поля на ледостойкий блок-кондуктор, диаметром 21,3 м, для условий КГМ (шельф о. Сахалин), МН



Рис. 6 Нормативная ледовая нагрузка от воздействия ровного ледяного поля на ледостойкий блок-кондуктор, диаметром 21,3 м, для условий СКГМ (Обская губа), МН

Расчетные соотношения, позволяющие вычислить ледовые нагрузки на сооружения континентального шельфа, как в российских, так в зарубежных нормативных документах основываются на квазистатических моделях разрушения льда. Между тем динамические аспекты взаимодействия ледовых образований нередко оказываются весьма значимыми и при проектировании стационарных ледостойких сооружений и, в особенности, при создании податливых (заякоренных) сооружений, работающих в ледовых условиях. Для инженерного анализа ледовых нагрузок в динамической постановке, как и в случае ветро-волновых воздействий, необходимо использовать численные подходы, основанные на использовании цифровых двойников сооружения и моделировании внешних воздействий.

Опыт применения программных продуктов, одобренных Регистром, показывает возможности решения инженерных задач, связанных с численным динамическим определением ледовых нагрузок на сооружения различной формы [19], [20], оценкой динамических эффектов при взаимодействии ровных и торосистых льдов с заякоренными сооружениями [21], вероятностным моделированием взаимодействия айсбергов с

судном, оснащенным поворотной турелью [22], а также определением ледовых нагрузок в полновероятностной постановке [23], [24].

Следует отметить, что реализация полновероятностных подходов при определении ледовых нагрузок, как правило, затруднена в связи с отсутствием систематизированных исходных данных по параметрам и статистическим характеристикам ледовых образований, с которыми сооружение может взаимодействовать, будучи установленным в той или иной точке мирового океана.

5. УСТОЙЧИВОСТЬ НА ГРУНТЕ

Для морских стационарных платформ актуальным является вопрос устойчивости сооружения на грунте. В Правилах ПБУ/МСП приведены, главным образом, принципиальные положения, связанные с данным вопросом, которые необходимо учитывать в расчетах. Более детальная проработка может быть проведена на основе российских нормативных документов в области проектирования гидротехнических сооружений.

ВЫВОДЫ

Требования и рекомендации к расчетным нагрузкам в Правилах ПБУ/МСП соответствуют современным подходам. Правила не ограничивают проектировщика жесткими рамками, дают основные рекомендации по проведению расчетов. Такой подход наиболее оправдан при проектировании уникальных сооружений в условиях сложных нерегулярных динамических нагрузок.

Дальнейшее развитие Правил ПБУ/МСП планируется как в области уточнения существующих рекомендаций по использованию детерминированных расчетных соотношений, так и в области формирования новых подходов к обоснованию проектных решений на основе математического моделирования поведения цифровых двойников морских сооружений под действием случайно изменяющихся во времени природных нагрузок на протяжении длительных временных интервалов, соответствующих реальным ситуациям, тем или иным этапам эксплуатации сооружения или продолжительности жизненного цикла сооружения.

Планируется развитие методики применения справочных данных для полновероятностного моделирования совокупности ветро-волновых режимов (при совместном действии ветра и волнения в заданном направлении), содержащих спектры ветрового и волнового воздействия, направление действия волнения и ветра, а также вероятность каждого режима.

Также планируется внедрение в Правила ПБУ/МСП процедуры оптимального автоматического подбора параметров системы удержания, обеспечивающей наибольшие запасы по натяжению якорных линий в условиях выживания и наиболее широкий диапазон допустимых внешних воздействий для обеспечения безопасной работы в эксплуатационных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки плавучих буровых установок. Л.: Регистр СССР, 1979.
2. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ (ПБУ/МСП). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2001.
3. Кодекс ИМО по конструкции и оборудованию ПБУ (2009 MODU Code), принятый Ассамблеей ИМО 2 декабря 2009 года (резолюция ИМО А.1023(26), с поправками, внесенными резолюцией ИМО MSC.359 (92)), 2009.
4. Анализ СТУ для имеющихся проектов ледостойких платформ.: научно-технический отчет, этап 1 «Сопоставительный анализ результатов проектирования ледостойких платформ по западным нормативным документам и новым Правилам РМРС». СПб.: 2003.
5. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов), СНиП 2.06.04—82*, М. Стандартинформ, 2019.
6. Анализ Правил Регистра для ПБУ в свете современных требований. Уточнение концепции новой версии Правил Регистра для ПБУ. Разработка необходимых дополнений к тексту Правил: технический отчет о НИР, СПб, 2005.
7. Справочные данные по режиму ветра и волнения шельфа Баренцева и Карского морей/ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, Е.С. Чернышева — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. 334 с.
8. World Wave Atlas / Oceanor. Norway. 1996. URL: <http://oblea.oceanor.no>

9. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей./ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, А.Б. Дегтярев, В.А. Рожков — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. — 213 с.
10. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей./ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, С.В. Иванов, Е.С. Чернышева — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. — 450 с.
11. Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей./ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, Е.С. Чернышева — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009, 356 с.
12. Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей./ред. Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, Чернышева Е.С. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010, 565 с.
13. Большев А.С., Кутейников М.А., Фролов С.А. Математическое моделирование морских плавучих объектов в программном комплексе "Anchored Structures"//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 36, 2013, с. 68 — 90.
14. Большев А.С., Фролов С.А., Шонина Е.В. Оптимизация систем удержания морских плавучих заякоренных сооружений//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 62/63, 2021.
15. A. Bolshev, S. Frolov, E. Shonina Mooring system optimization for marine floating hydrotechnical structures//Magazine of Civil Engineering, 2022. 111(3). Article No. 11112.
16. Большев А.С., Фролов С.А. Математическое моделирование поведения морских объектов под действием природных нагрузок в среде ПК "Anchored Structures"//Судостроение, № 2, 2021, с. 36 — 41.
17. ISO 19906:2019. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures.
18. Ким С.Д., Финагенов О.М., Уварова Т.Э. Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран//Научно-технический сборник «ВЕСТИ ГАЗОВОЙ НАУКИ», № 3 (14), 2013.
19. Большев А.С., Фролов С.А. Математическое моделирование взаимодействия поля ровного льда с морским гидротехническим сооружением наклонного профиля // Гидротехническое строительство, № 4, 2019, с. 39 — 47.
20. Андрушин А.В., Большев А.С., Кутейников М.А., Фролов С.А. Численное моделирование поведения плавучих шельфовых сооружений под действием ровного льда // Труды 3 международной научной конференции «Полярная механика», 2016, с. 795 — 806.
21. Шхинек К.Н., Балагура С.В., Большев А.С., Фролов С.А. Математическое моделирование взаимодействия ровного льда и торосов с заякоренными плавучими сооружениями типа FPU и платформами типа SPAR//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 32, 2009, с. 93 — 108.
22. Шхинек К.Н., Гасников О.А., Большев А.С., Ставров К.Г. Результаты моделирования сценариев взаимодействия айсбергов с морскими нефтегазодобывающими комплексами // Навигация и картография, СПб.: изд. Гос. научно-исследовательского навигационно-гидрографического института, № 39, 2015, с. 25 — 32.
23. Шхинек К.Н., Большев А.С., Фролов С.А., Уварова Е.В. Вероятностное моделирование ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа для анализа их надежности и долговечности//Сборник трудов конференции "Освоение арктического шельфа России", 1999, т. 2, с. 247 — 254.
24. Шхинек К.Н., Благосидов Л.Б., Благосидова И.Л., Большев А.С., Жемойдо Ю.Г., Фролов С.А. Расчетное определение нагрузок на ЛСП-1 для обустройства месторождения им. Ю. Корчагина//Сборник трудов конференции "Освоение арктического шельфа России", 2005, с. 315 — 320.

REFERENCES

1. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units. — L.: USSR Register, 1979. (In Russian)
2. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms (MODU/FOP) — SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2001. (In Russian)
3. A. 1023 (26) Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units, 2009 (2009 MODU Code), as amended by IMO resolution MSC.359 (92)
4. *Analyz STU dlya imeyushchikhsya proektov ledostoikikh platform: nauchno-tekhnicheskyy otchet, etap 1 "Sopostavitelnyy analiz rezul'tatov proektirovaniya ledostoikikh platform po zapadnym dokumentam i novym pravilam RMRS"* [Analysis of STU for existing designs of ice-resistant platforms: scientific and technical report, stage 1 "Comparative analysis of the results of designing ice-resistant platforms according to Western regulatory documents and the new RS rules"] — SPb.: 2003.
5. SP 38.13330.2018 *Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye I ot sudov)* [Building Code 38.13330.2018 Loads and impacts on hydraulic structures (from wave, ice and ships)], Building Codes and Regulations 2.06.04-82*, M.: Standardinform, 2019.
6. *Analyz Pravil Registra dlya PBU v svete sovremennykh trebovaniy. Utochnenie kontseptsii novoy versii Pravil Registra dlya PBU/ Razrabotka neobkhodimyykh dopolneniy k tekstu Pravil* [Analysis of the Register Rules for FOP in the light of modern requirements. Refinement of the concept of the new version of the Register Rules for PBU. Development of necessary additions to the text of the Rules]: technical report on R&D — SPb.: 2005.
7. Reference data on wind and wave regime of the Barents and Kara Sea Shelf / edited by L.I. Lopatuhin, A.V. Bukhanovskiy, E.S. Chernishova — SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2013 — 334 p. (In Russian)
8. World Wave Atlas/ Oceanor. Norway. 1996. <http://oblea.oceanor.no>
9. Reference Data on Wind and Wave Climate of the Barents Sea, the Sea of Okhotsk and the Caspian Sea/edited by L.I. Lopatuhin, A.V. Bukhanovskiy, A.B. Degtyarev, V.A. Rozhkov — SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2003. (In Russian)
10. Reference Data on Wind and Wave Regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas/edited by L.I. Lopatuhin, A.V. Bukhanovskiy, S.V. Ivanov, E.S. Chernishova — SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2006. (In Russian)
11. Reference Data on Wind and Wave Regime of the Sea of Japan and Kara Sea, edited by L.I. Lopatuhin, A.V. Bukhanovskiy, E.S. — SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2009. (In Russian).
12. Reference Data on Wind and Wave Regime of the Bering and White Seas / ed. by L.I. Lopatuhin, A.V. Bukhanovskiy, E.S. Chernishova — SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2010. (In Russian)
13. Bolshev A.S., Kuteynikov M.A., Frolov S.A. *Matematicheskoe modelirovaniye morskikh plavuchikh ob'ektov v programnom komplekse "Anchored Structures"* [Mathematical modeling of marine floating objects in the software package "Anchored Structures"]//Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 36, 2013, pp. 68 — 90.

14. Bolshev A.S., Frolov S.A., Shonina E.V. *Optimizatsiya sistem uderzhaniya morskikh plavuchikh zayakorenykh sooruzheniy* [Optimization of anchoring systems of offshore floating structures], Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, Nos. 62/63, 2021.
15. Bolshev A., Frolov S., Shonina E. Mooring system optimization for marine floating hydrotechnical structures//Magazine of Civil Engineering, 2022. 111(3). Article No. 11112.
16. Bolshev A.S., Frolov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie povedeniya morskikh ob'ektov pod deystviem prirodnkh nagruzok v srede PK "Anchored Structures"* [Mathematical modeling of marine objects the behavior under the influence of natural loads in the environment of the PC "Anchored Structures"]//Sudostroenie, No. 2, 2021, pp. 36 — 41.
17. ISO 19906:2019. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures.
18. Kim S.D., Finagenov O.M., Uvarova T.E. *Opreделение ledovykh nagruzok na sooruzheniya kontinentalnogo shelfa po normam razlichnykh stran* [Determination of ice loads on the continental shelf structures according to the standards of various countries]//Scientific-Technical Collection book "Vesti Gazovoy Nauki", No. 3 (14), 2013.
19. Bolshev A.S., Frolov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya polya rovnogo lda s morskim gidrotekhnicheskim sooruzheniem naklonnogo profilya* [Mathematical modeling of the interaction of a field of even ice with a marine hydraulic structure of an inclined profile]. Journal "Power Technology and Engineering" No. 4, 2019, pp. 39 — 47.
20. Andrushin A.V., Bolshev A.S., Kuteynikov M.A., Frolov S.A. *Chislennoe modelirovanie povedeniya plavuchikh shelfovykh sooruzheniy pod deystviem rovnogo lda* [Numerical modeling of the behavior of floating offshore structures under the action of even ice]//Proceedings of the 3rd international scientific conference "Polar Mechanics", 2016, pp. 795 — 806.
21. Shkhinek K.N., Balagura S.V., Bolshev A.S., Frolov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya rovnogo lda i torosov s zayakorennymi plavuchimi sooruzheniyami tipa FPU i platformami tipa SPAR* [Mathematical modeling of the interaction of even ice and hummocks with moored FPU-type floating structures and SPAR-type platforms]//Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 32, 2009, pp. 93 — 108.
22. Shkhinek K.N., Gasnikov O.A., Bolshev A.S., Stavrov K.G. *Rezultaty modelirovaniya stsensariy vzaimodeystviya aysbergov s morskimi neftegazodobyvayushchimi kompleksami* [Modeling results of interaction between icebergs and offshore oil and gas production complexes]// Navigation and Hydrography, SPb.: published by The State Research Navigation-Hydrographic Institute (GNINGI JSC), No. 39, 2015, pp. 25 — 32.
23. Shkhinek K.N., Bolshev A.S., Frolov S.A., Uvarova E.V. *Veroyatnostnoe modelirovanie ledovykh nagruzok na sooruzheniya kontinentalnogo shelfa dlya analiza ikh nadezhnosti i dolgovechnosti* [Probabilistic modeling of ice loads on continental shelf structures to analyze their reliability and durability] // Proceedings of the conference "Development of the Arctic Shelf of Russia", 1999, vol. 2, pp. 247 — 254.
24. Shkhinek K.N., Blagovidov L.B., Blagovidova I.L., Bolshev A.S., Zhemoydo Yu.G., Frolov S.A. *Raschetnoe opredelenie nagruzok na LSP-1 dlya obustroystva mestorozhdeniya im. Yu. Korchagina* [Estimated determination of loads on LSP-1 for the development of the Yu. Korchagin field] // Proceedings of the conference "Development of the Arctic Shelf of Russia", 2005, pp. 315 — 320.

УДК 551.466.62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ЯКОРНЫХ СВЯЗЯХ ПЛАВУЧЕГО ОБЪЕКТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЛН ЦУНАМИ

Н.Д. Беляев, канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, e-mail: belyaev_nd@spbstu.ru

В.В. Лебедев, канд. техн. наук, 26 Центральный научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vladimir.v.lebedev@mail.ru

И.С. Нуднер, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, e-mail: igor_nudner@mail.ru

К.К. Семенов, канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, e-mail: semenov.k.k@gmail.com

Д.И. Щемелинин, 26 Центральный научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: dimabens@gmail.com

В работе представлены результаты опытов по физическому моделированию взаимодействия длинных волн типа цунами с плавучим хранилищем газа. Предполагается, что при транспортировке сжиженного природного газа в страны Азии такие хранилища будут размещаться в бухтах Тихого океана. Указанный регион цунамиопасен, поэтому решение задачи определения усилий в системе удержания плавучего хранилища газа от возможных волн цунами в месте базирования объектов хранения является весьма актуальным. Рассматривается влияние отдельной волны, распространяющейся под действием силы тяжести, на плавучий объект, расположенный в точке с глубиной моря меньшей, чем длина этой волны. Произведена оценка усилий в якорных связях с подвесными массивами и устройствами, моделирующими гравитационные якоря при волновом воздействии. Выполнен анализ полученных результатов. Сделаны выводы о характере изменения усилий в зависимости от ориентации плавучего объекта относительно направления воздействия волны цунами и местоположения якорной связи.

Ключевые слова: волна цунами, якорные связи, усилия, моделирование, плавучее хранилище газа

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FORCES IN THE ANCHOR SYSTEM OF A FLOATING OBJECT UNDER THE IMPACT OF TSUNAMI WAVES

N.D. Belyaev, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; St. Petersburg, e-mail: belyaev_nd@spbstu.ru

V.V. Lebedev, PhD, 26 Central Scientific Research Institute, St. Petersburg, e-mail: vladimir.v.lebedev@mail.ru

I.S. Nudner, DSc, Ustinov Baltic State Technical University "VOENMEH", St. Petersburg, e-mail igor_nudner@mail.ru

K.K. Semenov, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; St. Petersburg, e-mail semenov.k.k@gmail.com

D.I. Shchemelinin, 26 Central Scientific Research Institute, St. Petersburg, e-mail dimabens@gmail.com

The results of the physical modeling of interaction of long tsunami-type waves with a floating gas storage are presented in this article. It has been assumed that when transporting liquefied natural gas to Asian countries, such storage facilities will be located in the bays of the Pacific Ocean. This being a tsunami prone, the solution of the problem of determining the forces in anchor system of a floating storage regasification units at their locations from the action of possible tsunami waves is very important. The impact of a separate wave propagating under the action of one external volumetric force (gravity) on an anchored floating object located at a point with a sea depth less than the length of this wave has been considered. Evaluation of forces in anchor system with suspended blocks and devices simulating gravitational anchors under wave action has been made. The analysis of the results obtained has been carried out. Conclusions have been made about the nature of the force's variation depending on the orientation of the floating object relative to the direction of the impact of the tsunami wave and the maximum tsunami height, as well as the sea depth at the location of the anchor link.

Keywords: tsunami wave, anchor system, forces, physical modeling, floating gas storage

ВВЕДЕНИЕ

При освоении Северного морского пути, вывозе продукции с предприятий, размещенных в районах крайнего Севера, существует необходимость использования судов ледового класса. С другой стороны, использование таких судов для доставки грузов в страны Тихоокеанского побережья и Юго-Восточной Азии не совсем рационально. Таким образом, существует необходимость организации логистических терминалов в бухтах Тихоокеанского побережья с целью перевалки грузов с одного типа судов на другой. Одним из вариантов организации таких терминалов является создание плавучих объектов. Но размещение плавучих объектов в бухтах Тихоокеанского побережья неизбежно сталкивается с необходимостью учета воздействия на них волн цунами. К таким объектам можно отнести плавучие хранилища газа (ПХГ), раскрепленные с помощью якорной системы удержания. Размещение таких хранилищ в бухтах береговой зоны Тихого океана в настоящее время рассматривается в реализации проекта транспортировки в страны Азии сжиженного газа, получаемого на предприятиях, расположенных на побережье Северного Ледовитого океана [1, 2].

Так как проявление цунами является событием малой вероятности, то фактические данные о процессе трансформации волны цунами в пределах береговой зоны практически отсутствуют [3 — 6]. В этой связи экспериментальный метод может способствовать решению целого ряда задач устойчивости и надежности размещения плавучего объекта в бухте при воздействии на него волны цунами [7, 8].

Действующие на плавучий объект гидродинамические нагрузки вызывают перемещение объекта и, как следствие, усилия в якорных связях [9 — 11]. Для обеспечения надежной работы плавучего объекта, прочности его системы раскрепления наряду с задачей оценки нагрузок возникает задача определения усилий в якорных связях от воздействия на плавучий объект волн цунами. Таким образом для одних и тех же воздействий волн цунами на конкретный плавучий объект необходимо решить задачи, первая из которых — определение нагрузок на него, а вторая — определение усилий, возникающих в якорных связях. Решение первой задачи с помощью экспериментального метода для определенного плавучего объекта изложено в работах [12, 13]. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований по решению второй задачи, а именно по оценке усилий в якорных связях, удерживающих расположенный в бухте на определенной глубине плавучий объект, в тех же условиях воздействия волн цунами, что и при решении первой задачи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ

В настоящей работе рассматривается воздействие отдельной волны цунами высотой h и длиной λ , на плавучий объект, расположенный в точке с глубиной моря d меньшей, чем длина этой волны λ .

Для решения задачи использовался принцип физического моделирования волны цунами, воздействующей на модель плавучего объекта, удерживаемого якорными связями. Для заданного воздействия согласно указанному принципу необходимо соблюдение равенства в сходственных точках в натуре и на модели чисел Фруда $Fr = V^2/gl$ и Струхала $Sh = Vt/l$, где V — скорость жидкости в сходственных точках, t — время, l — характерный линейный размер, g — ускорение силы тяжести.

Экспериментальные исследования проводились в автомодельной области чисел Рейнольдса $Re = Vl/\nu$, где ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости.

В качестве характерного линейного размера была принята глубина моря d в месте установки плавучего объекта. Возможная длина волны цунами λ определялась по формуле [3]

$$\lambda = 7,27d\sqrt{1/3(d/h + 1)}.$$

При известных значениях длины λ и скорости распространения волны цунами в бухте $c = \sqrt{gd}$, можно определить длительность ее воздействия $t_0 = \lambda/c$.

В качестве характерной для определения критериев подобия была принята максимальная орбитальная скорость поверхностной жидкой частицы, определяемая по формуле:

$$V = h\sqrt{(\pi g c t h (2\pi d/\lambda))/2\lambda}.$$

Для выбранных характерных параметров в определении критериев подобия, согласно рекомендациям [14], автомодельная область применительно к критерию Рейнольдса при волновом движении воды достигается при числах Рейнольдса больших, чем критическое число Рейнольдса $Re_{кр} = 1,0 \cdot 10^5$.

Результаты расчетов основных параметров волн цунами и критериев подобия, рассмотренных в экспериментальных исследованиях при физическом моделировании в масштабе 1:60, сведены в табл. 1. Масштаб модели плавучего объекта 1:60 являлся достаточным для соблюдения условий автомодельности по числам Рейнольдса.

Таблица 1

Расчетные значения основных параметров волн цунами и критериев подобия, рассмотренные при физическом моделировании

h , м	λ , м	t_0 , с	V , м/с	Fr	Re	Sh
Натура						
3,0	682,8	33,6	0,743	0,0013	$38,8 \cdot 10^6$	0,594
3,5	635,6	31,3	0,878	0,0019	$45,8 \cdot 10^6$	0,654
4,0	597,8	29,5	0,998	0,0024	$52,1 \cdot 10^6$	0,700
Модель						
0,050	11,38	4,34	0,096	0,0013	$0,8 \cdot 10^5$	0,595
0,058	10,62	4,05	0,111	0,0018	$1,0 \cdot 10^5$	0,642
0,067	9,95	3,80	0,129	0,0024	$1,1 \cdot 10^5$	0,700

При этом, в связи с тем, что целью работы является определение усилий в якорных связях, удерживающих плавучий объект при прямом воздействии волны цунами, то для дальнейшего анализа принимались только те значения усилий, которые возникали в якорных связях до прихода отраженной волны.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Физическое моделирование воздействия волны цунами на плавучий объект проводилось на экспериментальной установке, выполненной в выгородке шириной 13 м гидроволнового бассейна общей длиной 40 м и высотой 1,5 м [15, 16].

В головной части гидроволнового бассейна был расположен волнопродуктор, предназначенный для моделирования волн цунами и представляющий собой резервуар, который путем создания вакуума с помощью вакуумного насоса заполнялся водой до определенного объема. Путем срыва вакуума из резервуара производился выпуск определенного объема воды с той или иной скоростью, что приводило к возникновению волны типа цунами.

В качестве плавучего объекта в экспериментальных исследованиях рассматривалось воздействие волн цунами на модель перспективного проекта плавучего хранилища газа (табл. 2 и рис. 1 и 2). При этом рассматривалось воздействие волн цунами на модель плавучего хранилища газа с перекрестной, подкильной якорной системой, состоящей из 36 якорных связей с подвесными массивами и устройствами, моделирующими гравитационные якоря (рис. 3).

Таблица 2

Параметры модели плавучего объекта, использованной для проведения экспериментальных исследований

Параметры модели плавучего объекта	
Длина, м	6,583
Ширина, м	1,000
Высота борта, м	0,500
Длина носовой оконечности, м	0,905
Длина кормовой оконечности, м	0,863
Длина цилиндрической вставки, м	4,815
Ширина носового торца, м	0,097
Ширина кормового торца, м	0,097
Радиус скулового закругления, м	0,043
Осадка в грузу, м	0,208
Объемное водоизмещение в грузу, м ³	1,205

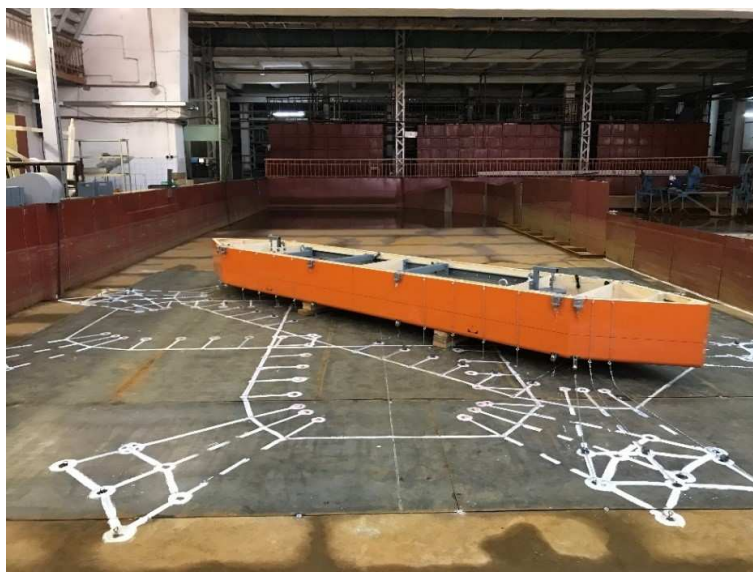


Рис. 1 Вид посуху на размещенную на экспериментальной установке в гидроволновом бассейне модель плавучего объекта



Рис. 2 Вид посуху на носовую часть модели плавучего объекта с якорными связями, размещенной на экспериментальной установке

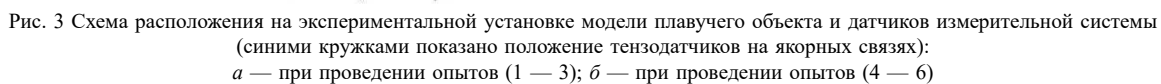
Схемы модели плавучего объекта со связями с подвесными массивами и якорями, жестко соединенными с донной поверхностью, приведены на рис. 3. Подвесные массивы моделировались свинцовыми грузами.

При проведении экспериментальных исследований для получения достаточных количественных сведений о взаимодействии волн цунами с исследуемым сооружением достигалось измерениями значений следующих величин.

В намеченном створе с помощью ультразвукового бесконтактного принципа действия датчика уровня (ДУ) были выполнены измерения значений текущего отклонения $h(t)$ отметки водной поверхности от уровня спокойной воды.

В том же створе с помощью измерителя трех компонент скорости водного потока Nortek Vectrino на основе эффекта Доплера (ДС) были выполнены измерения значений скорости в поверхностном слое водного потока $V(t)$, создаваемого волнами цунами.

В намеченных якорных связях с помощью тензорезистивных датчиков силы CZL 302 с S-образной балкой (ТД), размещенных над водной поверхностью (см. рис. 4 и 5), были выполнены измерения усилий, возникавшие в результате воздействия волны цунами на плавучее сооружение.



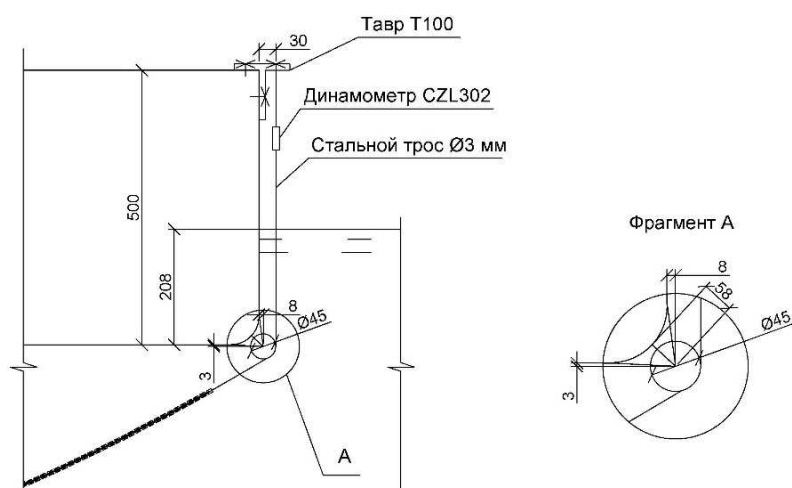


Рис. 4 Схема размещения датчиков усилий в намеченных якорных связях на бортах модели плавучего сооружения

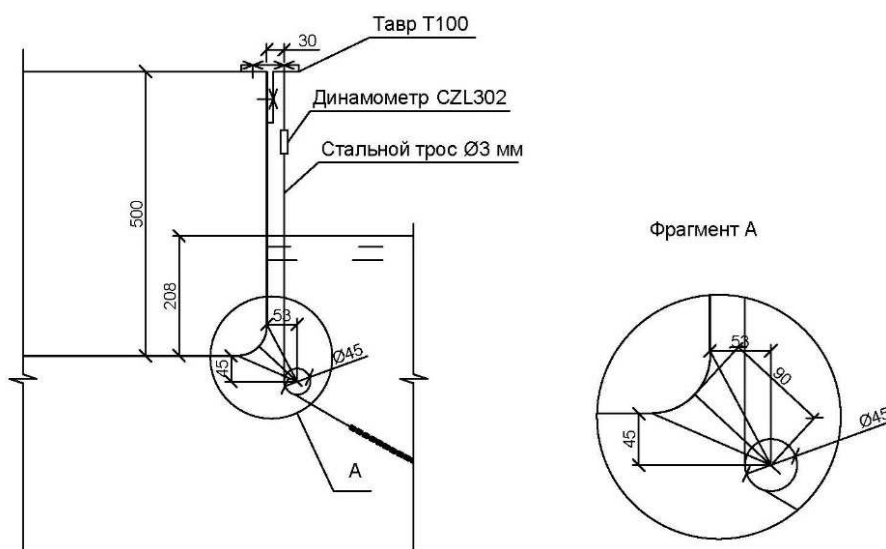


Рис. 5 Схема размещения датчиков усилий в намеченных якорных связях на модели плавучего сооружения в пределах носовой и кормовой вставок

Результаты измерений от перечисленных измерительных средств были синхронизированы между собой посредством использования измерительной информационной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задача экспериментальных исследований оценки усилий в якорных связях решалась следующим образом.

При заданной глубине воды на экспериментальной установке $d=0,672$ м осуществлялось воздействие волн цунами различной высоты (см. табл. 1) на модель ПХГ, расположенную определенным образом относительно фронта волны. Осадка T модели ПХГ была равна 0,208 м. Были рассмотрены случаи, когда луч волны совпадал с продольной осью плавучего объекта (опыты 1 — 3) и когда продольная ось объекта составляла с лучом волны угол, равный $\pi/4$, (опыты 4 — 6).

С помощью ультразвукового датчика уровня ДУ и датчика скорости ДС, размещенных в намеченном створе (см. рис. 3), записывались осциллограммы профилей волн и изменения поверхностной скорости водного потока (см. рис. 6).

Измерения горизонтальной составляющей скорости водного потока производились датчиком скорости, размещенном в 0,10 м под поверхностью воды. Положительные значения скорости соответствуют направлению водного потока с направлением распространения волны, а отрицательные — навстречу распространения волны.

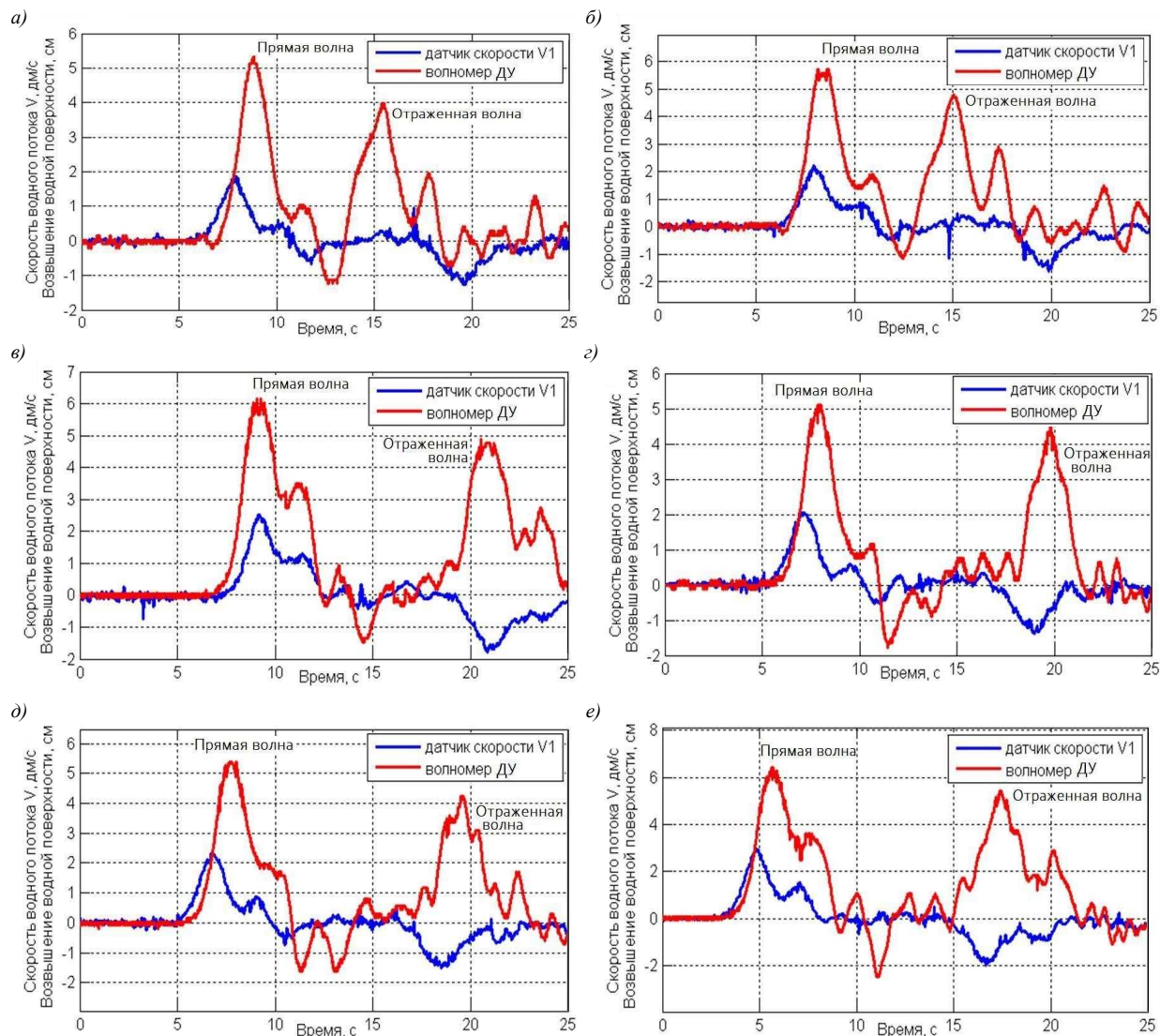


Рис. 6 Совмещенные осциллограммы изменения уровня воды и скорости водного потока в начальном створе в процессе проведения опытов:

a — 1; *б* — 2; *в* — 3; *г* — 4; *д* — 5; *е* — 6

Как видно из представленных результатов измерений (см. рис. 6) в процессе прохождения волной цунами створа расположения датчика ДС происходит движение потока воды с различными продольными скоростями. Максимум значений скорости водного потока наступает в процессе нарастания высоты волны. При этом максимальное значение скорости зависит от значения высоты волны.

В период проведения каждого опыта с помощью тензорезисторных датчиков (ТД) измерялись усилия в намеченных якорных связях при воздействии цунами на модель плавучего объекта (см. рис. 3). По существу, измерялись значения растягивающих усилий, возникающих в якорных связях после отрыва подвесных массивов от донной поверхности в результате воздействия волны цунами на плавучий объект. По плановому расположению указанных якорных связей можно определить направление воздействия от волны цунами. Направление воздействия волны цунами, совпадающее с направлением ее распространения, считалось положительным, а противоположное — отрицательным.

В процессе проведения экспериментов установлено, что волна цунами по мере воздействия обтекала плавучий объект по всему контуру.

Существуют различия в распределении усилий в якорных связях при воздействии волн цунами в случаях, когда плавучий объект располагается так, что его продольная ось совпадает с лучом волны (см. рис. 7а, опыты 1 — 3), и когда продольная ось плавучего объекта составляет угол $\pi/4$ относительно луча волны (см. рис. 7б, опыты 4 — 6). При этом усилия проявляются в виде рывка, то есть длительность усилий меньше, чем длительность воздействий.

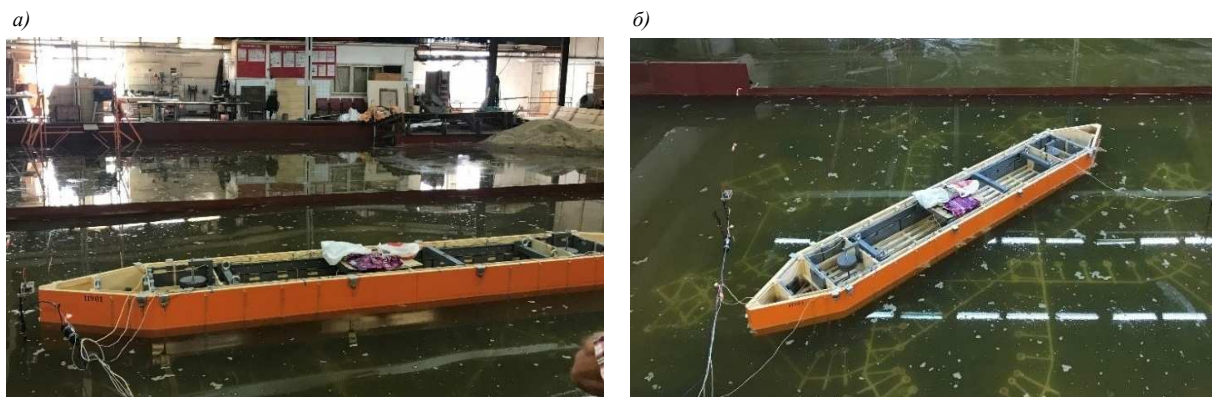


Рис. 7 Вид на модель ПХГ на экспериментальной установке в гидроволновом бассейне перед началом опытов:
а — 1; б — 4

Следует отметить, что согласно плановому положению плавучего объекта в случае, когда направление его продольной оси совпадает с направлением луча волны, в намеченных якорных связях Я-1, Я-6, Я-7, Я-8, Я-17, Я-18 (см. рис. 3а) возникают растягивающие усилия в начале навала волны на плавучий объект, то есть возникновение растягивающих усилий возможно при положительном воздействии волны. В намеченных якорных связях Я-19, Я-20, Я-29, Я-30, Я-31, Я-36 возникновение усилий возможно только при отрицательном воздействии.

Анализ полученных совмещенных осциллограмм датчиков уровня в исходном створе и усилий в намеченных якорных связях в результате проведения опытов 1 — 3 показал, что вышеупомянутое утверждение подтверждается результатами экспериментов.

На рис. 8 приведены результаты измерений усилий в якорных связях Я-1, Я-6, Я-7, Я-8, Я-18 (см. рис. 3а), полученные в процессе проведения опыта 3. Рассматривая изменения значений усилий по оси времени, можно заметить, что при прямом воздействии волны цунами максимальные усилия в виде рывка возникают в начале навала волны цунами на плавучий объект в период прохождения над створами якорных связей максимального уровня воды. То есть в этот период времени направления воздействия и распространения волны совпадают.

На рис. 9 приведены результаты измерений усилий в якорных связях Я-19, Я-20, Я-29, Я-30, Я-31, Я-36 (см. рис. 3а), полученные в процессе проведения опыта 3. Рассматривая изменения значений усилий по оси времени, можно заметить, что при прямом воздействии волны цунами максимальные усилия в виде рывка возникают в то время, когда в исходном створе, в котором расположен ДУ1, отметки свободной поверхности снижаются после прохождения максимальных значений. При этом рывок возникает при прохождении максимальной отметки свободной поверхности над створом рассматриваемой якорной связи. Таким образом в рассмотренных случаях направление воздействия противоположно направлению распространения волны, то есть отрицательно.

Таким образом, при воздействии цунами, в случае, когда луч волны совпадает с направлением продольной оси плавучего объекта, в начале навала волны на плавучий объект возникают усилия в якорных связях носовой части объекта, а при уменьшении свободных отметок воды тела волны, обтекающей плавучий объект, начинают возникать усилия в якорных связях кормовой части. В этом случае взаимодействия цунами с плавучим объектом значения усилий в якорных связях убывают от носовой части к середине объекта и возрастают от середины к корме (см. табл. 3).

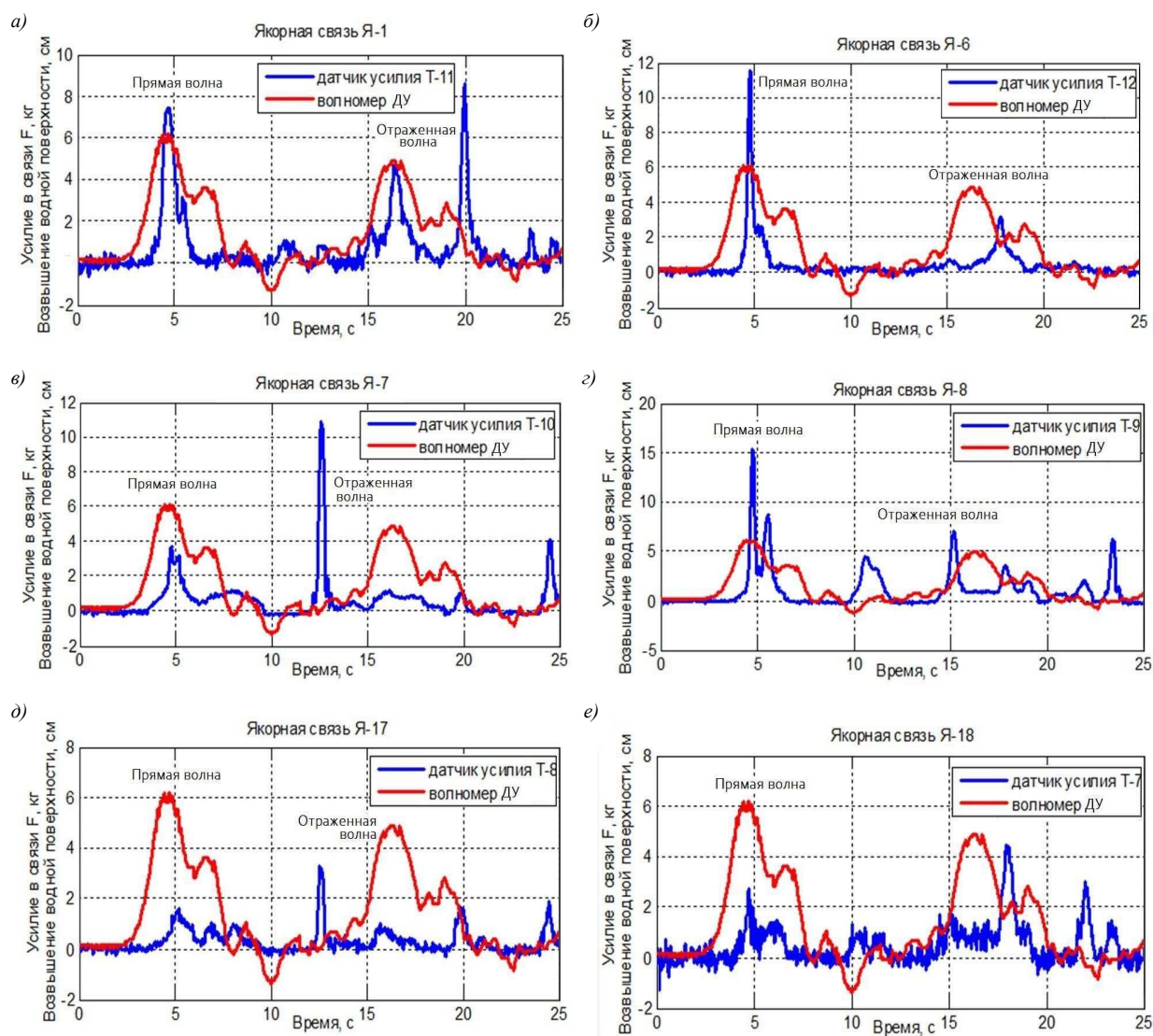


Рис. 8 Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в исходном створе в процессе положительного воздействия волны цунами при проведении опыта 3 и усилий в якорных связях:
 а — Я-1; б — Я-6; в — Я-7; г — Я-8; д — Я-17; е — Я-18

При прямом воздействии волны цунами на плавучий объект в случае, когда его продольная ось составляет с лучом волны угол $\pi/4$, из рис. 3б видно, что в якорных связях Я-6, Я-8, Я-18, Я-20, Я-30, Я-36 возникают усилия только в начале навала волны, то есть в результате навала волны на правый борт объекта В то же время в якорных связях Я-1, Я-7, Я-17, Я-19, Я-29, Я-31 усилия могут возникать как в случае начала навала волны на объект, так и в период отбегания волной плавучего объекта.

Анализ полученных совмещенных осциллограмм датчика уровня в исходном створе и усилий в намеченных якорных связях в результате проведения опытов 4 — 6 показал, что вышеупомянутое утверждение подтверждается результатами экспериментов.

На рис. 10 приведены в виде совмещенных во времени осциллограмм результаты измерений уровня в исходном створе и усилий в расположенных вдоль правого борта якорных связях Я-6, Я-8, Я-18, Я-20, Я-30, Я-36 (см. рис. 3б), полученные в процессе проведения опыта 4. Анализируя положение на оси времени максимальных значений усилий в якорных связях (см. рис. 10), можно заметить, что в случае прямого воздействия волны усилия в виде рывка возникают в момент навала волны на плавучий объект и достижения в створе расположения якорной связи в теле волны максимального уровня свободной поверхности.

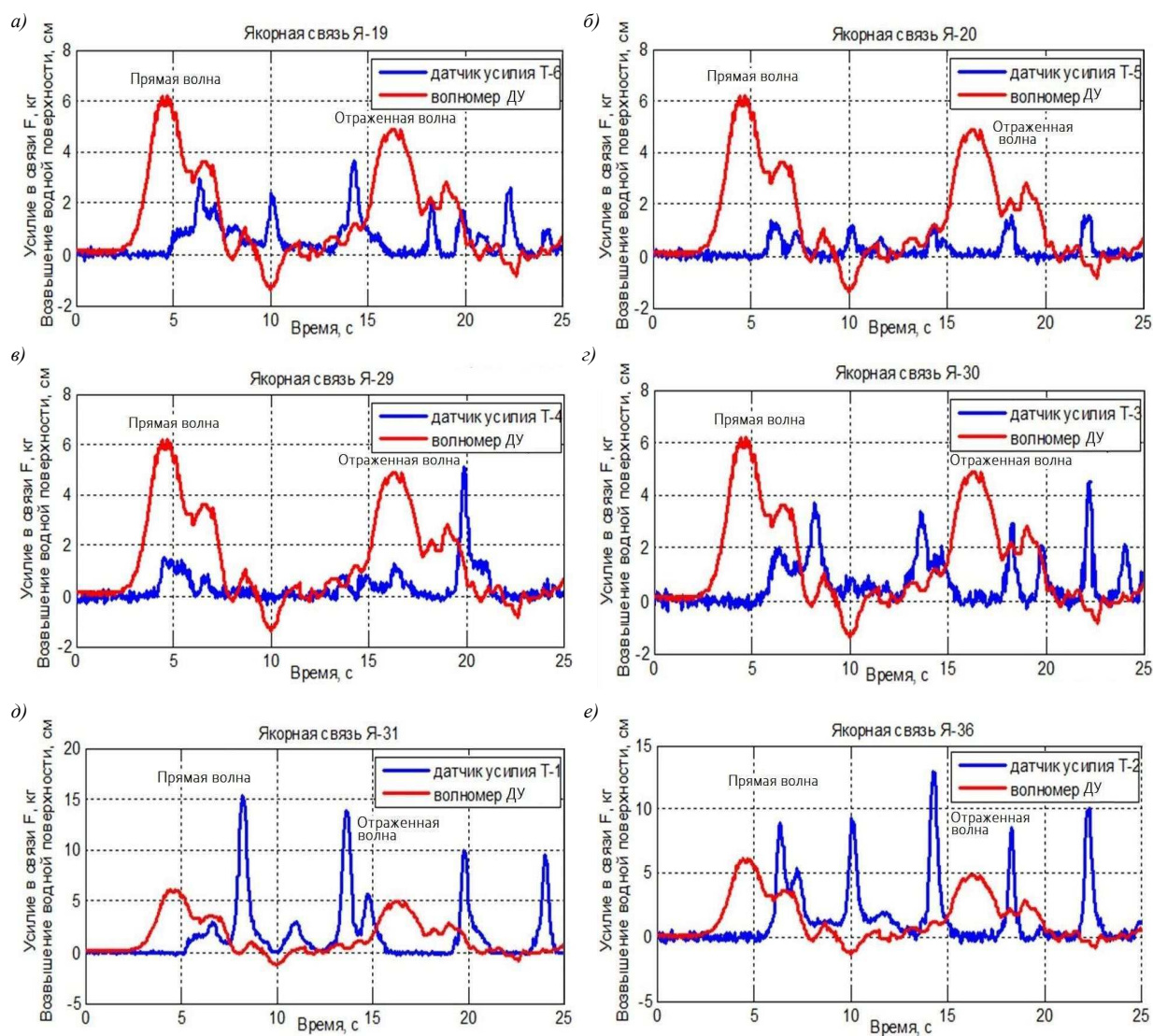


Рис. 9 Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в исходном створе в процессе положительного воздействия волны цунами при проведении опыта 3 и усилия в якорных связях: а — Я-19; б — Я-20; в — Я-29; г — Я-30; д — Я-31; е — Я-36

На рис. 11 приведены в виде совмещенных во времени осциллограмм результаты измерений уровня воды в исходном створе и усилий в расположенных вдоль левого борта якорных связях Я-1, Я-7, Я-17, Я-19, Я-29, Я-31 (см. рис. 3б), полученные в процессе проведения опыта 4. Как видно из рис. 11, в якорных связях Я-1, Я-7, Я-17, Я-19, Я-29 возникают усилия в виде рывков в период навала волны на плавучий объект и в результате его обтекания волной. При этом количественное значение усилий в якорных связях Я-1, Я-7 и Я-17 в момент второго рывка больше, чем в момент первого.

В якорной связи Я-31 отмечаются усилия в виде рывка только в результате обтекания плавучего объекта волной (см. рис. 11).

Экспериментальные исследования показали, что максимальные усилия в якорных связях даже при постоянном воздействии отличаются как по значениям, так и по времени возникновения. При этом первой на воздействие волны цунами реагирует якорная связь Я-6 (см. рис. 8 — 12). Полученные в результате проведения опытов 1 — 6 значения максимальных усилий в якорных связях представлены в табл. 3. При этом представленные в табл. 3 максимальные значения усилий в якорных связях приведены к максимальным значениям усилий в якорной связи Я-6, полученным в каждом опыте.

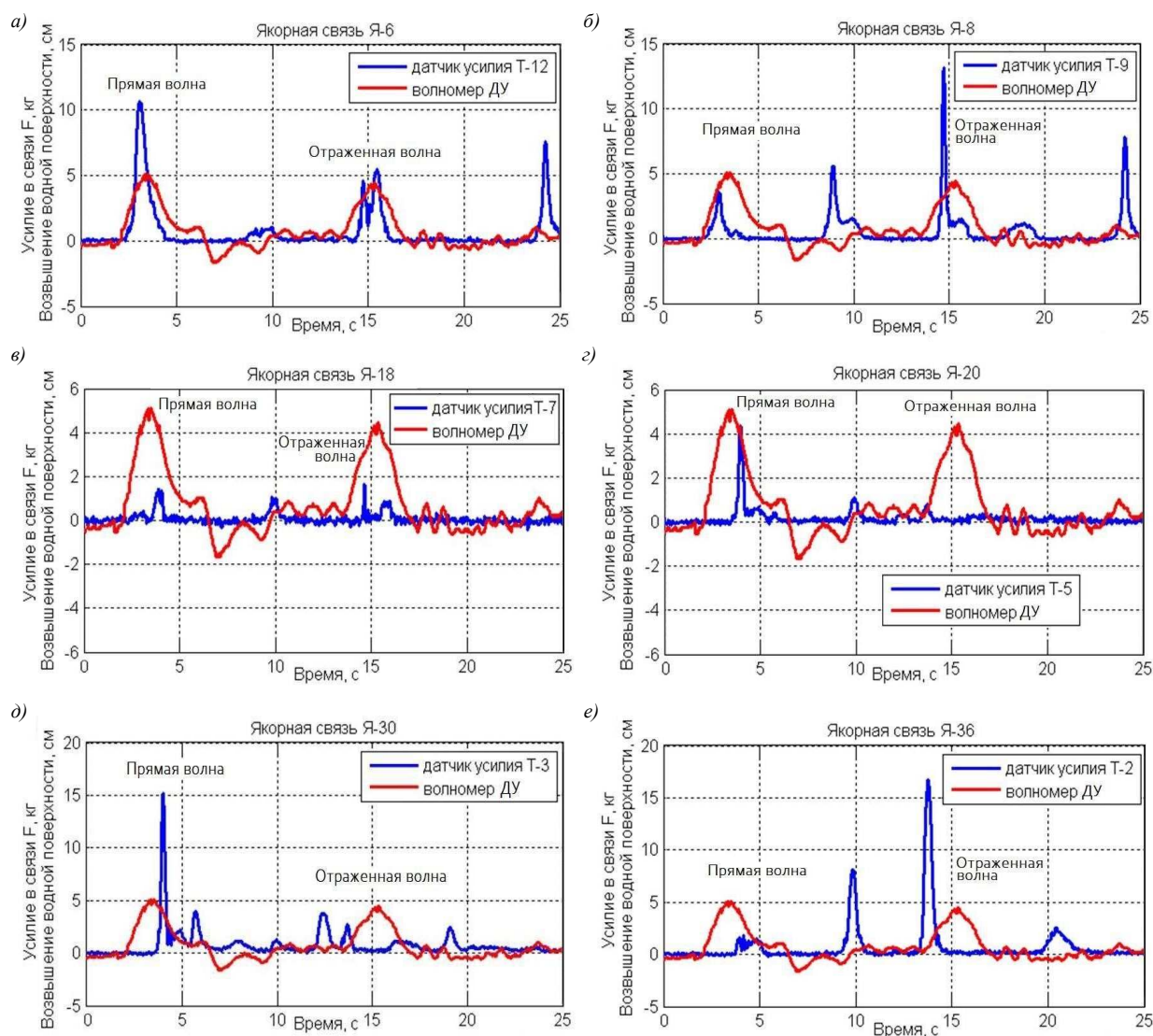


Рис. 10 Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в исходном створе в процессе проведения опыта 4 и усилий в якорных связях вдоль правого борта ПХГ:
 а — Я-6; б — Я-8; в — Я-18; г — Я-20; д — Я-30; е — Я-36

Таблица 3

Полученные в процессе экспериментов значения максимальных усилий в якорных связях, приведенные к максимальным значениям усилий в якорной связи Я-6

№ опыта	Правый борт					Левый борт					
	Я-8	Я-18	Я-20	Я-30	Я-36	Я-1	Я-7	Я-17	Я-19	Я-29	Я-31
1	1,300	0,225	0,145	0,327	1,655	0,753	0,343	0,343	0,482	0,198	1,252
2	1,324	0,194	0,126	0,248	1,324	0,659	0,891	0,246	0,370	0,152	1,074
3	1,332	0,275	0,112	0,314	1,152	0,639	0,961	0,291	0,323	0,132	1,314
4	0,476	0,145	0,433	1,627	0,349	0,151	1,071	0,447	0,096	0,043	2,365
5	0,712	0,155	0,617	1,650	0,292	0,381	0,970	0,312	0,301	0,140	2,975
6	0,936	0,236	0,897	3,056	0,552	0,248	0,413	1,000	1,048	0,784	—

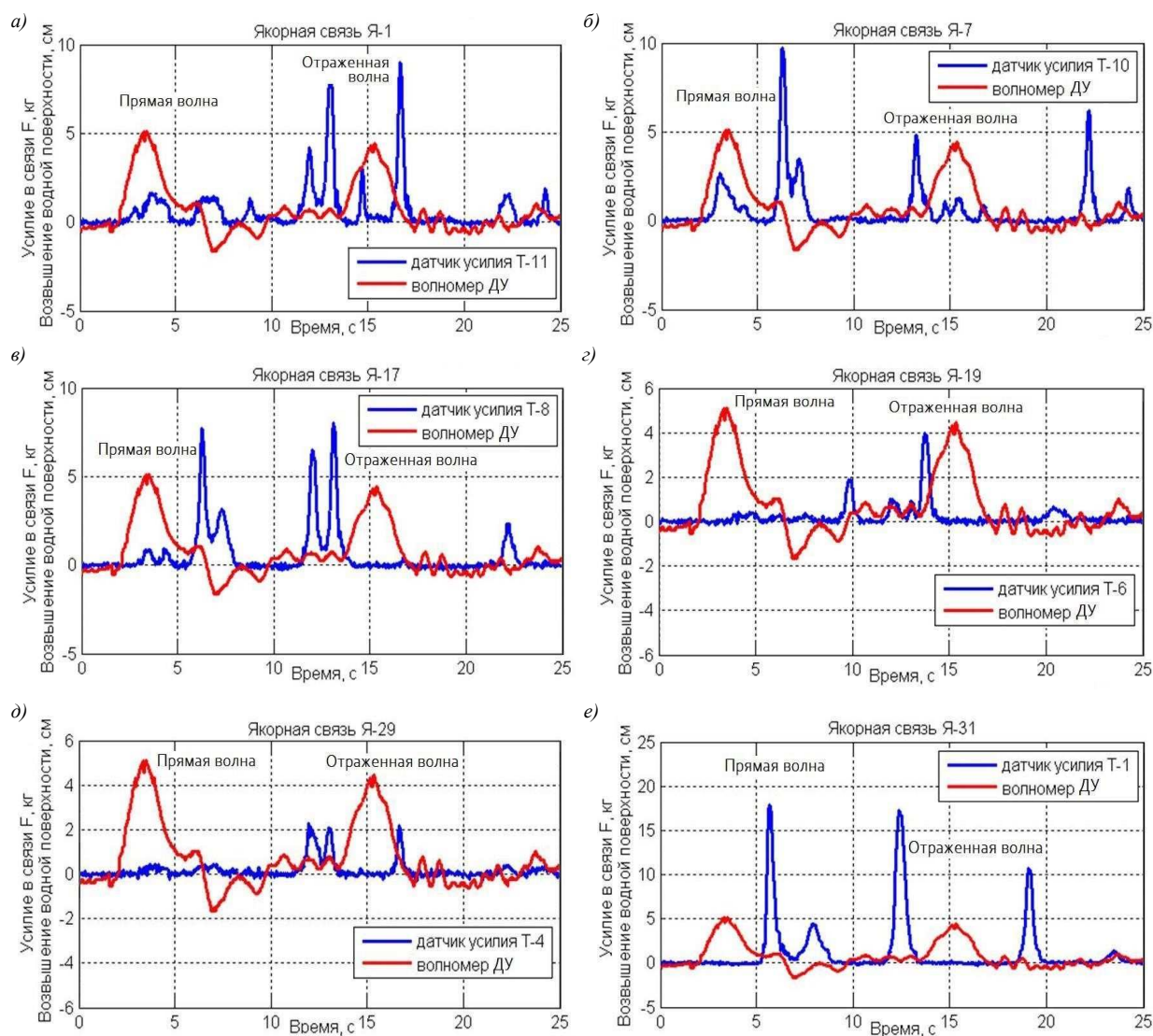


Рис. 11 Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в исходном створе в процессе проведения опыта 4 и усилий в якорных связях вдоль левого борта ПХГ:
а — Я-1; б — Я-7; в — Я-17; г — Я-19; д — Я-29; е — Я-31

Как видно из табл. 3, характер изменения приведенных усилий в якорных связях, размещенных вдоль корпуса плавучего объекта, в опытах 1 — 3 отличается от характера изменения приведенных распределения усилий в опытах 4 — 6.

В результате проведения опытов 1 — 3 в условиях, когда продольная ось плавучего объекта совпадает с направлением луча волны, установлено, что максимальные значения приведенных усилий наблюдаются в якорных связях, расположенных на участке сопряжения носовой и цилиндрической части плавучего объекта (см. табл. 2). При этом указанные усилия возникают в начале навала волны на плавучий объект. Приведенные усилия в якорных связях, расположенных вдоль бортов цилиндрической вставки плавучего объекта, не превосходят значения, равного 0,5. В результате обтекания волной плавучего объекта в якорных связях, расположенных в кормовой вставке (Я-31), возникают усилия, значения которых превышают значения усилий в якорных связях носовой вставки плавучего объекта (см. табл. 3).

В результате проведения опытов 4 — 6 в условиях, когда продольная ось плавучего объекта составляет угол $\pi/4$ с лучом волны, установлено, что характер изменения приведенных усилий в якорных связях, расположенных вдоль правого борта плавучего объекта, отличается от характера изменения приведенных усилий в якорных связях, расположенных вдоль левого борта.

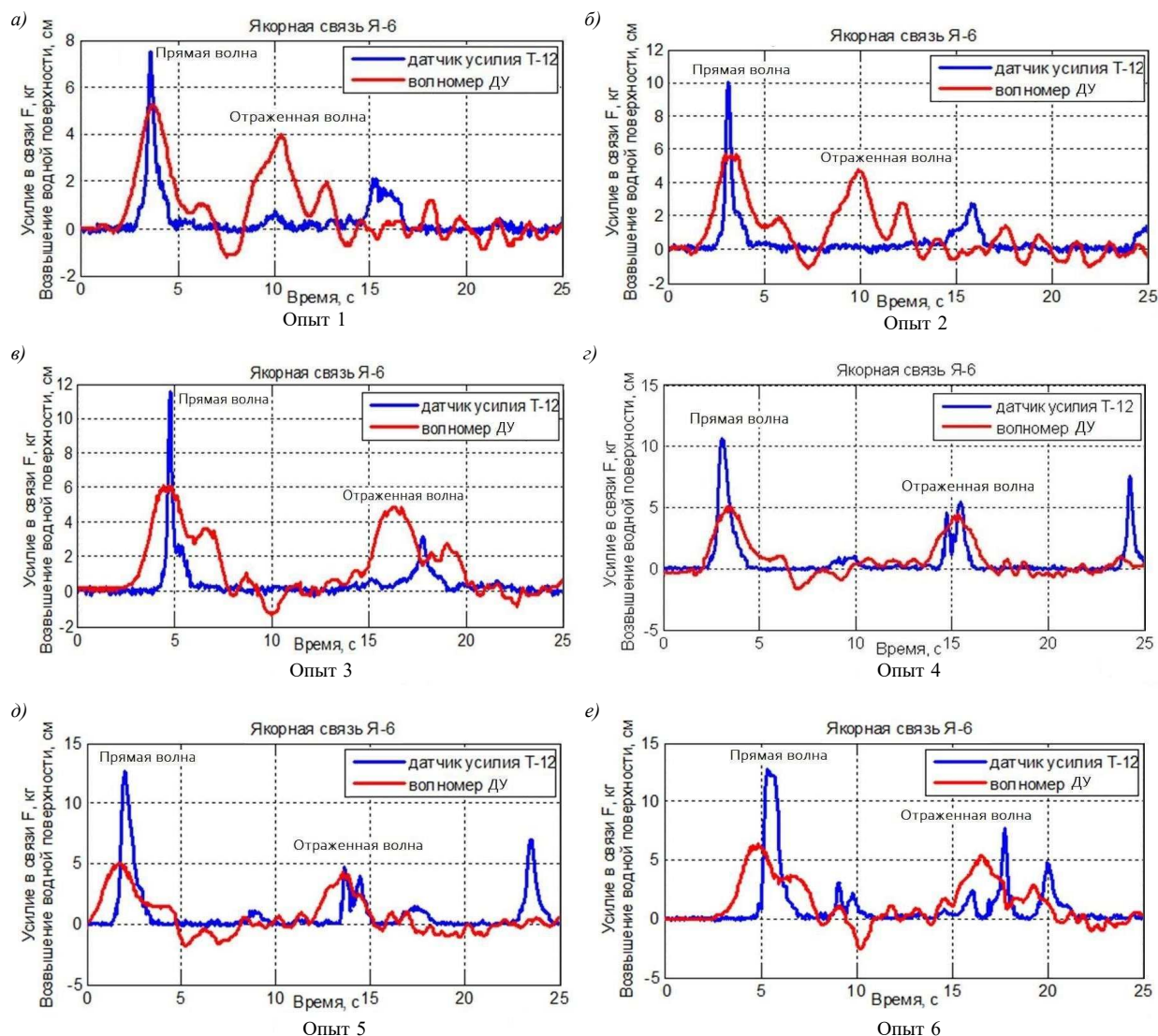


Рис. 12 Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в исходном створе и усилий в якорной цепи Я-6 в процессе проведения опытов:
а — 1; б — 2; в — 3; г — 4; д — 5; е — 6

Также установлено, что в расположенных вдоль правого борта цилиндрической вставки плавучего объекта якорных связях приведенные усилия увеличиваются с увеличением высоты волны, действующей на плавучий объект (см. табл. 3). При этом для каждого воздействия значения приведенных усилий в пределах носовой части цилиндрической вставки уменьшаются к середине, а в пределах кормовой части возрастают от середины к сечению сопряжения цилиндрической и кормовой вставок (см. табл. 3). Наибольшие значения приведенных усилий достигаются в якорной связи, расположенной на границе сопряжения цилиндрической и кормовой вставок. В рассматриваемом случае максимальные усилия возникают в начале навала волны на плавучий объект.

Также экспериментально установлено, что в расположенных вдоль левого борта цилиндрической вставки якорных связях значения приведенных усилий зависят от высоты волны, действующей на плавучий объект. При этом в якорной связи Я-7, расположенной на границе цилиндрической и носовой вставок, с увеличением высоты волны приведенные усилия уменьшаются, а в якорной связи Я-29, расположенной на границе цилиндрической и кормовой вставок, приведенные усилия увеличиваются (см. табл. 3). Тем самым, при увеличении высоты действующей на плавучий объект волны происходит выравнивание значений приведенных усилий в якорных связях, размещенных вдоль левого борта цилиндрической вставки (см. табл. 3). При этом, если в якорной связи Я-1, размещенной в носовой вставке, приведенные усилия при всех рассмотренных воздействиях волн не превышают значений 0,4, то в якорной связи Я-31, размещенной в

кормовой вставке, приведенные усилия зависят от высоты воздействующей волны, и их значения превышают 2,0 (в процессе проведения опыта 6 тензодатчик в якорной связи Я-31 перестал работать из-за чрезмерных нагрузок). Следует заметить, что в рассматриваемом случае максимальные усилия в якорных связях возникают во время обтекания волной плавучего объекта, то есть волновое воздействие направлено навстречу направлению распространения волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведения экспериментальных исследований установлено, что волна цунами вызывает в направлении своего распространения движение водного потока со скоростями, зависящими от высоты волны.

Усилия, возникающие в удерживающих плавучий объект якорных связях, возникают от разнонаправленного воздействия на него волны цунами. В процессе навала волны цунами на плавучий объект в якорных связях его носовой части возникают усилия в виде рывка, если луч волны совпадает с продольной осью объекта, и в якорных связях со стороны правого («наветренного») борта, если луч волны составляет угол с продольной осью объекта. В процессе завершения обтекания волной плавучего объекта в якорных связях его кормовой части возникают усилия в виде рывка, если луч волны совпадает с продольной осью объекта, и в якорных связях со стороны левого («подветренного») борта, если луч волны составляет угол с продольной осью объекта.

Вследствие большого числа параметров, от которых зависят значения усилий в якорных связях, приведенные результаты экспериментальных исследований нельзя считать окончательными, но они показывают эффективность экспериментального метода в решении различных прикладных задач, возникающих при размещении гидротехнических сооружений в цунамиопасных районах. Необходимость активного освоения цунамиопасного тихоокеанского побережья уже не является далекой перспективой. Вместе с тем, следует отметить, что в РФ в настоящее время отсутствует экспериментальная база, позволяющая решать указанные и различные другие задачи, перечень которых достаточно большой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merkulov V.I. Analysis of Russian Arctic LNG projects and their development prospects. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 940 012114.
2. Didenko N.I., Cherenkov V.I. Economic and geopolitical aspects of developing the Northern Sea Route. 2018 IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science 180 012012.
3. Кульмач П.П., Филиппенко В.З. Воздействие цунами на морские гидротехнические сооружения. М.: Транспорт, 1984. 303 с.
4. Nistor I., Palermo D., Nouri Y., Saatcioglu M. Tsunami-Induced Forces on Structures. In book: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, 2009. DOI: 10.1142/9789812819307_0011. Pp. 261 — 286.
5. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Mishina A.V., Semenov K.K., Schemelinin D.I. Experimental study of tsunami-type waves impact on soil at foundations of offshore gravity platforms. Magazine of Civil Engineering, No 6(50), 2014. Pp. 4–12. doi: 10.5862/MCE.50.1.
6. Tomiczek T., Prasetyo A., Mori N., Yasuda T., Kennedy A.B., 2016. Physical modelling of tsunami onshore propagation, peak pressures, and shielding effects in an urban building array. Coastal Engineering, Vol. 117, pp. 97–112, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.003>.
7. Veldman A.E.P., Luppens R., Bunnik T., Huijsmans R.H.M., Duz B., Iwanowski B., Wemmenhove R., Borsboom M.J.A., Wellens P.R., van der Heiden H.J.L., van der Plas P. Extreme wave impact on offshore platforms and coastal constructions. Proceedings of the International Conference on offshore mechanics and Arctic engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011, pp. 365 — 376, <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49488>.
8. Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom. Ocean Engineering. Volume 221, 1 February 2021, 108540. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108540>.
9. Kubo M., Cho I.-S., Shigeki S., Kobayashi E., Koshimura S. The influence of tsunamis on moored ships and ports. Journal of Navigation and Port Research, 2005. Vol. 29, No. 4, pp. 319 — 325, <https://doi.org/10.5394/KINPR.2005.29.4.319>.
10. Teslyaruk I., Bolshev A. Optimization of the holding system of floating marine objects on the basis of numerical modeling of their behavior. Proceedings of the 3rd International Conference on Optimization and Analysis of Structures. 2015, pp. 117 — 122.
11. Elistratov V.V., Bolshev A.S., Frolov S.A. and Panfilov A.A. The development of conceptual options to the construction of ice-resistant floating wind power plants. — Polar Mechanics 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 193, 012022, 2018, doi:10.1088/1755-1315/193/1/012022.
12. Бабчик Д.В., Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Щемелинин Д.И., Экспериментальная оценка нагрузок на плавучий объект от прямого воздействия волн цунами. Гидротехническое строительство, 2022, № 8, с. 15 — 21, <https://doi.org/10.34831/EP.2022.99.38.002>.
13. Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Щемелинин Д.И. Методика расчета экстремальных нагрузок на плавучий объект от прямого воздействия волн цунами на основе экспериментальных исследований. Гидротехническое строительство, № 3, 2022, с. 46 — 50. DOI: 10.34831/EP.2022.31.74.007.

14. Лаппо Д.Д., Жуковец А.М., Мищенко С.С. Условия автомодельности в исследованиях волнового движения жидкости. — Л.: Энергия, Известия ВНИИГ, Сб. науч. трудов, т. 132, 1979.
15. Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Мишина А.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Щемелинин Д.И. Воздействие волн цунами на откосные берегоукрепительные сооружения с защитным слоем гексабитов. Полярная механика, № 3, 2016, с. 1038 — 1049.
16. Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Алексеева А.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Щемелинин Д.И. Исследования изменений структуры грунта при воздействии волн цунами на гидротехнические сооружения. Фундаментальная прикладная гидрофизика. Том 10, № 4, 2017, с. 44 — 52.

REFERENCES

1. Merkulov V.I. Analysis of Russian Arctic LNG projects and their development prospects. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 940 012114.
2. Didenko N.I. and Cherenkov V.I. Economic and geopolitical aspects of developing the Northern Sea Route. 2018 IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science 180 012012.
3. Kulmach P.P., Filippenok V.Z. *Vozdeystviye tsunami na morskoye gidrotekhnicheskoye sooruzheniya* [Tsunami impact on offshore hydraulic structures]. Transport, Moscow. 1984. 303 p.
4. Nistor I., Palermo D., Nouri Y., Saatcioglu M. Tsunami-Induced Forces on Structures. In book: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, 2009. DOI: 10.1142/9789812819307_0011. Pp. 261 — 286.
5. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Mishina A.V., Semenov K.K., Schemelinin D.I. Experimental study of tsunami-type waves impact on soil at foundations of offshore gravity platforms. Magazine of Civil Engineering, No. 6(50), 2014. Pp. 4 — 12. doi: 10.5862/MCE.50.1.
6. Tomiczek T., Prasetyo A., Mori N., Yasuda T., Kennedy A.B., 2016. Physical modelling of tsunami onshore propagation, peak pressures, and shielding effects in an urban building array. Coastal Engineering, Vol. 117, pp. 97 — 112, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.003>.
7. Veldman A.E.P., Luppens R., Bunnik T., Huijsmans R.H.M., Duz B., Iwanowski B., Wemmenhove R., Borsboom M.J.A., Wellens P.R., van der Heiden H.J.L., van der Plas P. Extreme wave impact on offshore platforms and coastal constructions. Proceedings of the International Conference on offshore mechanics and Arctic engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011, pp. 365 — 376, <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49488>.
8. Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom. Ocean Engineering, Volume 221, 1 February 2021, 108540. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108540>.
9. Kubo M., Cho I.-S., Shigeki S., Kobayashi E., Koshimura S. The influence of tsunamis on moored ships and ports. Journal of Navigation and Port Research, 2005. Vol. 29, No. 4, pp. 319 — 325, <https://doi.org/10.5394/KINPR.2005.29.4.319>.
10. Teslyaruk I., Bolshev A. Optimization of the holding system of floating marine objects on the basis of numerical modeling of their behavior. Proceedings of the 3rd International Conference on Optimization and Analysis of Structures. 2015, pp. 117 — 122.
11. Elistratov V.V., Bolshev A.S., Frolov S.A. and Panfilov A.A. The development of conceptual options to the construction of ice-resistant floating wind power plants. — Polar Mechanics 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 193, 012022, 2018, doi:10.1088/1755-1315/193/1/012022.
12. Babchik D.V., Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Shchemelinin D.I. *Eksperimentalnaya otsenka nagruzok na plavuchiy ob'ekt ot pryamogo vozdeystviya voln tsunami* [Experimental estimation of loads on a floating object from direct impact of tsunami waves]. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2022, Vol. 8, pp. 15 — 21, <https://doi.org/10.34831/EP.2022.99.38.002>.
13. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Shchemelinin D.I. *Metodika rascheta ekstremal'nykh nagruzok na plavuchiy ob'ekt ot pryamogo vozdeystviya voln tsunami na osnove eksperimental'nykh issledovaniy* [Method for calculating extreme loads on a floating object from the direct impact of tsunami waves based on experimental studies]. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2022, Vol. 3, pp. 46 — 50. DOI: 10.34831/EP.2022.31.74.007
14. Lappo D.D., Zhukovets A.M., Mishchenko S.S. *Usloviya avtomodelnosti v issledovaniyakh volnovogo dvizheniya zhidkosti* [Conditions for self-similarity in studies of wave motion of a fluid]. Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneva, 1979. Vol. 132, pp. 59 — 65.
15. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Mishina A.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Schemelinin D.I. *Vozdeystviye voln tsunami na otkosnyye beregoukrepitelnye sooruzheniya s zashchitnym sloym geksabitov* [Impact of tsunami waves on sloping bank protection structures with a protective layer of hexabits]. Polar Mechanics, Vol. 3, 2016, pp. 1038 — 1049.
16. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Alexeeva A.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Schemelinin D.I. *Issledovaniya izmeneniy struktury grunta pri vozdeystvii voln tsunami na gidrotekhnicheskoye sooruzheniya* [Investigation of the soil structure changes under the tsunami waves impact on the marine hydrotechnical structures]. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2017, 10(4), pp. 44 — 52.



ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ

УДК 35.07

РЕКОМЕНДАЦИИ ИМО ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОВЕРКАМ В РАМКАХ СИСТЕМЫ ПРОВЕРКИ ГОСУДАРСТВ — ЧЛЕНОВ ИМО (IMSAS)

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

Международная морская организация (ИМО) стремится к тому, чтобы каждое из 175 государств — членов надлежащим образом применяло и обеспечивало выполнение разработанных ею нормативных документов, касающихся безопасности мореплавания. Для оказания государствам — членам ИМО помощи при выполнении этой задачи существует Система проверки государств — членов ИМО (IMSAS), в рамках которой в каждом государстве, являющемся членом ИМО, проводятся периодические проверки в целях оценки степени выполнения применимых требований. Система проверки ИМО с 2016 года имеет обязательный статус, и за прошедшие 8 лет ИМО накоплен богатый опыт в проведении и организации проверок. Данный опыт лег в основу Руководства в отношении Системы проверки государств — членов ИМО (IMSAS), вспомогательного документа, целью которого является предоставление государствам руководящих принципов и рекомендаций в вопросе подготовки и прохождении проверок IMSAS. Руководство в настоящее время находится на завершающей стадии разработки в профильном Подкомитете по осуществлению документов ИМО, его принятие планируется Ассамблеей ИМО в 2023 году. В настоящей статье Руководство подробно исследовано, показана предыстория и предпосылки его разработки, рассмотрены структура, состав, предназначение, оценен документ в целом с точки зрения достижения поставленных в нем целей. Сделаны выводы о наиболее актуальных направлениях совершенствования нормативной базы IMSAS и разъясняющих ее руководств, с прицелом на более качественное осуществление и обеспечение выполнения документов ИМО. Предложены мероприятия по совершенствованию Системы проверки государств — членов ИМО как в целом, так и в вопросах реализации ее положений в рамках отдельно взятого государства.

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

IMO RECOMMENDATIONS ON PREPARATION FOR THE AUDITS UNDER THE IMO MEMBER STATE AUDIT SCHEME (IMSAS)

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

The International Maritime Organization (IMO) strives to ensure that each of the 175 Member States properly implements and enforces its mandatory documents relating to maritime safety. In order to assist IMO Member States in this task, IMO has developed the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS), under which each IMO Member State is audited periodically in order to assess the degree of compliance with applicable requirements. The IMO audit scheme has had a mandatory status since 2016, and over the past 8 years IMO has accumulated a wealth of experience in conducting and organizing those audits. This experience forms ground for the Member State Guidelines to assist in the preparation for the audit under the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS), a supporting document aimed at providing States with guidelines and recommendations on the preparation and passing of IMSAS audits. The Guidelines are currently in the final stage of

development in the Subcommittee on the Implementation of IMO instruments (III Subcommittee), their adoption is planned by the IMO Assembly in 2023. In this article, the Guidelines have been examined in detail, the background and prerequisites for their development have been shown, the structure, composition, purpose have been considered, the document as a whole has been assessed from the point of view of achieving the goals set in it. Conclusions have been discussed on the most relevant areas of improvement of the IMSAS framework and its explanatory guidelines, with a view to better implementation and enforcement of IMO instruments. Measures have been proposed to improve the IMO Member State Audit Scheme both in general and in the implementation of its provisions within a single Member State.

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

ВВЕДЕНИЕ

Система проверки государств — членов ИМО (IMSAS), которая в 2016 году приобрела обязательный статус, к настоящему времени приближается к завершению первого цикла проверок всех 175 государств — членов ИМО.

Как подробно показано в [1] и [2], основная нормативная база Системы определена в Рамочных принципах и процедурах Системы проверки государств — членов ИМО (резолюция Ассамблеи ИМО А.1067(28); далее — Рамочные принципы и процедуры [3]), и в Кодексе по осуществлению документов ИМО (резолюция Ассамблеи ИМО А.1070(28); далее — Кодекс ОДИ [4]).

Для проверяемого государства проверка является мероприятием повышенной важности и как правило касается деятельности ряда федеральных министерств (в сфере транспорта, природы, обороны, экологии) и организаций, выполняющих в системе государства различные функции в области навигации, гидрографии, спасания и др.

С другой стороны, сама ИМО и ее Генеральный секретарь повышенное внимание уделяют проверкам IMSAS и в целом проблематике осуществления и обеспечения выполнения инструментов ИМО государствами — членами.

За годы существования IMSAS Международной морской организацией накоплен богатый опыт в организации подготовки и проведения проверок.

При этом разные государства выполняют свои обязательства по-разному, ведь у каждого из них есть свои уникальные особенности, которые в ходе проверок IMSAS подлежат проверке.

Поэтому ИМО в настоящее время разрабатывает Руководство по подготовке к проверке в соответствии с Системой проверки государств — членов ИМО (IMSAS) [5], предназначенное, с одной стороны, для облегчения подготовки к проверкам, а с другой — для упрощения организации проведения собственно проверок и всех мероприятий, связанных с ними.

В Руководстве приведены развернутые вспомогательные положения, предназначенные для оказания помощи государствам в планировании и проведении своих проверок, подробно разъясняющие этапы и аспекты, в которых могут возникать трудности. Оно содержит рекомендации, которые должны прояснять «серые зоны» или области, которые, как показал накопленный ИМО опыт, представляют наибольшие проблемы для государств.

В настоящей статье, являющейся одним из результатов проводимого автором исследования всей Системы проверки государств — членов ИМО, указанное Руководство подвергнуто тщательному анализу, выполнено исследование предыстории и предпосылок его разработки; детально рассмотрены структура, состав, предназначение, дана оценка качества и его применимости с точки зрения достижения целей, поставленных при его разработке. Выделены и сформулированы наиболее важные и актуальные положения, разъясняющие некоторые аспекты подготовки к проверкам IMSAS. Предложены мероприятия по совершенствованию Системы IMSAS как в целом, так и в вопросах реализации ее положений в рамках отдельно взятого государства

Дорожная карта проверки ИМО в государстве

Учитывая, что каждая проверка в принципе имеет уникальный характер и особенности, для лучшего понимания государством всего процесса проверки, который фактически в общей сложности может длиться для него в течение 3 — 5 лет (от самых первых подготовительных мероприятий до завершения устранения выявленных замечаний), в Руководство включено расширенное перечисление типовых этапов процесса проверки IMSAS в отдельно взятом государстве (см. таблицу).

Т а б л и ц а

Примерная дорожная карта для процесса IMSAS в государстве

Мероприятие	Описание	Ответственные
Уведомление от ИМО (не менее, чем за 18 месяцев)	Письмо Генерального секретаря ИМО Министру проверяемого государства с уведомлением о проверке IMSAS и годе/месяце планируемой проверки	ИМО (Генеральный секретарь, Служба MSA)
Назначение Единого контактного лица	Проверяемое государство назначает Единое контактное лицо, контактные данные о нем направляются в ИМО	Проверяемое государство
Государственные учреждения	Государство определяет все свои учреждения, ведомства и организации, которые будут участвовать в проверке	Проверяемое государство
Заседание Рабочей группы по проверке IMSAS	Государство создает Рабочую группу по проверке IMSAS из представителей всех вовлеченных структур (министерств, ведомств и т.д.). Определяются ответственные контактные лица в каждом из них для подготовки ВЗП и внутренней проверки IMSAS	Проверяемое государство
Внутреннее обучение по IMSAS	Государство проводит внутреннее обучение по проверке IMSAS	Проверяемое государство
Дата проведения внутренней проверки	Дата проведения внутренней проверки IMSAS должна быть согласована со всеми вовлеченными государственными структурами	Проверяемое государство
Подробная информация о внутренней проверке	Определение состава проверяющих и их руководителя, подготовка объема и программы внутренней проверки IMSAS	Проверяемое государство
1-й проект ВЗП	Первый проект «Вопросника, заполняемого до проверки» (ВЗП) должен быть заполнен всеми вовлеченными государственными структурами и направлен группе внутренней проверки	Проверяемое государство
Внутренняя проверка	Завершение внутренней проверки IMSAS	Проверяемое государство
Отчет по результатам внутренней проверки	Отчет о внутренней проверке представляется всем вовлеченным государственным структурам	Проверяемое государство
План действий по устранению несоответствий	План действий по устранению несоответствий должен быть разработан всеми вовлеченными государственными структурами	Проверяемое государство
Реализация Плана действий по устранению несоответствий	План действий по устранению несоответствий должен быть реализован во всех вовлеченных государственных структурах	Проверяемое государство
Подготовка ВЗП в GISIS	ИМО просит проверяемое государство начать подготовку ВЗП в GISIS	Генсек ИМО (Служба MSA)
Подготовка ВЗП государством — членом	Проверяемое государство подготавливает пересмотренный ВЗП с привлечением всех вовлеченных государственных структур	Проверяемое государство
Окончательный вопросник перед проверкой в GISIS	Окончательный ВЗП загружается в GISIS с соответствующими приложениями и документами, о чем государство уведомляет ИМО. Веб-сайты всех вовлеченных государственных структур, документы, описания и т.д. актуализируются	Проверяемое государство
Подготовка МоС	Меморандум о сотрудничестве (МоС) обсуждается и согласовывается между Службой MSA и проверяемым государством, которое также предоставляет ИМО разрешение на публикацию отчетов о проверке и плана действий по устранению недостатков	Генсек + проверяемое государство
Утверждение МоС	МоС утверждается ИМО и проверяемым государством и загружается Службой MSA в GISIS	Проверяемое государство + Генсек (MSA)
Назначение группы проверки	Служба MSA выбирает группу проверки и ее руководителя	Генсек (MSA)
Информирование о группе проверки	Проверяемое государство информируется о предлагаемых группе проверки и ее руководителе	Генсек (MSA)
Обратная связь по группе проверки	Государство предоставляет ИМО отзывы о предложенном составе группе проверки и ее руководителе	Проверяемое государство
Подготовка членов группы проверки	Члены группы проверки готовятся к проверке, рассматривая ВЗП и приложения к нему, МоС, соответствующие веб-сайты, документацию в GISIS и т.д.	Члены группы проверки
Подготовка государства к проверке	Государство готовится к проверке. Отель, транспорт и суточные оплачиваются ИМО; государство дает рекомендации по отелю, организует доставку проверяющих из аэропорта и трансфер в/из отеля в течение всей проверки; организует рабочий обед, кофе, чай и воду	Единое контактное лицо проверяемого государства

Окончание — Таблица

Мероприятие	Описание	Ответственные
Проект графика проверки	Проект графика проверки должен быть подготовлен совместно руководителем группы проверки и Единым контактным лицом с участием всех вовлеченных государственных структур. В проверке должен участвовать ключевой управленческий персонал. Образец графика приведен в циркулярном письме ИМО № 3425 (Руководство проверяющего лица [6]). Единое контактное лицо заполняет подробное расписание с указанием названий, имен, мест проведения собеседований и т.д.	Руководитель группы проверки + Единое контактное лицо
Окончательный график проверки	Проверяемое государство составляет окончательный график проверки, который должен быть одобрен руководителем группы проверки	Единое контактное лицо + Руководитель группы проверки
Информирование персонала о проверке	Высшее руководство, другие руководители и персонал всех вовлеченных государственных структур должны быть проинформированы о проверке IMSAS и об окончательном графике проверки. Необходимо обеспечить готовность резерва на случай отсутствия проверяемых лиц по болезни или по другим причинам	Проверяемое государство
Проверка	Члены группы проверки прибывают в проверяемое государство в выходные дни перед проверкой	Проверяемое государство + группа проверки
День 1 проверки. Вступительное совещание	Вступительное совещание в проверяемом государстве, на котором описываются объем проверки IMSAS, график и практические детали	Проверяемое государство + группа проверки
Дни 1 — 5 проверки	В проверяемом государстве проводятся интервью в рамках проверки IMSAS	Проверяемое государство + группа проверки
Проверка	Группа проверки готовит проект промежуточного отчета, включая выводы и наблюдения	Группа проверки
Промежуточный отчет о проверке	Желательно, чтобы государство рассмотрело первый проект промежуточного отчета до заключительного заседания	Проверяемое государство
Последний день проверки. Заключительное совещание	Заключительное совещание, на котором представляется проект промежуточного отчета с выводами и наблюдениями. Отчетные документы (Форма/формы А с выводами и замечаниями) должны быть подписаны проверяемым государством и руководителем группы проверки. Оригиналы передаются государству, копия — руководителю группы проверки	Руководитель группы проверки + проверяемое государство
Государство рассматривает проект Промежуточного Отчета	Государство приступает к рассмотрению проекта Промежуточного отчета	Проверяемое государство
MSA рассматривает проект промежуточного отчета	Служба MSA рассматривает проект Промежуточного отчета, пересматривает и вносит изменения в проект, если это необходимо, и готовит Промежуточный отчет. Руководитель группы проверки утверждает Промежуточный отчет и направляет его проверяемому государству, включая Краткий сводный отчет	Служба MSA + Руководитель группы проверки
Подготовка Плана действий по устранению недостатков в течение 90 дней	План действий по устранению недостатков должен быть заполнен государством — членом и направлен руководителю группы проверки и в Службу MSA в течение 90 дней с даты представления Промежуточного отчета руководителем группы проверки Единому контактному лицу	Проверяемое государство
Подготовка окончательного отчета о проверке	Руководитель группы проверки готовит проект Окончательного отчета о проверке (План действий по устранению недостатков включается в Промежуточный отчет) при поддержке Службы MSA. Окончательный отчет о проверке представляется руководителем группы проверки Единому контактному лицу	Руководитель группы проверки + Служба MSA
Обратная связь с MSA	Обратная связь от государства направляется в Службу MSA	Проверяемое государство
Последующие действия по результатам проверки	Последующая проверка, как правило, осуществляется путем проверки документов не позднее, чем через 3 — 4 года. Служба MSA запрашивает государство о документах (объективных свидетельствах), которые рассматриваются руководителем группы проверки	Служба MSA + Руководитель группы проверки + проверяемое государство
Проверка IMSAS	Следующая проверка IMSAS примерно через семь лет	Генсек + Проверяемое государство

Первым шагом в рамках проверки любого государства — члена ИМО должно быть уведомление Генеральным секретарем ИМО соответствующего государства — члена о запланированной дате его проверки. Это должно быть сделано как можно раньше, но не менее чем за 18 месяцев до предполагаемой проверки.

Одновременно государству предлагается назначить **Единое контактное лицо** (Single Point of Contact, SPC) для проведения проверки и сообщить ИМО его имя, должность и полную контактную информацию. Государство также должно выбрать один из шести официальных языков ИМО, на котором будет проводиться проверка.

Позже с выбранным Единым контактным лицом связывается Служба проверки государств — членов ИМО (Служба MSA) и начинает подготовку к проверке.

В качестве Единого контактного лица государство *«должно выбрать высокопоставленное должностное лицо, которое обладает возможностью поддержания связи со всеми вовлеченными государственными структурами при подготовке к проверке, но при этом способное оперативно поддерживать эффективную связь со Службой MSA и с Руководителем группы проверки»* [5, п. 2.2].

В ходе дальнейшей подготовки к проверке Руководитель группы проверки и Единое контактное лицо находятся в постоянном контакте и согласовывают подробные расписание и программу проверки. Образец расписания и программы проверки изложен в циркулярном письме ИМО № 3425 (Руководство проверяющего лица).

В этом контексте Единое контактное лицо действует в качестве внутреннего координатора в рамках государства с целью определения соответствующих государственных структур, которые должны быть проверены, чтобы охватить все области проверки. Из-за уникальной взаимосвязи различных структур, составляющих морскую администрацию, где в некоторых случаях несколько структур могут разделять ответственность за решение какого-либо вопроса, Единому контактному лицу следует играть активную роль в предоставлении подробной информации в этом отношении. В том числе — обеспечение контактов с соответствующими подразделениями государства и осведомления всех участников о датах и времени проведения собеседований, о материалах (процедуры, соответствующее национальное законодательство, записи и т.д.), которые должны быть в распоряжении для рассмотрения в ходе проверки.

Выбор Руководителя и членов группы проверки¹ осуществляется Генеральным секретарем ИМО в соответствии с Процедурами. Группа проверки должна сочетать в себе опыт и знания в отношении деятельности государств флага, порта и прибрежных государств, включать представителей различных национальностей, а также в полной мере владеть официальным языком ИМО, выбранным проверяемым государством.

Состав группы проверки подлежит согласованию с проверяемым государством, для чего Генеральный секретарь представляет Единому контактному лицу предлагаемый состав группы проверки. В исключительных обстоятельствах государство может просить о внесении изменений в состав группы проверки.

В качестве **канала связи** между государством и ИМО устанавливается связь между Единым контактным лицом и назначенным сотрудником Службы MSA (до официального формирования группы проверки), а после него контакт осуществляется между Единым контактным лицом и назначенным Руководителем группы проверки (для обсуждения всех деталей проверки и планирования). Все административные и связанные с логистикой коммуникации при этом должны копироваться в Службу MSA.

Секретариат ИМО также предоставляет Единому контактному лицу выделенное имя пользователя и пароль для доступа к **модулю IMSAS** на портале ИМО GISIS, в который впоследствии можно будет загрузить необходимую для проверки информацию («Вопросник, заполняемый до проверки», план корректирующих действий и пр.). Кроме того, в модуле имеется возможность просматривать результаты проверок других государств — членов ИМО.

В рамках подготовки к проверке государство и ИМО подписывают Меморандум о сотрудничестве (MoC), посредством которого, в том числе, государство предоставляет ИМО свое разрешение на публикацию отчетов о проверке и планов корректирующих действий.

Вопросник, заполняемый до проверки (ВЗП, PAQ) должен быть заполнен государством, подлежащим проверке, и загружен в модуль GISIS как можно раньше, но не позднее, чем через два месяца после получения, и при необходимости актуализирован **не позднее, чем за три месяца до проверки**. Этот документ вместе с приложениями и вспомогательной документацией является первым документом, на основе которого группа проверки начинает анализ состояния осуществления и обеспечения выполнения государством обязательных документов ИМО. Иными словами, на основании ВЗП группа проверки составит представление о том, как различные структуры, входящие в состав морской администрации, взаимодейст-

¹Важно отметить, что в официальной русскоязычной терминологии ИМО "audit" переводится как «проверка», "auditor" — «проверяющее лицо», "audit team" — «группа проверки», "audit team leader" — «руководитель группы проверки», "audit team member" — «член группы проверки», "audit plan" — «план проверки». Данные термины определены и используются во всей нормативной базе IMSAS [3].

вуют, выполняют свои обязанности, реализуют обязательства и т.д. По этой причине необходимая информация в ВЗП и приложениях к нему должна быть изложена достаточно подробно.

Членам группы проверки, после подписания соответствующего **Заявления о конфиденциальности**, в модуле GISIS предоставляется доступ к конфиденциальному файлу проверки государства, который состоит из сведений о государстве — члене; Меморандума о сотрудничестве; Вопросника, заполняемого до проверки, и приложений к нему; Подборки нормативных документов IMSAS; Круг ведения членов группы проверки; шаблоны различных отчетных документов по проверке.

Государство имеет возможность запросить и организовать за свой счет визит руководителя группы проверки **заблаговременно до проверки**, чтобы получить информацию о целях проведения и объеме проверки, способах ее проведения и *«любой другой информации, необходимой для улучшения взаимопонимания и сотрудничества между группой проверки и государством-членом, подлежащим проверке»* [5, п. 2.32].

Планирование проверки в государстве — члене

Государство должно подготовить обзор всех ведомств и учреждений, которые участвуют в выполнении международных обязательств государства — члена ИМО (как государства флага, порта и прибрежного государства в соответствии с обязательными документами ИМО). Поэтому государству через Единое контактное лицо следует начать координацию между участвующими структурами на ранних этапах подготовки к проверке.

Руководство содержит примерную диаграмму, показывающую принципиальное распределение сфер ответственности между государственными органами в рамках обязательных документов ИМО:

Государству целесообразно рассмотреть вопрос о создании Рабочей группы по проверке IMSAS, состоящей из представителей всех государственных структур, связанных с обязательствами ИМО. На первом совещании такой Рабочей группы могут быть рассмотрены некоторые из следующих вопросов:

- объем, цель и задача проверки IMSAS;
- международные обязательства и ответственность государства — члена ИМО как государства флага, порта и прибрежного государства;
- анализ пробелов в выполнении обязательств из Неисчерпывающего перечня [7];
- распределение обязанностей по подготовке ВЗП;
- нерешенные вопросы после предыдущих проверок (VIMSAS, внутренние проверки и т.д.);
- проведение внутренней проверки (своими силами) или внешней независимой подготовительной проверки (например, соседним государством — членом);
- изучение Сводных кратких отчетов о проверках (CASR, [8, 9, 10, 11 и 12]), в которых в обезличенной форме публикуются тексты выявленных замечаний, их причин и корректирующих действий, и которые регулярно публикуются ИМО в форме циркулярных писем.

Если государство внедрило общую Стратегию, направленную на обеспечение выполнения его международных обязательств и обязанностей как государства флага, порта и прибрежного государства (Кодекс ОДИ, параграф 3 [4]), то методология мониторинга и оценки такой Стратегии может рассматриваться как мощный инструмент управления для государства при подготовке к проверке IMSAS.

Следующим шагом в подготовке к проверке будет заполнение **«Вопросника, заполняемого до проверки»**, включая его разделы «Общая информация», «Часть 1: Общие области», «Часть 2: Государство флага», «Часть 3: Прибрежное государство» и «Часть 4: Государство порта». Важно привлечь для этого все государственные структуры, осуществляющие деятельность по соответствующим вопросам.

Необходимо давать краткие и четкие ответы / описания и, если это удобно, связывать ответы с приложениями, которые могут содержать описания, процедуры, схемы и т.д. и иллюстрировать реализацию государством применимых обязательных документов ИМО. Государству следует также рассмотреть возможность размещения ссылок на соответствующие веб-сайты, которые могут подтверждать приведенные в Вопроснике ответы и помочь группе проверки в подготовке к проверке. Государство — член должно обеспечить актуальность всей указанной документации и веб-сайтов.

Государство-член может рассмотреть возможность проведения **анализа пробелов (gap analysis)** в своей деятельности с использованием Неисчерпывающего перечня обязательств в соответствии с обязательными документами ИМО, относящимися к Кодексу ОДИ [7] и самого Кодекса ОДИ. При проведении такого анализа может быть использована система оценок "Хорошо", "Средне" или "Плохо", и может быть разработан план действий для устранения выявленных недостатков и для обеспечения улучшения.

Единое контактное лицо должно координировать со всеми государственными структурами вопрос о том, как **ознакомить с предстоящей проверкой** сотрудников, которые будут в ней участвовать, прежде всего — лицам, указанным в графике и выбранным для собеседований.

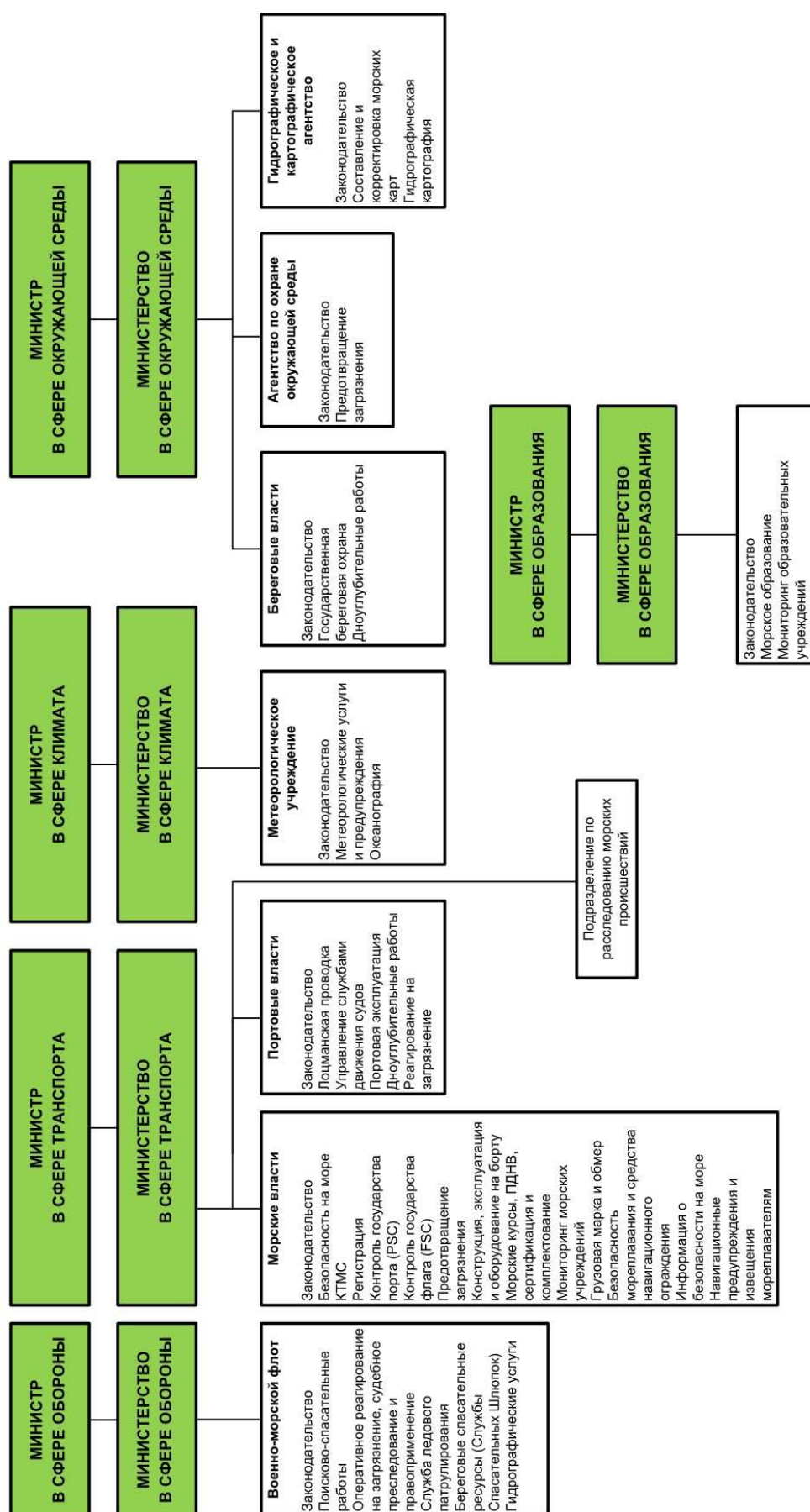


Рис. 1 Принципиальное распределение сфер ответственности между государственными органами в рамках обязательных документов ИМО

При этом проверяемым лицам рекомендуется **подготовиться к проверке самостоятельно**, например, по следующим вопросам:

- все вопросы, относящиеся к деятельности и зоне ответственности проверяемого лица;
- представление соответствующих объективных доказательств;
- что взять с собой на собеседование, включая, например, ноутбук с доступом к Wi-Fi;
- обеспечить работу баз данных, доступ к отчетным документам, объективным свидетельствам и т.д.;
- обеспечить, чтобы распределение обязанностей было понятным для всех участников;
- определить и упорядочить отчетные документы, файлы и архивы, а также примеры, которые будут продемонстрированы в ходе проверки.

Единое контактное лицо вместе с вовлеченными организациями должно обеспечить **назначение заместителей** всеми лицами, указанными в расписании, на случай отсутствия по болезни или по другим причинам.

Руководитель группы проверки должен знать **стандартный график работы** проверяемых и постараться под него подстроиться, чтобы не возлагать на проверяемых чрезмерную нагрузку и не повлиять на обычное время прихода на работу и ухода с работы или их профессиональные или личные обязательства.

Как правило, в субботу или воскресенье группа проверки прибывает в проверяемое государство и проводит свое очное подготовительное совещание. Обычно тогда же организуется подготовительная встреча между Единым контактным лицом и группой проверки, что дает возможность подтвердить все практические и административные договоренности о предстоящей проверке.

Сама проверка должна начинаться с вступительного совещания в первый день, далее следуют **в среднем пять дней** собеседований (в зависимости от размера и сложности проверяемого государства). Затем у группы проверки должен быть перерыв на два дня для подготовки проекта промежуточного отчета, включающего выводы и замечания, который должен быть представлен в последний день проверки.

Вопрос о **перемещениях внутри страны** учитывается при разработке графика проверки и должен быть сведен к необходимому минимуму, поскольку затрачиваемое на поездки время может значительно ограничить количество времени на проведение самой проверки.

Единое контактное лицо и руководитель группы проверки должны заранее согласовать такие **административные вопросы** как помощь в получении виз; организация прибытия проверяющих в аэропорт и ежедневный трансфер в отель и обратно; меры, касающиеся охраны. Кроме того, следует учесть такие аспекты как необходимые прививки; подходящее расположение отеля; конференц-зал для проверяющих; конференц-зал в отеле; подключение к Интернету в отеле / конференц-зале; любые поездки внутри страны в другие места, участвующие в проверке.

По возможности не рекомендуется использовать **устных переводчиков**, поскольку это значительно замедляет темпы проверки. Переводчики могут быть сотрудниками морской администрации и должны быть знакомы с техническим языком, относящимся к морским темам проверки. Руководители проверяемых лиц не должны выступать в качестве переводчиков.

Документы и записи могут быть доступны только на национальном языке. Государству следует заранее рассмотреть масштаб этой проблемы, чтобы заблаговременно обеспечить наличие важных документов на языке проверки.

Проверка

Проведение проверки должно соответствовать разделу 6 Рамочных принципов и процедур (резолюция А.1067(28)) [3].

Вступительное совещание является первым мероприятием и закладывает основу для всей проверки. На нем должны быть представлены все участники совещания вместе с группой проверки. Повестка готовится заранее руководителем группы проверки и включает все вопросы, перечисленные в пункте 6.3.2 Процедур. Государство самостоятельно решает, кто будет присутствовать на вступительном совещании, включая высокопоставленных представителей всех соответствующих государственных структур, участвующих в проверке.

Вступительное совещание проходит под председательством руководителя группы проверки, однако руководящее должностное лицо ведущего подразделения проверяемого государства должно также выступить со вступительными комментариями, приветствуя членов группы проверки, прежде чем передать ведение совещания руководителю группы проверки.

Сразу после вступительного совещания проверка переходит к представлению проверяемой стороной существующих в государстве институциональных механизмов для выполнения функций морской администрации и подробному разъяснению, как и где выполняются обязанности, содержащиеся в различных обязательных документах ИМО, включенных в объем проверки. Общая стратегия (раздел 6 Руководства) должна быть представлена в этом контексте.

Интервью должны проводиться непосредственно с лицами, которые являются экспертами в соответствующих проверяемых областях, при этом допускается присутствие «помощника» или переводчика.

Присутствие старшего руководителя или группы людей, следящих за группой проверки и отвечающих на все вопросы, подрывает доверие к экспертам и может создать у проверяющих невольное впечатление, что экспертам мешают свободно высказываться.

В определенный момент проверяющие могут разделиться, для того чтобы проверить отдельные вопросы и таким образом охватить больший объем проверенных областей.

Проверяющим следует использовать чек-лист проверки, приведенный в Циркулярном письме ИМО № 3425 («Руководство проверяющего лица» [6]). Он служит хорошим ориентиром для проверяемого государства в отношении типа информации, которую проверяющие будут стремиться собрать и проверить.

В принципе, группа проверки имеет доступ ко всем документам и записям (отчетным документам) во время проверки. Безусловно, государство может ограничить доступ или вовсе не передавать **конфиденциальные документы** проверяющим. Поэтому в качестве альтернативы оно может просто продемонстрировать конфиденциальные документы, а не передавать им копии. В этом отношении необходимо помнить, что проверяющие обязаны соблюдать подписанное ими перед проверкой Заявление о конфиденциальности.

Проверяющий может указывать проверяемому возможные замечания по мере их возникновения в ходе проверки, однако они не должны считаться окончательными до тех пор, пока они не будут рассмотрены всей группой проверки. Цель этого подхода состоит в том, чтобы обсудить все замечания коллективно и при необходимости структурировать, объединить их, или же попытаться найти общую проблему.

Выводы и замечания² должны быть официально представлены проверяемой стороне в письменном виде во время заключительного совещания. Проект промежуточного отчета о проверке должен быть предоставлен проверяемой стороне как можно раньше и до заключительного совещания, чтобы у нее было достаточно времени для его рассмотрения.

При проведении проверки проверяющие должны, насколько это возможно, стремиться предотвращать возникновение споров, хотя оно зачастую неизбежно. В целом, стороны должны стараться урегулировать разногласия по взаимной договоренности (см. пп. 7.2.3 и 7.2.4 Процедур проверки государств — членов [4] и раздел 7 Меморандума о сотрудничестве). В случае возникновения слишком серьезных проблем руководитель группы проверки должен связаться со Службой MSA (ИМО).

Если в ходе проверки выявлено замечание, то оно должно быть оформлено независимо от того, какие действия предпримет государство для его устранения.

Выводы формулируются только в отношении недостатков в национальном законодательстве проверяемого государства, а также в отношении осуществления и обеспечения выполнения положений документов ИМО, включая Кодекс ОДИ.

Отчетные документы с сформулированными замечаниями (Форма/формы А) должны быть согласованы и подписаны руководителем группы проверки и высокопоставленным представителем государства во время заключительного заседания в двух экземплярах.

Заключительное совещание — завершающее проверку мероприятие. Повестка дня совещания должна быть подготовлена заранее руководителем группы проверки и включать все вопросы, перечисленные в п. 6.5.4 Процедур. Совещание проходит под председательством руководителя группы проверки.

Руководителю группы проверки следует представить ознакомительную презентацию о разработке плана действий по устранению выявленных замечаний и по следующим шагам в оформлении отчетности по результатам проверки.

По итогам проверок оформляются промежуточный и затем — итоговый отчет о проверке в соответствии с п. 7 Процедур.

²Здесь также важно отметить, что в официальной русскоязычной терминологии ИМО "finding" означает «вывод» (фактически это несоответствие), а "observation" — «наблюдение» (замечание более низкого порядка, чем несоответствие) [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт ИМО и государств, являющихся ее членами, в области проведения и прохождения проверок IMSAS к настоящему моменту времени позволяет активно совершенствовать Систему проверок.

Прикладываемые ИМО усилия по оказанию помощи проверяемым государствам по подготовке к проверкам формируют будущую нормативную базу IMSAS, направленную на устранение «серых зон» и возможных проблемных областей, возникающих при подготовке и проведении проверок.

Разработка рассмотренного в статье Руководства ИМО по подготовке к проверкам IMSAS является своевременным мероприятием, которое окажет положительное влияние на процессы обеспечения и выполнения государствами — членами ИМО своих обязательств в области безопасности мореплавания и защиты морской среды.

Целесообразно, чтобы ИМО и ее Секретариат работали над повышением осведомленности, например, в формате семинаров для государств — членов, о результатах проводимых проверок, типовых проблемных областях и мерах по их устранению.

Издание дополнительного документа ИМО, регламентирующего проведение государствами самостоятельных периодических внутренних проверок и самооценки степени соответствия установленным требованиям ИМО представляется еще одним возможным мероприятием по дальнейшему совершенствованию Системы проверки ИМО.

Перечисленные рекомендации являются возможными мерами по улучшению деятельности государств в части выполнения требований ИМО и совершенствованию Системы проверки государств — членов ИМО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов О.А. Система проверки государств — членов ИМО: современное состояние и переход к дистанционному формату // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. №№ 64/65, 2021.
2. Чернов О.А. Типовые замечания, выявляемые при проверках государств — членов ИМО, и способы их устранения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1.
3. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1067(28). Рамочные принципы и процедуры Системы проверки государств — членов ИМО.
4. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1070(28). Кодекс по осуществлению документов ИМО.
5. Руководство по подготовке к проверке в соответствии с Системой проверки государств — членов ИМО (IMSAS). Документ III 8/9. 27.05.2022.
6. Циркулярное письмо ИМО 3547 «Руководство проверяющего ИМО». 08.05.2015.
7. Неисчерпывающий перечень 2021 года обязательств в соответствии с документами, которые указаны в Кодексе по осуществлению документов ИМО. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1157(32).
8. Циркулярное письмо ИМО 3772. 4 сентября 2017. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).
9. Циркулярное письмо ИМО 3879. 10 октября 2018. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).
10. Циркулярное письмо ИМО 4028. 13 сентября 2019. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).
11. Циркулярное письмо ИМО 4317. 15 сентября 2020. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).
12. Циркулярное письмо ИМО 4442. 1 октября 2021. Система проверки государств — членов ИМО — Сводный краткий отчет о проверке (CASR).

REFERENCES

1. Chernov O.A. *Sistema proverki gosudarstv — chlenov IMO: sovremennoe sostoyanie i perekhod k distantsionnomu formatu* [IMO Member State Audit Scheme. Current state and transition to remote mode]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping Nos. 64/65, 2021.
2. Chernov O.A. *Tipovye zamechaniya, vyvavlyayemye pri proverках gosudarstv — chlenov IMO, i sposoby ikh ustraneniya* [Typical findings issued during IMO member states audits and ways to eliminate them]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 15.1, 2023.
3. IMO Assembly Resolution A.1067(28). Framework and procedures for the IMO member State audit scheme.
4. IMO Assembly Resolution A.1070(28). IMO Instruments Implementation Code (III Code).
5. Draft guidance in relation to IMSS to assist in the implementation of the III Code. Document III 8/9. 27.05.2022.
6. IMO Circular Letter No.3547. Auditor's Manual for the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS). 08.05.2015.
7. 2021 non-exhaustive list of obligations under instruments relevant to the IMO Instruments Implementation code (III Code). IMO Assembly Resolution A.1157(32).
8. IMO Circular Letter No.3772. 4 September 2017. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
9. IMO Circular Letter No.3879. 10 October 2018. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
10. IMO Circular Letter No.4028. 13 September 2019. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
11. IMO Circular Letter No.4317. 15 September 2020. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).
12. IMO Circular Letter No.4442. 1 October 2021. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR).

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (<https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziologia [Neurophysiology]*. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichstva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

- цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

- краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;

- обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

- использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

- выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация — книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовки, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (boyko.ms@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtip.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

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

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 70/71

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 31.07.2023. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/