

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

**БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И
ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**
ОХРАНЯЕМАЯ ЗОНА ПРИ БУНКЕРОВКЕ СПГ

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ
КАЧКИ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ
КАК УНИКАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ



№ 78
март
2025

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

А.О. Березин — председатель, д.э.н., Российский морской регистр судоходства
М.С. Бойко — к.т.н., зам. председателя, Российский морской регистр судоходства
А.С. Большев — д.т.н., проф., СПбГПУ им. Петра Великого
А.В. Григорьев — к.т.н., доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.А. Иванченко — д.т.н., проф., зав. кафедрой ДВС и автоматики СЭУ, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.В. Ильин — д.т.н., доц., зам. генерального директора по научной работе, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»
М.А. Кутейников — д.т.н., помощник по науч.-техн. деятельности, Российский морской регистр судоходства
В.Н. Половинкин — д.т.н., проф., научный руководитель, Крыловский государственный научный центр
А.А. Родионов — д.т.н., проф., зав. кафедрой строительной механики корабля, СПбГМТУ
К.В. Рождественский — д.т.н., проф., директор департамента междунар. сотрудничества, СПбГМТУ
А.Е. Сазонов — д.т.н., проф., член-корр. РАН, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
О.Я. Тимофеев — д.т.н., проф., СПбГМТУ
В.Н. Тряскин — д.т.н., проф., зав. кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, СПбГМТУ
А.В. Кириченко — д.т.н., проф., зав. кафедрой портов и грузовых терминалов, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.Л. Кузнецов — д.т.н., проф., проф. кафедры портов и грузовых терминалов, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
В.В. Каретников — д.т.н., проф., первый проректор, зав. кафедрой судоходства на внутренних водных путях, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
Ю.М. Искандеров — д.т.н., проф., зав. лабораторией интеллектуальных систем, СПб ФИЦ РАН, СПИИРАН
В.А. Жуков — д.т.н., проф., зав. кафедрой судостроения и энергетических установок, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
С.В. Смоленцев — д.т.н., проф., зав. кафедрой автоматики и вычислительной техники, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
С.Н. Хрунков — д.т.н., проф., зав. кафедрой энергетических установок и тепловых двигателей, НГТУ им. Р.Е. Алексеева
М.Н. Покусаев — д.т.н., проф., зав. кафедрой эксплуатации водного транспорта, АГТУ
А.В. Анисимов — д.т.н., доц. кафедры наноструктурных, волокнистых и композиционных материалов им. А.И. Меоса, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»
В.В. Ярисов — д.т.н., проф. кафедры физики и общих дисциплин БВВМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова
А.А. Буцанец — к.т.н., доц. кафедры теории и конструкции судовых ДВС, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

Подписка на журнал может быть оформлена по каталогу «Урал-пресс». Подписной индекс 80534.

Электронная версия доступна по адресу: <https://sbornik.rs-class.org/jour>.
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

Alexey O. Berezin — Chairman of Editorial Board, DSc, Deputy Director General, RS
Maxim S. Boyko — Cand. Tech. Sc., Deputy Chairman, RS
Alexander S. Bolshev — DSc, Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University
Andrey V. Grigoriev — Cand. Tech. Sc., Assoc. Prof., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (SUMIS)
Alexander A. Ivanchenko — DSc, Prof., Head of the Dep. of ICE and Automation of Marine Power Plants, SUMIS
Alexey V. Ilin — DSc, Assoc. Prof., Deputy General Director and Head of the Research and Production Center, NRC Kurchatov Institute, CRISM Prometey
Mikhail A. Kuteynikov — DSc, Asst. in Scientific and Technical Activity, RS
Valery N. Polovinkin — DSc, Prof., Research Adviser, Krylov State Research Centre
Aleksander A. Rodionov — DSc, Prof., Head of the Dep. of Ship Structural Design, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU)
Kirill V. Rozhdestvenskiy — DSc, Prof., Director of the Dep. of International Cooperation, SMTU
Anatoliy Ye. Sazonov — DSc, Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), SUMIS
Oleg Ya. Timofeev — DSc, Prof., SMTU
Vladimir N. Tryaskin — DSc, Prof., Head of the Dep. of Design and Technical Operation of Ships, SMTU
Alexander V. Kirichenko — DSc, Prof., Head of the Dep. of Ports and Cargo Terminals, SUMIS
Alexander L. Kuznetsov* — DSc, Prof., Dep. of Ports and Cargo Terminals, SUMIS
Vladimir V. Karetnikov — DSc, Prof., First Vice-Rector, Head of the Dep. of Navigation on Inland Waterways, SUMIS
Yuriy M. Iskanderov — DSc, Prof., Head of the Lab. of Intelligent Systems, St. Petersburg Federal Research Center of RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS
Vladimir A. Zhukov — DSc, Prof., Head of the Dep. of Theory and Design of Ship ICE, SUMIS
Sergey V. Smolentsev — DSc, Prof., Head of the Dep. of Automation and Computer Engineering, SUMIS
Sergey N. Khrunkov — DSc, Prof., Head of the Dep. of Power Plants and Thermal Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University
Mikhail N. Pokusaev — DSc, Prof., Head of the Dep. of Operation of Water Transport, Astrakhan State Technical University
Andrey V. Anisimov — DSc, Assoc. Prof. of the A.I. Meos Dep. of Nanostructured, Fibrous and Composite Materials, NRC Kurchatov Institute, CRISM Prometey
Vladimir V. Yarisov — DSc, Prof., Dep. of Physics and General Disciplines, Admiral F.F. Ushakov Baltic Higher Naval College
Artem A. Butsanets — Cand. Tech. Sc., Assoc. Prof. Dep. of Theory and Design of Ship ICE, SUMIS

Subscription index is 80534 in Ural-press catalog.

On-line version of the journal is available at <https://sbornik.rs-class.org/jour>
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

№ 78

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
2025



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Реуцкий А.С., Павловский В.А.* Назначение размеров охраняемой зоны в ходе выполнения бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно» 4
- A.S. Reutskii, V.A. Pavlovsky* Assigning the size of the protected area during the TTS LNG bunkering operation

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

- Реуцкий А.С., Семионичев Д.С., Михеева А.А.* Определение критериев целесообразности создания климатических проектов на водном транспорте 16
- A.S. Reutskii, D.S. Semionichev, A.A. Mikheeva* Determining reasonability criteria for climate projects in water transport
- Березин А.О., Толмачев С.А., Шурпяк В.К.* Сравнительный анализ документов стратегического планирования ИМО и Российской Федерации в области сокращения выбросов парниковых газов 23
- A.O. Berezin, S.A. Tolmachev, V.K. Shurpyak* Comparative analysis of IMO and Russian Federation strategic planning documents related to greenhouse gas emissions reduction

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

- Литов Д.В., Хватов О.С.* Некоторые аспекты построения структуры системы управления морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) 35
- D.V. Litov, O.S. Khvatov* Some aspects of control system structure building for maritime autonomous and remotely controlled surface ships (MASS)

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

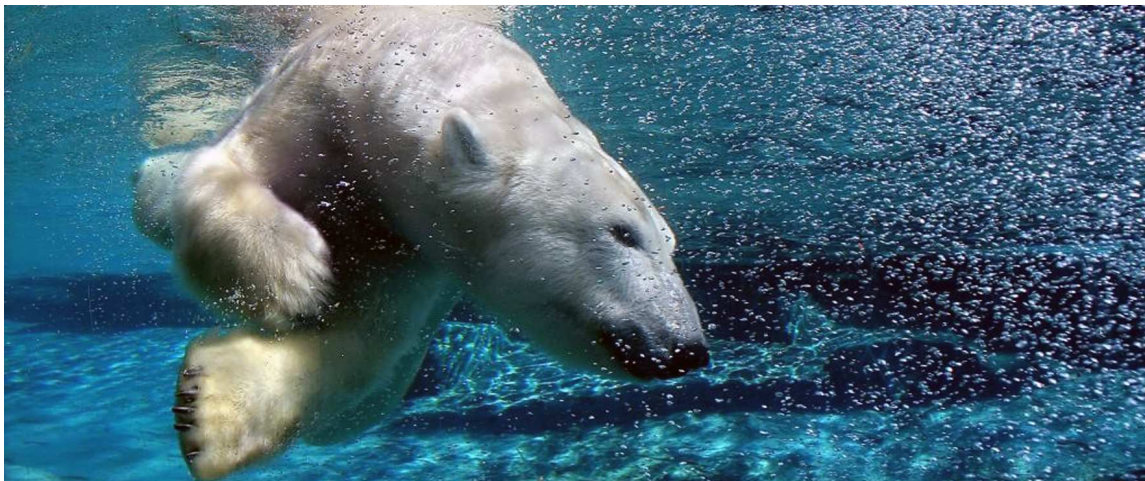
- Шульц С.В., Кутейников М.А., Шульц В.Ю.* Обзор применения искусственных нейронных сетей в задачах моделирования качки автономного судна 44
- S.V. Shults, M.A. Kuteinikov, V.Yu. Shults* An overview of application of artificial neural networks in modeling motions of autonomous vessel

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

- Бойко М.С.* Об определении расчетной температуры окружающего воздуха при выборе материалов корпусных конструкций на основе требований нормативных документов 51
- M.S. Boyko* Definition of design ambient temperature for the purpose of material selection for ship hull based on the normative documents
- Филин В.Ю., Мизецкий А.В., Бараков Д.Р.* Многофакторная модель распространения трещины в конструкционных элементах и образцах для расчетов методом конечных элементов 65
- V.Yu. Filin, A.V. Mizetsky, D.R. Barakov* Multiparametrical model of crack propagation in structural elements and specimens for FEM calculations
- Апполонов Е.М., Платонов В.В., Тряскин В.Н.* Методика разработки и практическая апробация расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений транспортных судов ледового плавания, основанных на новой модели динамического разрушения льда . . . 74
- E.M. Appolonov, V.V. Platonov, V.N. Tryaskin* Methodology for the development and practical testing of calculated dependencies for determining ice loads on the structures of ice reinforcements of ice-navigation transport vessels based on a new model of dynamic ice destruction
- Макарова Т.А.* Разработка диагональной системы набора бортовых перекрытий судов с широким раскрытием палубы 96
- T.A. Makarova* Development of a diagonal framing system for the side plating on ships with a wide deck opening

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

- Сенчурин Л.П., Иванова М.А., Черенкова С.В.* К вопросу об оптимизации массы двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора 111
- L.P. Senchurin, M.A. Ivanova, S.V. Cherenkova* On the issue of optimizing the mass of a two-stage bevel spur gearbox
- Абакумов А.М.* О возможности замены судовых малооборотных двигателей свободнопоршневыми двигателями 119
- A.M. Abakumov* On the possibility of replacing marine low-speed engines with free-piston engines
- Алексин Е.Н., Глазырина Д.О., Михеева А.А.* Методика расчета судовых систем обогрева балластных танков 134
- E.N. Aleksin, D.O. Glazyrina, A.A. Mikheeva* Methods of calculation of ship's ballast heating systems
- Равин А.А., Данг Тхань Дат* Опыт разработки системы дистанционного управления судовым крыльчатým движителем 143
- A.A. Ravin, Dang Thanh Dat* Experience in developing a remote-control system of Voith-Schneider propeller
- Шурпяк В.К., Rogozin А.В., Михеева А.А.* Применение различных схем охлаждения забортных теплообменных аппаратов 155
- V.K. Shurpyak, A.V. Rogozin, A.A. Mikheeva* Application of various cooling schemes for outboard heat exchangers



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.12 + 627.355.4 + 665.725
EDN YZMAKE

НАЗНАЧЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОХРАНЯЕМОЙ ЗОНЫ В ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ БУНКЕРОВКИ СПГ МЕТОДОМ «АВТОЦИСТЕРНА — СУДНО»

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

В.А. Павловский, д-р физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., 3, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Работа посвящена вопросу назначения размеров охраняемой зоны (security area) в ходе выполнения бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно». Были предложены исходные данные для сценария выполнения расчета (место утечки, оборудование, подверженное повреждениям, давление и параметры СПГ внутри шланга, размеры шланга для передачи бункерного СПГ), полученные в ходе выполнения оценки рисков проведения данной операции.

В статье обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильных руководящих документов. При решении задачи определения размера охраняемой зоны при бункеровке судна СПГ при помощи автоцистерны скорость истечения СПГ определялась двумя способами: по оригинальной методике проф. д.ф.-м.н. В.А. Павловского и по приближенной аппроксимирующей зависимости из стандарта IEC 60079-10-1:2021, показавшим в значительной степени близкие результаты. Описанный здесь расчетный алгоритм может быть использован при назначении размеров опасной зоны при планировании бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно».

Ключевые слова: охраняемая зона, СПГ, сжиженный природный газ, оценка рисков, утечка, TTS, метод «автоцистерна — судно».

Для цитирования: Реуцкий А.С. Назначение размеров охраняемой зоны в ходе выполнения бункеровки методом «автоцистерна — судно» / А.С. Реуцкий, В.А. Павловский // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 4 — 15. — EDN YZMAKE.

ASSIGNING THE SIZE OF THE PROTECTED AREA DURING THE TTS LNG BUNKERING OPERATION

A.S. Reutskii, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

V.A. Pavlovsky, DSc in Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

The work is devoted to the issue of assigning the size of a security area during the TTS LNG bunkering using the tanker-ship method. The initial data for the calculation scenario (leak location, equipment susceptible to damage, pressure and parameters of LNG inside the bunkering hose for liquid phase of LNG, dimensions of the hose for transferring bunker LNG) obtained during the risk assessment of this operation were proposed. When solving this problem, the LNG expiration rate was determined in two ways — according to the original methodology of Prof. V.A. Pavlovsky and the approximation from the IEC 60079-10-1:2021, which showed the same results.

The results of the study can be used to determine the size of the security area when planning LNG bunkering using the tanker-ship method. The research materials of domestic and foreign scientists, as well as relevant guidance documents, are summarized and analyzed.

Keywords: security area, LNG, liquefied natural gas, risk assessment, leakage, TTS, tanker-ship method.

For citation: Reutskii A.S., Pavlovsky V.A. Assigning the size of the protected area during the TTS LNG bunkering operation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 4 — 15. EDN YZMAKE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Международным кодексом по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки [1], риск-ориентированные методы [2] применяются для решения некоторых конструкционных задач: определения сценария аварийных нагрузок на емкость со сжиженным природным газом (далее — СПГ); определения объема емкостей для сбора утечек СПГ; выбора конструктивного исполнения бункеровочной станции СПГ; определения требуемых параметров вентиляции и определения дополнительных сценариев аварий.

В соответствии с имеющейся нормативной базой бункеровки судов СПГ — национальными стандартами [3] и [4], представляющими собой глубокую переработку международного стандарта ISO 20519:2021 NEQ [5] для отечественных реалий, перед проведением бункеровки СПГ [6] поставщик услуг обязан выполнить идентификацию и оценку рисков, учитывающую пожарные, криогенные и другие опасности, которые потенциально несет передача СПГ. Исследуемыми опасными событиями в соответствии с [3] являются: пожар, охрупчивание конструкций, обморожение и т.д. Для всех опасных событий могут быть применены известные решения. Так, для предотвращения охрупчивания корпусных конструкций применяются специальной формы и необходимого объема поддоны для сбора разлившегося СПГ, водяная завеса для смывания его брызг с палубы и борта судна в воду и т.п. В этой части целью оценки рисков является ужесточение проверки соблюдения всех этих мер ответственными за проведение бункеровки лицами и другими задействованными членами экипажа. С главным риском — утечкой и последующим образованием пожароопасной смеси метана с воздухом — все обстоит сложнее.

При выполнении риск-ориентированного исследования одним из обязательных к рассмотрению опасных сценариев развития событий является утечка СПГ или его паров с последующим образованием взрывоопасной смеси с воздухом. Обращение с горючими газозоодушными смесями на открытых пространствах регулируется назначением специальных зон, в пределах которых запрещено находиться незанятому в проведении операции персоналу, регулируется размещение невзрывозащищенного оборудования, способного вызвать возгорание местной атмосферы, запрещается проведение огневых работ, курение и т.п. Рекомендации Lloyd's Register (далее — LR) [7] по проведению бункеровки СПГ в порту, ссылаясь на соответствующие документы по стандартизации [8, 9], определяют эти зоны как взрывоопасные (hazardous zones), зоны безопасности (safety zones), зоны мониторинга и охраны (monitoring and security area). Помимо этого, в [7] вводится понятие морской запретной зоны (marine zone или marine exclusion zone), впервые упоминающееся в докладах Европейского агентства по безопасности морских перевозок EMSA [8] и Международного общества бункеровщиков СПГ SGMF [9].

В соответствии с определением из Части XI ПКПС Регистра [10], взрывоопасные зоны подразделяются на зону 0, где постоянно или в течение длительного периода времени присутствует взрывоопасная смесь воздуха и газа; зону 1, где при нормальных условиях работы возможно присутствие взрывоопасной смеси воздуха и газа; зону 2, в которой маловероятно появление взрывоопасной смеси воздуха и газа, а в случае появления эта смесь присутствует в течение непродолжительного периода времени. Требования, которые Регистр предъявляет к расположению и размерам взрывоопасных зон на судне, представлены в п. 19.2.3 Части XI ПКПС [10]. Размеры эти частично коррелируются с размерами, указанными в требованиях LR [7].

Несмотря на обязательное (в соответствии с п. 3.2.10.1 [11]) наличие в составе ТП и ПДСП газотопливного судна чертежа взрывоопасных помещений и пространств, назначаемые им размеры пожароопасных зон не могут быть применимы к операции бункеровки, так как учитывают режимы работы только судовой топливной системы СПГ и не учитывают условно произвольное расположение шлангового бункеровочного оборудования, особенности конструкции бустерных бункеровочных модулей и оборудования передающей бункерное топливо техники (автоцистерны СПГ или судна-бункеровщика), а также характерные для этого оборудования опасности.

Основной проблемой и камнем преткновения для получения разрешения на проведение bunkеровки СПГ в любом порту является назначение размера зоны безопасности (safety zone), которая физически ограждает площадку для выполнения bunkеровочной операции, включающую в себя газотопливное судно и источник СПГ (автоцистерна, судно-бункеровщик СПГ), от окружающего пространства (рис. 1).



Рис. 1. Ограждение зоны безопасности (safety zone), отмеченное стрелками

Несмотря на то, что зона безопасности должна быть физически ограждена, как это показано на рис. 1, в практике европейских bunkеровочных компаний эта мера зачастую не соблюдается. На рис. 2 представлена операция bunkеровки СПГ, при которой отсутствует какое-либо ограждение; более того, в непосредственной близости находится ричстакер, оборудованный двигателем внутреннего сгорания, на бетонном покрытии стоят контейнеры, а у расположившегося вблизи парома опущена аппарель. Все эти потенциальные источники искрообразования находятся в непосредственной близости к источнику потенциально горючей газозвоздушной смеси.



Рис. 2. Отсутствие ограждения зоны безопасности (safety zone)

LR [7] приводит следующие предварительные расстояния зон безопасности, рассчитанные на основе детерминированного подхода, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Предварительные расстояния зон безопасности по версии LR

Способ бункеровки	«Автоцистерна — судно»	«Судно — судно»		«Порт — судно»	
Тип танка СПГ		Тип «С»	Мембранный/ призматический	Сосуд под давлением	Плоскостенная емкость
Предварительные расстояния, м	60	30	50	25	25

Как видно из табл. 1, размер зоны безопасности для выполнения бункеровки способом «автоцистерна — судно» составляет наибольшее значение в 60 м. Конечно, данное значение соблюдается далеко не всегда. Зачастую зона безопасности едва ли составляет 5 м (рис. 3).



Рис. 3. Зона безопасности (safety zone)

Одним из способов обоснованного уменьшения зоны безопасности является выполнение риск-ориентированного исследования, которое требуется в соответствии с [3]. Частью этого исследования может являться исследование размера зоны безопасности, особенно если причальные сооружения стеснены находящимися рядом строениями или транспортно-логистическими объектами, грузовыми устройствами и другими источниками искрообразования.

1. ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определим, насколько размер зоны безопасности, назначаемый по рекомендации LR [7], может отличаться от размеров, устанавливаемых расчетным способом применительно к бункеровке методом «автоцистерна — судно». Выполним определение размера и протяженности зоны безопасности в соответствии с методикой, изложенной в актуальной версии IEC 60079-10-1 [12].

В ходе идентификации опасных ситуаций было определено, что утечка СПГ чаще всего происходит в шланговом соединении (рис. 4) [13].

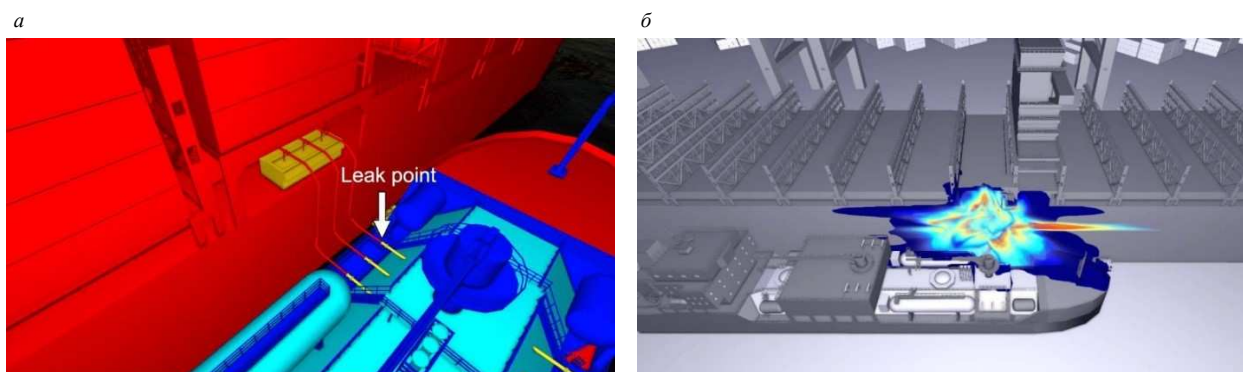


Рис. 4. а — место утечки СПГ на фланце манифольда судна-бункеровщика СПГ;
б — пример CFD-расчета распространения пожароопасной концентрации газозавоздушной смеси

В заметке [14] указывается, что после длительной работы у фланца из криогенной аустенитной нержавеющей стали 304L в зоне термического воздействия СПГ была обнаружена утечка, вызванная коррозией. Учитывая, что это разъемное соединение, которое постоянно разбирается и собирается, а методы оценки состояния прилегающих поверхностей фланцевого соединения и прокладки перед бункеровкой СПГ с автоцистерны сводятся к их визуальному осмотру, в ходе оценки рисков может быть сделан вывод о том, что именно прокладка фланцевого соединения может послужить источником утечки СПГ при ее повреждении.

Таким образом, целью исследования является анализ размера зоны для расстановки заграждений при проведении бункеровки СПГ с автоцистерны. В качестве исследуемого аварийного случая рассматривается выброс (утечка) СПГ из отверстия, образовавшегося во фланцевом соединении из-за повреждения прокладки фланца во время тестирования шлангового оборудования внутренним давлением 2 бара перед бункеровкой, при этом шланг наполнен СПГ. При срабатывании аварийной сигнализации активируется функция аварийного останова ESD, и утечка происходит только из внутреннего объема криогенного шланга.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ДЛЯ РАССТАНОВКИ ЗАГРАЖДЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БУНКЕРОВКИ СПГ МЕТОДОМ «АВТОЦИСТЕРНА — СУДНО»

2.1. Сценарий утечки.

В ходе исследования необходимо определить наихудший сценарий утечки, поэтому рассматривается жидкостная линия передачи СПГ: в ходе бункеровки происходит повреждение прокладки фланцевого соединения 6-дюймового шланга длиной 18 м (рис. 5), работающего под давлением 2 бара, расположенного горизонтально; из образовавшегося отверстия в атмосферу попадает СПГ, равный внутреннему объему шланга.

2.2. Вид утечки.

В соответствии с пунктом В.2.4 (b) стандарта IEC 60079-10-1 [12], «фланцы, соединения и трубопроводная арматура, из которых при нормальной эксплуатации не ожидается выброс горючих веществ», дают вторичную утечку.



б

Composite hose LNG	
Description	: Flexible hose assembly built in compliance to Directive EN ISO 13766
Diameter	: 6"
Length	: 18 meter
End 1	: 6" WN fixed flange ANSI 150# SS316
End 2	: 6" WN fixed flange ANSI 150# SS316

Рис. 5. Внешний вид (а) и параметры (б) шланга СПГ

2.3. Размер отверстия утечки.

В соответствии со сценарием утечки и таблицей В.1 Приложения В [12] определим размер отверстия утечки по следующей логической цепочке: тип оборудования > уплотнительные элементы на неподвижных деталях > фланцы > типичные значения для условий, при которых выпускное отверстие может увеличиваться вплоть до серьезного повреждения > размер отверстия равен произведению сектора между двумя болтами фланца и толщины прокладки.

Таким образом, определим длину сектора между двумя болтами фланцевого соединения:

$$L = \pi D_1 / n = 3,14 \cdot 241,3 / 8 = 94,75 \text{ мм},$$

где D_1 — диаметр центровки отверстий болтов фланца (рис. 6а);
 n — количество болтов.

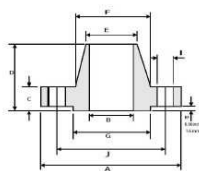
Определим площадь отверстия утечки:

$$S = L \cdot h \approx 284 \text{ мм}^2,$$

где h — толщина прокладки фланца, принятая равной 3 мм (рис. 6б).

а

Weld Neck Flanges - ANSI B16.5

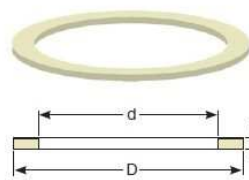


Weld neck flange dimensions class 150 (ASME B16.5)

Pipe	Flange Data				Hub Data		Drilling Data				Weight
Nominal Pipe Size in	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	kg/ piece
	Outside Diameter	Inside Diameter	Flange Thickness	Overall Length	Diameter at Weld Bevel	Hub Diameter	Face Diameter	Number of Holes	Bolt Hole Diameter	Diameter of Circle of Holes	
in	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	
6	11.00 279.4	6.074 154.2	1.000 25.40	3.500 88.90	6.630 168.2	7.550 192.7	8.500 215.9	8	0.880 22.40	9.500 241.3	10.6

б

Thermopac



Weight ≈ kg	Thread BSP	Materials / Application	Dimensions ≈ mm			Mann Tek Code No.
0,016	BSP 6"		D	d	s	
			164	150	3	1963-25

Рис. 6. а — параметры фланцевого соединения; б — параметры прокладки

2.4. Тип и форма утечки.

В соответствии с методикой определения типа и формы утечки, изложенной в [12], рассматриваемый здесь случай является тяжелой формой утечки, включающей в себя протяженные зоны. Формат подобного рода утечки представлен на рис. 7а и имеет следующее определение: струя жидкости, вытекающая, частично испаряется, попадая на поверхность — кипит. Таким образом, нужно оценивать два источника отпарного газа — струю жидкости и пятно.

2.5. Определение скорости истечения жидкой фазы СПГ.

При повреждении прокладки фланцевого соединения и под действием внутреннего давления $p = 2$ бара (200 000 Па) в трубопроводе СПГ начнет струйно вытекать из образовавшегося отверстия (рис. 7а, б). При помощи методики, предложенной проф. д.ф.-м.н. В.А. Павловским [15 — 17], определим скорость утечки жидкости.

В качестве допущения принято, что процесс изотермический, а давление внутри шланга не меняется в процессе истечения. Скорость истечения w (м/с) и объемный расход Q (м³/с) можно получить из уравнения Бернулли, записанного для 1 и 2 линии тока, приведенного к скорости:

$$w = \sqrt{2g \cdot \left(z + \frac{p - p_a}{\rho_{\text{СПГ}} \cdot g} \right)}, \text{ м/с},$$

где g — ускорение свободного падения;
 p — давление в трубопроводе, Па;
 p_a — атмосферное давление, Па;
 $\rho_{\text{СПГ}}$ — давление в трубопроводе СПГ в момент времени $t = 0$;
 z — уровень жидкости в шланге.

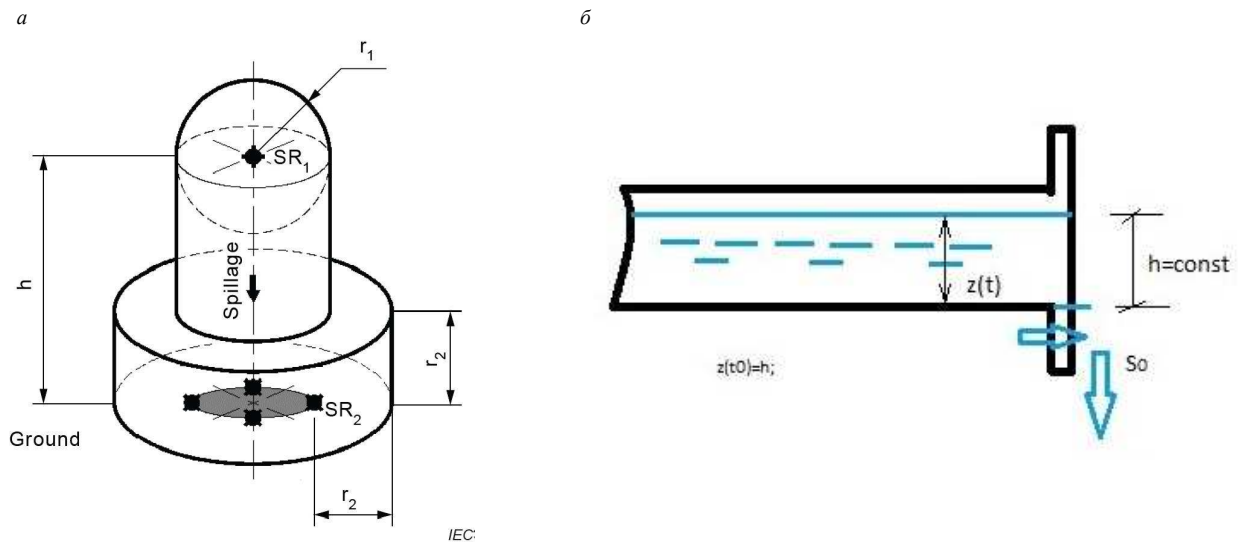


Рис. 7. а — формат криогенной утечки, где S_R — источник утечки, r — основная протяженность опасной зоны, подлежащая определению с учетом расчетного опасного расстояния;
 r' , r'' — вторичные границы опасной зоны, которые должны быть определены с учетом характера выбросов;
 h — расстояние между источником выброса и уровнем земли или поверхностью ниже места выброса;
 б — схема повреждения фланцевого соединения

Расход жидкости через отверстие площадью S , м^2 , с учетом коэффициента расхода, который можно принять равным $\mu_p = 0,64$, выразится формулой:

$$Q = \mu_p \cdot S \cdot w, \text{ м}^3/\text{с},$$

где S — площадь сечения отверстия, м^2 ;
 w — скорость истечения, $\text{м}/\text{с}$.

Для каждого значения z (рис. 5б) своя скорость истечения w и свой расход Q . Уравнение баланса массы заключается в том, что количество жидкости, связанное с понижением уровня, равно количеству жидкости, вышедшему из отверстия:

$$-Fdz = Qdt,$$

где F — площадь раздела фаз в трубе, м^2 .

Истечение заканчивается, когда скорость истечения становится равной нулю: $w = 0$.

Произведем пример расчета 1-й итерации истечения СПГ. В начальный момент времени в шланге с внутренним диаметром $D = 0,1542$ м, длиной $L = 18$ м и внутренним объемом $V = 0,336$ м^3 находится $0,335$ м^3 жидкой фазы СПГ плотностью $\rho_{\text{СПГ}} = 425$ $\text{кг}/\text{м}^3$ и $0,00057$ м^3 его паров плотностью $\rho_{\text{пар}} = 1,7$ $\text{кг}/\text{м}^3$. При прорыве прокладки фланцевого соединения между радиально расположенными относительно оси фланца болтами образуется отверстие площадью $S = 0,0002843$ м^2 . Шаг итерации по времени $\Delta t = 1$ с.

В начальный момент времени $t = 0$ уровень в трубе соответствует $z = 0,1542$ м, найдем площадь раздела фаз F , м^2 :

$$F = c \cdot L, \text{ м}^2,$$

где c — длина боковой проекции раздела фаз в трубе (рис. 8), м.

$$c = 2\sqrt{R^2 - l^2}, \text{ м},$$

где R — радиус трубы, м;

l — расстояние от оси вращения сечения до верхнего уровня СПГ в шланге (рис. 8), м.

$$z > R \rightarrow l = z - R, \text{ м},$$

$$z < R \rightarrow l = R - z, \text{ м}.$$

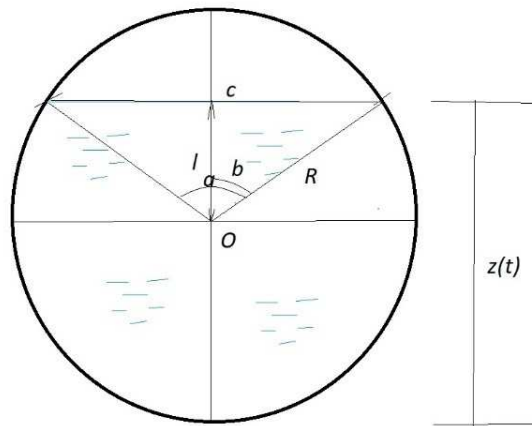


Рис. 8. Сечение трубопровода с СПГ

Определим количество жидкой фазы в шланге:

$$V_{\text{СПГ}} = V - V_{\text{ОГ}}, \text{ м}^3,$$

где $V_{\text{ОГ}}$ — объем паровой фазы, м^3 .

$$V_{\text{ОГ}} = S_{\text{пр}} - S_{\text{ОГ}} \cdot L, \text{ м}^3,$$

где $S_{\text{пр}}$ — площадь сечения шланга, м^2 ;

$S_{\text{ОГ}}$ — площадь сечения паровой фазы, м^2 .

$$z > R \rightarrow S_{\text{ОГ}} = S_{\text{пр}} - \frac{(\alpha - \sin \alpha) \cdot R^2}{2}, \text{ м}^2,$$

$$z < R \rightarrow S_{\text{пр}} = \frac{(\alpha - \sin \alpha) \cdot R^2}{2}, \text{ м}^2,$$

где $\alpha = 2 \cdot \arcsin(\sin b)$, рад.

$$\sin b = 0,5c/R,$$

где c — длина боковой проекции раздела фаз в трубе (рис. 5), м.

Находим понижение уровня Δz за время Δt :

$$\Delta z = \frac{Q}{F} \Delta t, \text{ м.}$$

Уровень СПГ понизится за счет уменьшения величины z , которая станет равной:

$$z_{t+1} = z_t - \Delta z, \text{ м.}$$

Далее вычисляем скорость v уже для этого нового значения z , находим $Q(z)$ и новое Δz и т.д.

Для приведенных входных данных время истечения (количество итераций) составило $85 \text{ с} \approx 1,4 \text{ мин}$, средняя скорость истечения $w = 21,58 \text{ м/с}$, средний объемный расход $Q = 0,0039 \text{ м}^3/\text{с}$, средний массовый расход $W_g = Q \cdot \rho_{\text{СПГ}} = 1,66 \text{ кг/с}$.

Необходимо отметить, что результат среднего массового расхода, являющийся ключевым в данном расчете, полученный с помощью данной методики, полностью коррелируется со значением массового расхода, полученным при помощи формулы В.1 стандарта [12]:

$$W_{g\text{liq}} = C_d S \sqrt{2\rho \Delta p} = 0,64 \cdot 0,0002843 \sqrt{2 \cdot 425 \cdot (200000 - 101325)} = 1,66 \text{ кг/с},$$

где C_d — коэффициент расхода, который можно принять равным 0,64;

S — площадь отверстия утечки, м^2 ;

ρ — плотность СПГ, кг/м^3 ;

Δp — перепад давления, Па.

2.6. Определение скорости истечения паровой фазы СПГ.

Струя жидкого СПГ, попадающая на поверхность (палубу, воду или покрытие причала) образует пятно, с поверхности которого происходит активное испарение СПГ в виде поверхностного или пузырькового кипения. В ходе итерации длительностью $\Delta t = 1$ с вылилось $V = 0,0039$ м³ жидкости, образовав пятно радиусом R :

$$R = (\pi V / \delta)^{0,5} = (\pi \cdot 0,0039 / 0,001)^{0,5} = 3,512 \text{ м},$$

где $\delta = 0,001$ м, толщина пятна.

Тогда площадь пятна составляет:

$$A_p = \pi R^2 = 38,75 \text{ м}^2.$$

Скорость объемного испарения СПГ из этого пятна по ИЕС 60079 [12] составит

$$Q_g = \frac{18,15 \cdot 10^{-8} \cdot u_w^{0,78} \cdot A_p \cdot p_v}{M^{0,333}} \times \frac{T_a}{T} = 0,38 \text{ м}^3/\text{с}.$$

где u_w — скорость ветра, м/с;
 M — молярная масса паров СПГ = 16,04 кг/кмоль;
 T_a — температура окружающей среды = 293 К;
 T — температура СПГ = 110 К;
 p_v — давление насыщенных паров СПГ при $T = 87$ 900 Па.

$$W_{gas} = Q_g \cdot \rho_g = 0,38 \cdot 425 = 205 \text{ кг/с}.$$

Величина u_w в соответствии с [12] определяется по таблице С.1 и для источника утечки, находящегося на высоте до 2 м, составляет 0,5 м/с.

Таким образом, за одну секунду с пятна испарится 0,38 м³ пара, или 205 кг, в то время как нальется $Q = 0,0039$ м³, или 1,66 кг. Значит, пятно или не будет существовать в принципе, или время его существования будет менее шага итерационного процесса. Это является важным этапом расчета и показывает, что СПГ будет испаряться и превращаться в газ до того, как достигнет поверхности (палубы или воды), поэтому примем $Q_g = Q = 0,0039$ м³/с, $W_g = W_{glq}$.

2.7. Определение степени разбавления.

Определим степень разбавления, как показано в п. С.3.5 ИЕС 60079 [12]. Для этого определим плотность паров СПГ:

$$\rho_g = \frac{p_a \cdot M}{T_a \cdot R} = 0,667 \text{ кг/м}^3,$$

где $p_a = 101$ 325 — атмосферное давление, Па;
 M — молярная масса паров СПГ = 16,04 кг/кмоль;
 T_a — температура окружающей среды = 293 К;
 $R = 8314,15$ — газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

Определим объемную характеристику утечки:

$$Q_c = \frac{W_g}{\rho_g \cdot LFL} = \frac{1,67}{0,667 \cdot 0,05} = 50 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $LFL = 0,05$ — нижний предел воспламенения по воздуху.

Таким образом, степень разбавления характеризуется как низкая (рис. 9а).

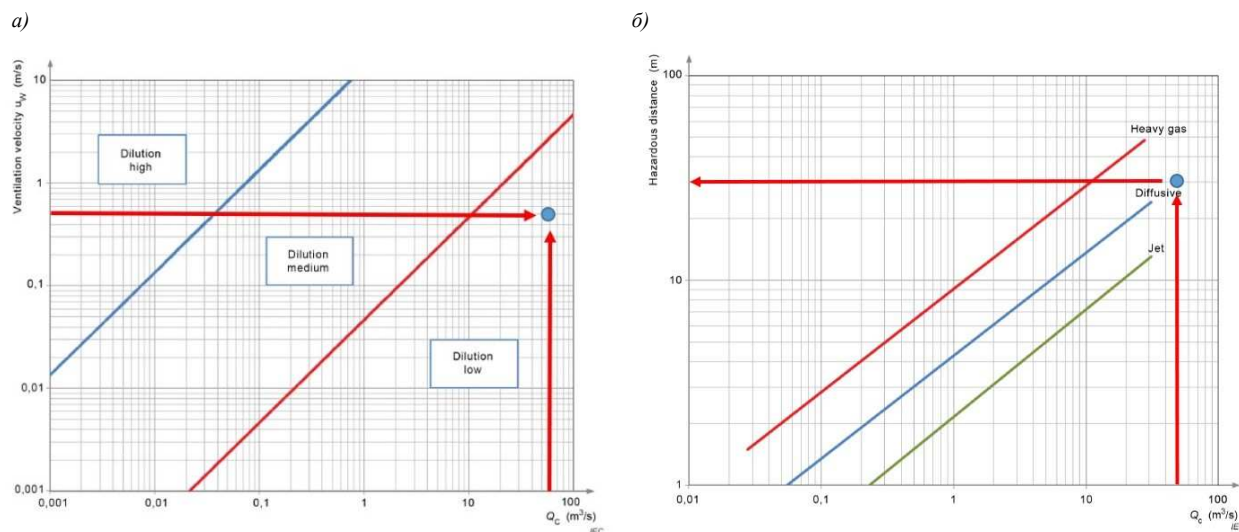


Рис. 9. а — степень разбавления; б — размер опасной зоны

2.8. Определение типа опасной зоны.

Тип опасной зоны определен как Zone 1 в соответствии с таблицей D.1 стандарта IEC 60079 [12] и с учетом вида утечки (вторичная) и степени разбавления (низкая).

2.9. Определение размера опасной зоны.

Таким образом, безопасная дистанция во все стороны для рассматриваемой утечки (Diffusive) (рис. 9б) составит 30 м. Представим результаты исследования в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования

Условия: криогенный шланг диаметром 6', перекачивающий СПГ, установленный выше уровня открытой палубы. В результате повреждения прокладки фланцевого соединения происходит утечка СПГ.		
Характеристика утечки:		
Вещество	Кипящий СПГ, превращающийся в ОГ	
Молярная масса, кг/кмоль	16,04	*в критической точке
Нижний предел воспламенения, LFL, vol/vol	0,05	
Температура самовоспламенения, С	537,8	
Плотность паров СПГ, ρ_g , кг/м ³	0,667	
Источник утечки	Фланцевое соединение	
Вид утечки	Вторичная	
Скорость утечки жидкости, $W_{gl\dot{q}}$, кг/с	1,67	определяется с учетом коэффициента расхода $C_d=0,64$, размера отверстия $S=284\text{ мм}^2$, плотности жидкости $\rho=0,425\text{ кг/м}^3$ и перепада давления $\Delta p=2\text{ бара}$
Скорость утечки газа, W_{ggas} , кг/с	205	скорость испарения СПГ из пятна больше скорости утечки СПГ из трубопровода ($205>1,67$), принимаем $W_g=W_{gl\dot{q}}$
Характеристика места утечки:		
Местоположение	Открытая местность	
Атмосферное давление, p_a , Па	101 325	
Температура окружающего воздуха, T , °C (K)	20 °C (293 K)	
Скорость вентилирования, $u_{\text{в}}$, м/с	0,5	
Характеристика вентиляции	Хорошая	
Параметры утечки:		
Степень разбавления	Низкая	
Тип зоны	Zone 1	
Радиус зоны (шар)	30 м	

ВЫВОДЫ

В представленном исследовании предпринята попытка создания расчетного алгоритма назначения размеров охраняемой зоны (security area) в ходе выполнения бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно». Были предложены исходные данные для сценария выполнения расчета (место утечки, оборудование, подверженное повреждениям, давление и параметры СПГ внутри шланга, размеры шланга для передачи бункерного СПГ), полученные в ходе выполнения оценки рисков. В ходе решения данной задачи скорость истечения СПГ определялась двумя способами: по оригинальной методике проф. д.ф.-м.н. В.А. Павловского и по приближенной аппроксимирующей зависимости из стандарта IEC 60079-10-1:2021 [12], показавшим предельно схожие результаты. Результаты исследования могут быть использованы при назначении размеров опасной зоны в ходе планирования бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно» как расчетный алгоритм, а в случае использования аналогичного принятому в данной статье шланговому и другому бункеровочному оборудованию радиус охраняемой зоны может быть принят равным 30 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный Кодекс по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ). Резолюция MSC.391(95) (принята 11 июня 2015 года).
2. Шурпак В.К. Использование формализованной оценки безопасности для судовых аммиачных холодильных установок / В.К. Шурпак, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 14 — 23. — EDN EBEQMS.
3. ГОСТ Р 59021-2020. Нефтяная и газовая промышленность. Грузовые операции и бункеровка сжиженным природным газом. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2020.
4. ГОСТ Р 70618-2022 (ISO 20519). Суда и морские технологии. Бункеровка судов, работающих на сжиженном природном газе. Требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
5. ISO 20519:2021. Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels. Ed. 2. 2021.
6. Чеснокова И. Г. Мировой флот судов-бункеровщиков СПГ / И.Г. Чеснокова, А.А. Зыкова, А.В. Варламова // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2024. — № 3(11). — С. 84 — 99. — EDN XCCRQA.
7. Common Guidelines for LNG Bunkering Operations at Spanish Ports. Book I: Technical Guide. EU Core LNGas hive Project (ET1) Oct 2021 / Lloyd's Register.
8. Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations. EMSA. 2018.
9. SGMF FP02-01 Recommendations of Controlled Zones during LNG Bunkering. Version 1.0, May 2018.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Электрическое оборудование / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.
11. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I. Классификация / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.
12. IEC 60079-10-1:2021 Explosive atmospheres. Part 10-1: Classification of areas — Explosive gas atmospheres.
13. Kong X. Quantitative analysis of leakage consequences of LNG ship-to-ship bunkering based on CFD / X. Kong, W. Jiao, W. Xiang, Q. Wang et al. // Energies. — 2023. — Vol. 16, Issue 12. — P. 4631. — DOI 10.3390/en16124631.
14. Inspection of stainless steel flanges of LNG gasification stations // Landee Flange. — March 15, 2023. [Электронный ресурс] URL: <https://www.landee-flange.com/inspection-of-stainless-steel-flanges-of-lng-gasification-stations.html> (дата обращения 24.02.2025).
15. Павловский В.А. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа / В.А. Павловский, А.С. Реуцкий. — СПб.: КГНЦ, 2019. — 88 с. — EDN EZHRNH.
16. Реуцкий А.С. Определение потерь СПГ при выполнении бункеровки и сопутствующих технологических операций / А.С. Реуцкий, О.В. Таровик, В.А. Павловский // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Специальный выпуск 1. — С. 122 — 130. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-122-130. — EDN TFMMJP.
17. Павловский В.А. Обоснование характеристик грузовой системы бункеровщиков сжиженного природного газа / В.А. Павловский, А.С. Реуцкий // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Специальный выпуск 2. — С. 191 — 199. — DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199. — EDN VOWLGK.

REFERENCES

1. International Code of Safety for Ships Using Gases of Other Low — Flashpoint Fuels (IGF Code). Resolution MSC. 391(95) (adopted on 11 June 2015).
2. Shurpyak V.K., Semionichev D.S., Reutskii A.S., Mikheeva A.A. The use of a formalized safety assessment for marine ammonia refrigeration units. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 14 — 23. EDN EBEQMS. (In Russ.)
3. GOST P 59021-2020. Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Gruzovye operatsii i bunkerovka szhizhennym prirodny gazom. Obshchie trebovaniya [State Standard P 59021-2020. Petroleum and natural gas industries. Cargo operations and LNG bunkering. General requirements]. Moscow: Standartinform, 2020.
4. GOST P 70618-2022. (ISO 20519). Suda i morskoe tekhnologii. Bunkerovka sudov, rabotayushchikh na szhizhennom prirodnom gaze. Trebovaniya. [State Standard P 70618-2022 (ISO 20519). Ships and marine technology. Bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels. Requirements]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2023.
5. ISO 20519:2021. Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels. Ed. 2. 2021.
6. Chesnokova I.G., Zykova A.A., Varlamova A.V. The global fleet of LNG bunkering vessels. *Transactions of State Marine Technical University*. 2024. No. 3(11). P. 84 — 99. EDN XCCRQA. (In Russ.)
7. Common Guidelines for LNG Bunkering Operations at Spanish Ports. Book I: Technical Guide. EU Core LNGas hive Project (ET1) Oct 2021 / Lloyd's Register.
8. Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations. EMSA. 2018.
9. SGMF FP02-01 Recommendations of Controlled Zones during LNG Bunkering. Version 1.0, May 2018.
10. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XI. Electrical equipment / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.
11. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.
12. IEC 60079-10-1:2021 Explosive atmospheres. Part 10-1: Classification of areas — Explosive gas atmospheres.
13. Kong X., Jiao W., Xiang W., Wang Q. et al. Quantitative analysis of leakage consequences of LNG ship-to-ship bunkering based on CFD. *Energies*. 2023. Vol. 16, Issue 12. P. 4631. DOI 10.3390/en16124631.
14. Inspection of stainless steel flanges of LNG gasification stations. *Landee Flange*. March 15, 2023. URL: <https://www.landee-flange.com/inspection-of-stainless-steel-flanges-of-lng-gasification-stations.html> (accessed 24.02.2025).
15. Pavlovskii V.A., Reutskii A.S. Teplofizicheskie osnovy morskoi transportirovki i bunkerovki szhizhennogo prirodnogo gaza [Thermophysical basis of marine transportation and bunkering of liquefied natural gas]. St. Petersburg: KGNTs, 2019. 88 p. EDN EZHRNH.
16. Reutsky A., Tarovik O., Pavlovsky V. Evaluation of liquefied natural gas losses during bunkering and accompanying working operations. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Edition No. 1. P. 122 — 130. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-122-130. EDN TFMMJP. (In Russ.)
17. Pavlovsky V., Reutsky A. LNG bunker handling system verification. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018. Special Edition No. 2. P. 191 — 199. DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199. EDN VOWLGK. (In Russ.)



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.12 + 551.588.74
EDN ZURMGR

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Д.С. Семионичев, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А; аспирант, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

В работе затрагивается нормативная база климатических проектов на водном транспорте. Целью исследования является построение логической последовательности действий для оценки применимости того или иного вида климатического проекта на водном транспорте. Задачей исследования является эксперимент по применению метода экспертной оценки для определения целесообразности создания климатического проекта в соответствии с выделенными критериями, а также сравнения климатических проектов, имеющих общие цели и различающихся исполнением. Обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильных руководящих документов. В исследовании продемонстрирована нормативная база применения климатических проектов, а также намечены основные пути оценки применимости климатических проектов на водном транспорте. Дальнейшими шагами авторов станут оценка привлекательности участия заинтересованных лиц в климатических проектах, касающихся внесения изменений в конструкцию или устройство судна с целью удовлетворения формальным признакам климатического проекта.

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

Для цитирования: Реуцкий А.С. Определение критериев целесообразности создания климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 16 — 22. — EDN ZURMGR.

DETERMINING REASONABILITY CRITERIA FOR CLIMATE PROJECTS IN WATER TRANSPORT

A.S. Reutskii, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

D.S. Semionichev, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

A.A. Mikheeva, Lead R&D Specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A; PhD student, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

The paper examines the regulatory framework for climate projects in water transport. The purpose of the study is to obtain a logical sequence of actions to assess the applicability of a particular type of climate project in water transport. The purpose of the study is to demonstrate the implementation of the expert assessment method to determine the reasonability of creating a climate project in accordance with the proposed criteria, as well as to compare climate projects with common goals and differing in execution. The research materials of domestic and foreign scientists, as well as relevant guidance documents, are summarized and analyzed. The study demonstrates the regulatory framework for the application of climate projects, as well as outlines the main ways to assess the applicability of climate projects in water transport. Further actions of the authors will be to assess the attractiveness of the participation of stakeholders in climate projects related to making changes to the design or device of the vessel in order to meet the formal characteristics of the climate project.

Keywords: climate project, power plant, ship transport efficiency, alternative fuels, carbon unit.

For citation: Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Determining reasonability criteria for climate projects in water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 16 — 22. EDN ZURMGR. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Климатический проект — это перечень мероприятий, направленных на уменьшение (предотвращение) выбросов парниковых газов и/или увеличение поглощения парниковых газов применительно к структуре с определенными границами — государству, единице государственного устройства (субъекту), компании вне зависимости от формы собственности или ее структурному подразделению. Сведения об отечественной и зарубежной базе климатических проектов представлены в исследовании [1], где дана оценка имеющимся в настоящий момент правовым инструментам по работе с ними. Проведенный авторами анализ показал, что практически любое действие с транспортным судном, напрямую или косвенно приводящее к уменьшению выбросов парниковых газов или повышению эффективности выполнения им транспортной работы при сохранении или уменьшении уровня выбросов парниковых газов в атмосферу, может быть квалифицировано как климатический проект, при реализации которого возможно:

- получение прибыли в чистом виде при реализации углеродных единиц на созданном добровольном рынке углеродных единиц;
- использование углеродных единиц для погашения финансовых обязательств, вклад их в уставные капиталы других организаций, использование их в качестве предмета обмена [2];
- уменьшение налоговых сборов на выбросы благодаря возможности использовать полученные в рамках КП углеродные единицы в зачет углеродного следа;
- повышение имиджа организации и определенные конкурентные преимущества ее продукции или услуг по критерию экологичности.

Необходимость в удовлетворении международных требований по выбросам заставляет судовладельцев вносить существенные изменения в проекты строящихся судов и проводить модернизацию существующих судов различными способами, описанными в [1, 3, 4]. Таким образом, введение понятия климатического проекта в российскую нормативную базу может быть интересно отечественным судовладельцам отчасти по уже озвученным причинам, а также и потому, что это дает возможность получить синергетический позитивный эффект, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц.

Таким образом, при выборе способа удовлетворения ужесточаемых международных климатических норм для морского судна или для снижения выбросов судна, функционирующего на внутренних водных путях или в территориальных водах Российской Федерации, необходимо также ориентироваться на возможность регистрации предпринимаемых мер как климатического проекта.

В решении этой задачи может помочь определенный набор критериев, который раскрывает сущностную часть климатического проекта, а также способствует созданию алгоритма оценки применимости того или иного вида климатического проекта на водном транспорте, определяет целесообразность его создания, а также позволяет сравнивать климатические проекты, имеющие одинаковые цели и отличающиеся исполнением (способом реализации).

В соответствии с представленной в главе 1 нормативной базой, разработка КП актуальна для организаций, чья деятельность сопряжена с выбросами парниковых газов в следующих количествах:

- в период до 01.01.2023 — $150 >$ тыс. т CO_2 -экв. в год;
- в период с 01.01.2024 — $50 >$ тыс. т CO_2 -экв. в год.

В соответствии с имеющимся на данный момент законодательством, в результате разработки климатического проекта разработчиком должны быть предоставлены следующие документы:

- проектное описание и дизайн проекта для прохождения валидации;
- отчетность по мониторингу проекта;
- отчет по климатическому проекту для его верификации.

Помимо предоставляемых документов, принятие решения по оценке климатического проекта на соответствие предъявляемым требованиям, то есть введение критериев оценки, должно быть основано на:

- экономической целесообразности проекта;
- реализуемости проекта в данное время и во всех возможных условиях;
- удобстве проекта с точки зрения его дальнейшей реализации;
- технической документации, включенной в состав климатического проекта;
- оригинальности проекта;
- технологичности проекта;
- обосновании проекта теоретическими расчетами/исследованиями;
- возможности модернизации проекта в будущем.

Рассмотрим критерии климатических проектов применительно к выделенным аспектам.

Критерий экономической целесообразности является во многом определяющим при обосновании необходимости в разработке какого-либо (не только климатического) проекта.

Критерий реализуемости, в соответствии с [5], показывает, насколько велики трудности (организационные, юридические и т. п.) реализации рассматриваемого проекта. Его компонентами являются: степень подготовленности технологий, обеспеченность материально-техническими ресурсами, условия инвестирования, наличие производственных мощностей, подготовленность проектно-сметной документации и т.д.

Удобство является субъективным критерием и во многом может зависеть от компетенций административного ресурса в данном вопросе. Здесь понимается удобство проекта с точки зрения его дальнейшей реализации (проект понятен заинтересованным лицам и удобен в реализации, то есть включает четко изложенную последовательность действий).

Критерий наличия технической документации достаточно объективен и в общем виде звучит как ответ на вопрос: «В достаточном ли количестве предоставлена техническая документация по проекту для успешного процесса его валидации и согласования на различных уровнях?» Критерий должен иметь большой вес в том случае, если разрабатываемый климатический проект представляет собой техническое решение, направленное на снижение выбросов парниковых газов или повышение эффективности какого-либо технического изделия, и в состав климатического проекта должна быть включена проектная техническая документация, отвечающая предъявляемым к ней требованиям (по применимости) и при этом содержащая доказательную базу характеристик технического решения, позволяющих судить о его роли в снижении/предотвращении выбросов ПГ.

Критерий оригинальности проекта может быть необходим для принимающей проект стороны (т.е. заказчика). Он дает понимание, уникальный ли разрабатывается проект или типовой, и позволяет судить об оригинальности проекта: насколько велика его инновационная составляющая либо позволяет ли он усовершенствовать имеемые технические решения таким образом, что о них можно было бы судить как о принципиально новых.

Критерий технологичности проекта призван осветить критерий реализуемости с точки зрения инфраструктуры климатического проекта (может быть включен в критерий реализуемости как один из аспектов). Он позволяет судить о технологичности проекта с точки зрения возможности применять предлагаемые технологии/решения и т.д. (например, предложение использовать для реализации технологического процесса возобновляемые источники энергии при их фактическом отсутствии).

Критерий обоснованности проекта теоретическими расчетами/исследованиями необходим для инновационных проектов, где он подтверждает правильность применяемой физической модели при помощи ее теоретического расчета с использованием физико-математических формул.

Критерий модернизации необходим для определения временных границ действия проекта и возможности их теоретического продления.

СРАВНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Выполним сравнение климатических проектов на морском транспорте, пользуясь определенными ранее критериями. Сравним следующие проекты:

- *проект № 1*, или проект, имеющий целью снижение выбросов путем экономии топлива в рейсе за счет применения технологии «умного» роутинга, позволяющего транспортному судну в рейсе избегать штормовых условий, задержек из-за очередей судов и других неблагоприятных ситуаций и тем самым предотвращать избыточную трату топлива;
- *проект № 2*, или проект, имеющий целью снижение выбросов путем установки специального дополнительного оборудования на борту судна, очищающего отработавшие газы;
- *проект № 3*, или проект, имеющий целью снижение выбросов путем установки топливной аппаратуры и применения других (в т.ч. конструктивных, противопожарных) мер для применения альтернативных видов топлива на борту судна.

Критерий экономической целесообразности этих трех проектов наиболее сложный в оценке, так как требует проведения технико-экономического исследования всех трех проектов. Однако, если допустить, что все три проекта будут иметь одинаковую эффективность в плане снижения выбросов парниковых газов, затраты на реализацию проекта № 1 ожидаются ниже, чем для других проектов.

Это объясняется развитием систем искусственного интеллекта [6, 7], доступностью актуальных прогнозных данных (например, спутниковых снимков), совершенствующимся климатическими моделями и системами спутниковой связи. Работы по данному направлению уже давно активно ведутся [8], и существуют специальные сервисы, оказывающие подобного рода услуги. Например, в блок «Управление выбросами» [9] цифрового решения от LR под названием OneOcean входят модули, которые позволяют получить информацию и техническую экспертизу, необходимые для соответствия требованиям ETS Европейского союза. Производится предварительная оценка выбросов в рейсе, распределение квот, а затем отслеживание выбросов в реальном времени в соответствии с этими нормативами с целью их окончательной корректировки (рис. 1а, б).

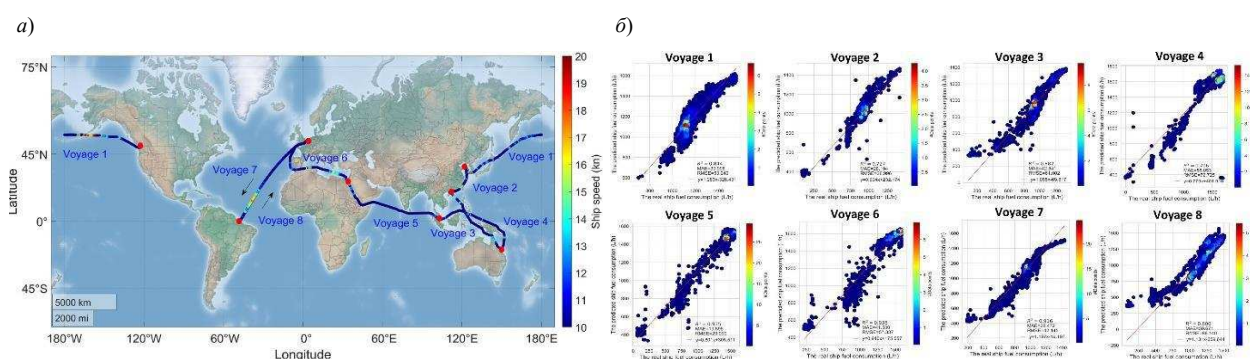


Рис. 1. Прогнозирование расхода топлива судном путем исполнения обученной модели (а), сравнение реального и прогнозируемого расхода судового топлива (б)

Проекты № 2 и 3 заведомо потребуют больших вложений в силу отсутствия как инфраструктуры (например, в части использования альтернативного топлива), так и готовых технических решений, не требующих дополнительных исследований и расходования материальных и временных ресурсов.

С точки зрения критерия реализуемости, можно принять, что проекты № 1 и № 2 находятся в равных условиях, так как уже имеется опыт их реализации и коммерческого использования. Опыта использования аммиачного топлива как частного случая проекта № 3 в настоящий момент нет, однако работы в этом направлении ведутся, и Wartsila Gas Solutions уже разработала систему подачи топливного аммиака (Ammonia Fuel Supply System, AFSS). Что касается других видов топлива, например сжиженного природного газа [10] или спиртовых топлив [3] (рис. 2), то в последние годы накоплен достаточно большой опыт их применения (рис. 3), а Правила Российского морского регистра судоходства [11] содержат подробные требования, регламентирующие их безопасное использование на морских судах.



Рис. 2. Требования к судам, использующим спиртовые виды топлива

Удобство проекта, наличие технической документации и оригинальность можно принять одинаковым для всех трех исследуемых вариантов.

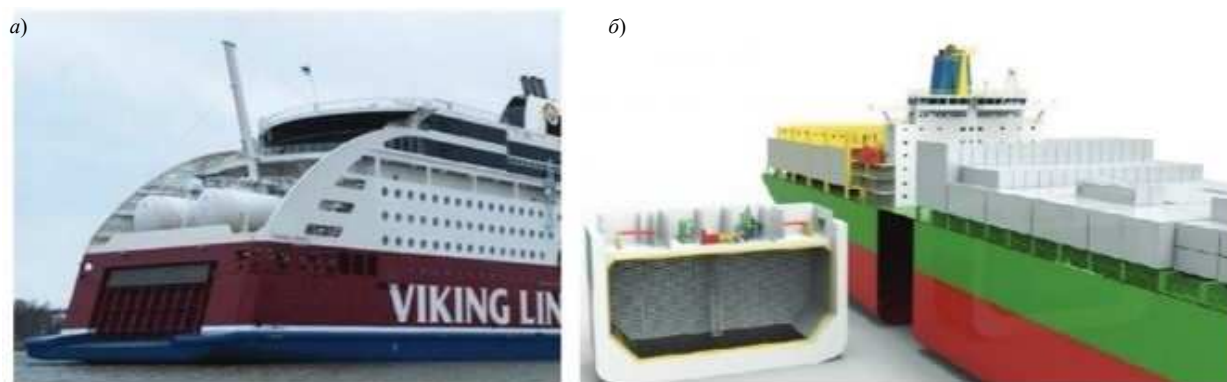


Рис. 3. Хранение топливного СПГ на борту судна:

- а) размещение топливных танков на верхней палубе парома Viking Grace норвежского оператора Viking Line;
 б) размещение мембранных топливных емкостей СПГ внутри корпусных конструкций контейнероза

Можно сравнить проекты экспертным способом, не прибегая к абсолютным значениям, пользуясь лишь относительными оценками. Результаты исследования в общих чертах представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты экспертной оценки критериев проектов

№	Критерий проекта	№ 1	№ 2	№ 3
1	экономическая целесообразность	10*	8*	9*
2	реализуемость	+	+	+
3	удобство	10*	7*	5*
4	наличие в необходимом объеме технической документации	+	+	+
5	оригинальность	—	—	—
6	технологичность	+	+	+
7	теоретические расчеты	+	+	+
8	модернизация	+	—	+

*10-балльная шкала, где значения < 5 — в разной степени нецелесообразно, > 5 — напротив.

После проведения экспертной оценки критериев необходимо применить к критериям веса (табл. 7) путем определения их произведения с последующим суммированием результата (табл. 8).

Таблица 7

Веса критериев		
№	Критерий проекта	Вес критерия
1	экономическая целесообразность	10
2	реализуемость	100*
3	удобство	10
4	наличие в необходимом объеме технической документации	10**
5	оригинальность	10**
6	технологичность	10**
7	теоретические расчеты	10**
8	модернизация	10**
* «+» дает 100 баллов, «-» дает 0 баллов;		
** «+» дает 10 баллов, «-» дает 0 баллов.		

Таблица 8

Результаты расчета				
№	Критерий проекта	№ 1	№ 2	№ 3
1	экономическая целесообразность	100	80	90
2	реализуемость	100	100	100
3	удобство	100	70	50
4	наличие в необходимом объеме технической документации	10	10	10
5	оригинальность	0	0	0
6	технологичность	10	10	10
7	теоретические расчеты	10	10	10
8	модернизация	10	0	10
Сумма баллов		340	280	280

Таким образом, КП с использованием экономии топлива в рейсе за счет применения технологии «умного» рутинга, позволяющего транспортному судну в рейсе избегать штормовых условий, задержек из-за очередей судов и других неблагоприятных ситуаций и тем самым предотвращать избыточную трату топлива, находится заведомо в более выигрышном положении: имея равную с прочими проектами реализуемость, наличие технической документации, оригинальность, технологичность и теоретизированность, он отличается дешевизной, удобством и способностью к модернизации.

На примере проведенного исследования можно ранжировать по важности намеченные к реализации КП. Вообще представленный алгоритм действий, равно как выделенные здесь критерии могут значительно варьироваться в зависимости от области применения КП, организационной структуры в рамках которой выполняется КП и конечных сопутствующих целей КП. В общем виде для разработки критериев подготовки и реализации климатических проектов в транспортной отрасли можно использовать следующий алгоритм.

1. Определить цель и задачи проекта, связанные с адаптацией грузоперевозок к климатическим изменениям.

2. Проанализировать влияние климатических изменений на безопасность грузоперевозок, логистическую систему и маршруты.

3. Выявить уязвимые места и проблемные зоны в существующей системе грузоперевозок.

4. Разработать рекомендации по оптимизации маршрутов, повышению устойчивости грузоперевозок к стихийным бедствиям и технологические инновации для адаптации к климатическим изменениям.

5. Оценить экономические, экологические и социальные аспекты адаптации грузоперевозок к климатическим изменениям.

6. Изучить роль государственной политики и инновационных подходов в адаптации грузоперевозок к климатическим изменениям.

7. Сформулировать критерии подготовки и реализации климатических проектов в транспортной отрасли на основе проведенного анализа и исследований.

8. Разработать план действий и определить ответственных за реализацию проекта.

ВЫВОДЫ

В работе была получена логическая последовательность действий для оценки применимости того или иного вида климатического проекта на водном транспорте, при этом был применен метод экспертной оценки для определения целесообразности создания климатического проекта в соответствии с выделенными в исследовании критериями, а также для сравнения климатических проектов, имеющих общие цели и отличающихся способом реализации. В исследовании продемонстрирована нормативная база применения климатических проектов, а также намечены основные пути оценки применимости климатических проектов на водном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4 — 15.
2. Головач О.В. Углеродные единицы как объект признания, оценка, методики / О.В. Головач // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. — 2023. — № 4 (142). — С. 73 — 80.
3. Буянов А.С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А.С. Буянов, О.Н. Леонова, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 91 — 97.
4. Михеева А.А. Математическое моделирование процессов сжигания водоугольного топлива в судовых котлах малой мощности / А.А. Михеева, А.И. Бондаренко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 32 — 38.
5. Волков В.А. Организационно-экономические подходы к оценке реализуемости инновационно-инвестиционных проектов / В.А. Волков, А.И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2014. — № 97. — С. 1074 — 1086.
6. Иванов А.Ю. Проблемы использования методов искусственного интеллекта в интересах структурной адаптации распределенной базы данных / А.Ю. Иванов, Н.А. Изотова // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2024. — № 1 (9). — С. 58 — 63. — EDN KFJWHW.
7. Бабанин Н.В. Особенности построения математических моделей и алгоритмов расчета параметров движения или равновесия / Н.В. Бабанин, А.Л. Мелконян, Ю.Ф. Титова // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2023. — № 1 (5). — С. 76 — 97. — DOI 10.52899/24141437_2023_01_76. — EDN CPLSKZ.
8. Zhang M. A deep learning method for the prediction of ship fuel consumption in real operational conditions / M. Zhang, N. Tsoulakos, P. Kujala, S.E. Hirdaris // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2024. — Vol. 130. — P. 107425. — DOI 10.3390/app13179742.
9. [Электронный ресурс] URL: <https://www.oneocean.com/> (дата обращения 14.02.2025).
10. Реуцкий А.С. Определение потерь СПГ при выполнении бункеровки и сопутствующих технологических операций / А.С. Реуцкий, В.А. Павловский, О.В. Таровик // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Спецвыпуск № 1. — С. 132 — 140.
11. Правила классификации и постройки морских судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.

REFERENCES

1. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4 — 15. (In Russ.)
2. Golovach O.V. Carbon units as an accounting object: recognition, valuation, methods. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of the St. Petersburg State University of Economics]. 2023. No. 4 (142). P. 73 — 80. (In Russ.)
3. Buyanov A.S., Leonova O.N., Reutsky A.S. Methanol and ethanol as ship fuel: analysis of application experience. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 91 — 97. (In Russ.)
4. Mikheeva A.A., Bondarenko A.I. Mathematical modeling of combustion processes of coal-water fuel in low-power marine boilers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 32 — 38. (In Russ.)
5. Volkov V.A., Orlov A.I. Organizational-economic approaches to estimate the feasibility of innovative-investment projects. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2014. No. 97. P. 1074 — 1086. (In Russ.)
6. Ivanov A.Yu., Izotova N.A. Problems of using artificial intelligence methods in the interests of structural adaptation of a distributed database. *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University*. 2024. No. 1 (9). P. 58 — 63. EDN KFJWHW. (In Russ.)
7. Babanin N.V., Melkonian A.L., Titova Ju.F. Features of building mathematical models and algorithms to calculate the parameters of motion or equilibrium. *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University*. 2023. No. 1 (5). P. 76 — 97. DOI 10.52899/24141437_2023_01_76. EDN CPLSKZ. DOI 10.52899/24141437_2023_01_76. (In Russ.)
8. Zhang M., Tsoulakos N., Kujala P., Hirdaris S.E. A deep learning method for the prediction of ship fuel consumption in real operational conditions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 130. P. 107425. DOI 10.3390/app13179742.
9. URL: <https://www.oneocean.com/> (accessed 14.02.2025).
10. Reutsky A., Tarovik O., Pavlovsky V. Evaluation of liquefied natural gas losses during bunkering and accompanying working operations. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special issue No. 1. P. 132 — 140. (In Russ.)
11. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.

УДК 629.5 + 629.12.06-7

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОКУМЕНТОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИМО И РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ОБЛАСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

А.О. Березин, д-р. экон. наук, профессор, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: berezin.ao@rs-class.org

С.А. Толмачев, зам. нач. междунар. отдела, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: tolmachev.sa@rs-class.org

В.К. Шурпяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

Целью настоящей статьи является оценка влияния на морскую отрасль и определения последствий вступления в силу новых российских нормативных документов, регламентирующих выбросы парниковых газов.

В статье произведено сравнение требований нормативных документов стратегического планирования Российской Федерации по ограничению выбросов парниковых газов, а также аналогичных документов ИМО. Определены разночтения в методиках пересчета выбросов CO₂ ИМО и профильных российских документов. Определены различия в значениях коэффициента пересчета одной тонны топлива в CO₂, указанных в этих нормативных документах. Сделан вывод о дублировании требований Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ и 296-ФЗ для судов валовой вместимостью более 5000, что может привести к необходимости двойной отчетности и, в перспективе, дублированию мер по сокращению выбросов парниковых газов. Влияние применения ППРФ № 355 на отрасль было оценено путем сравнения области его применения с данными о выбросах CO₂ с судов под российским флагом.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, критерии энергоэффективности, углеродоемкость.

Для цитирования: Березин А.О. Сравнительный анализ документов стратегического планирования ИМО и Российской Федерации в области сокращения выбросов парниковых газов / А.О. Березин, С.А. Толмачев, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23 — 34. — EDN WZWOPO.

COMPARATIVE ANALYSIS OF IMO AND RUSSIAN FEDERATION STRATEGIC PLANNING DOCUMENTS RELATED TO GREENHOUSE GAS EMISSIONS REDUCTION

A.O. Berezin, DSc, Professor, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: berezin.ao@rs-class.org

S.A. Tolmachev, Assistant Head of International Dep., FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, tolmachev.sa@rs-class.org

V.K. Shurpyak, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

The purpose of this article is to assess the impact on the marine industry and determine the consequences of the entry into force of new Russian regulations governing greenhouse gas emissions. The article compares the requirements of the regulatory documents of the strategic planning of the Russian Federation on emission control and IMO documents. There are certain discrepancies in the methods of calculating CO₂ emissions in accordance with IMO and related Russian documents. The differences in the conversion rate of one ton of fuel to CO₂ indicated in these regulatory documents have been identified. It is concluded that the requirements of Annex VI to MARPOL and 296-FZ are duplicated for ships with a gross tonnage of more than 5,000 tons, which may lead to double reporting and duplication of greenhouse gas reduction measures in future. The impact of RFGD No. 355 on the industry was assessed by comparing the scope of its application with data on CO₂ emissions from Russian-flagged ships.

Keywords: greenhouse gas emissions, energy efficiency criteria, carbon intensity.

For citation: Berezin A.O., Tolmachev S.A., Shurpyak V.K. Comparative analysis of IMO and Russian Federation strategic planning documents related to greenhouse gas emissions reduction. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 23 — 34. EDN WZWOPO. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ. СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

Классическим определением стратегического планирования в сфере бизнеса является определение А. Чандлера, согласно которому стратегическое планирование предполагает «определение основных долгосрочных целей и задач организации, принятие курса действий и привлечение ресурсов, необходимых для достижения этих целей» [1]. В общих чертах это определение справедливо и для государственного и отраслевого планирования, если в качестве субъекта управления рассматривать не «организацию», а «государство» или «отрасль».

Международные организации (ИМО, ООН) в своей деятельности руководствуются стратегическими планами, в которых определяют цели дальнейшего развития и способы их достижения. Так, ИМО в своей работе действует в соответствии с целями, сформулированными в резолюции А.900(21), и руководствуется указанными целями при составлении стратегических планов. Последний стратегический план ИМО на период 2024 — 2029 гг. был принят на 33-й ассамблее ИМО в 2023 г. [2]. Кроме этого, по особо чувствительным для судоходства и окружающей среды направлениям деятельности ИМО разрабатывает отдельные стратегические документы, такие как стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов 2023 г. (2023 IMO GHG Strategy), о которой речь пойдет далее.

В современной России, в свою очередь, стратегическому планированию уделяется повышенное внимание, и эта деятельность регулируется Федеральным законом от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [3]. На основании этого закона разработан ряд отраслевых документов стратегического характера, в том числе для тех отраслей, где наблюдается сопряжение с нормами международных организаций.

Одним из наиболее актуальных направлений стратегического планирования как в Российской Федерации, так и за рубежом стало стимулирование применения экологических и климатических проектов с целью уменьшения выбросов парниковых газов [4, 5]. Анализ потребления различных видов судового топлива был произведен в работе [6] по данным, опубликованным ИМО на морских судах валовой вместимостью 5000 и более. В настоящей статье для анализа применимости российских нормативных документов использованы данные по потреблению топлива на судах, представленные российскими судовладельцами за 2023 г.

1. ДОКУМЕНТЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИМО ПО СОКРАЩЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С СУДОВ

Киотский протокол к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) определил Международную морскую организацию (ИМО) в качестве межправительственной площадки, в рамках которой государства должны договариваться о снижении выбросов парниковых газов в судоходстве.

В 1997 г. 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 г. Ассамблея ИМО призвала Комитет по защите морской среды (КЗМС) установить и разработать механизмы, необходимые для обеспечения ограничения или сокращения выбросов парниковых газов с судов.

В декабре 2015 г. было подписано Парижское соглашение об изменении климата, установившее целевые показатели по глобальному реагированию на климатические изменения посредством удержания прироста глобальной средней температуры намного ниже 2 °С сверх доиндустриальных уровней, с приложением усилий в сторону ограничения роста до 1,5 °С. Учитывая универсальный характер международного судоходства и авиации, эти отрасли было решено не учитывать в Парижском соглашении. Предполагается, что для этих отраслей государства должны предпринимать необходимые действия в рамках работы на площадках специализированных учреждений ООН в сфере судоходства (ИМО) и авиации (ИКАО), соответственно.

В октябре 2016 г. ИМО приняла решение о разработке стратегического документа, который бы определил порядок, формат и временные рамки работы Организации по тематике реагирования на изменение климата. Такой документ — Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов — был принят в апреле 2018 г.

Первоначальная стратегия ИМО 2018 определила масштаб задач по декарбонизации международного судоходства в горизонте до конца века, зафиксировала необходимость разработки конкретных мер регулирования в различные временные рамки.

В 2021 г. в соответствии с Первоначальной стратегией ИМО был принят пакет так называемых краткосрочных мер по сокращению выбросов парниковых газов с судов (требования МАРПОЛ по энергоэффективности и эксплуатационной углеродоемкости для существующих судов, вступили в силу 1 ноября 2022 г.) [7].

Первоначальная стратегия 2018 г. была пересмотрена в июле 2023 г., когда КЗМС резолюцией МЕРС.377(80) принял вместо нее новую Стратегию по сокращению выбросов парниковых газов с судов (далее — Стратегия ИМО 2023) [8], которая серьезно ужесточила масштаб задач по сравнению с Первоначальной стратегией, а также уточнила порядок разработки так называемых среднесрочных мер регулирования — пакета требований технического и экономического характера (стандарт по предельному содержанию парниковых газов в выбросах ПГ, связанных с судовым топливом с поэтапным ужесточением, а также механизм тарификации выбросов).

Следующий пересмотр Стратегии ИМО 2023 запланирован на 2028 г. Основные целевые показатели Стратегии ИМО 2023 с указанием временных рамок показаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные целевые показатели Стратегии ИМО 2023

Показатель	Мероприятие	Временные рамки
Снижение углеродоемкости судов за счет дальнейшего повышения энергоэффективности	Пересмотреть конструктивные требования к энергоэффективности новых судов с целью их ужесточения	—
Снижение углеродоемкости международного судоходства	Снизить средние выбросы CO ₂ на единицу транспортной работы в международном судоходстве не менее чем на 40 % по сравнению с 2008 г.	к 2030 г.
Расширение внедрения технологий, видов топлива и/или источников энергии с нулевым или близким к нулю уровнем выбросов парниковых газов	Внедрить технологии, виды топлива и/или источники энергии с нулевым или близким к нулю уровнем выбросов парниковых газов, чтобы приходящаяся на них доля энергии, используемой в международном судоходстве, составляла не менее 5 %, а в идеале — 10 %	к 2030 г.
Достижение чистого нулевого уровня выбросов парниковых газов в международном судоходстве	Обеспечить прохождение пикового уровня выбросов парниковых газов с судов, осуществляющих международные перевозки, в кратчайшие сроки и достижение чистого нулевого уровня выбросов ПГ, с учетом различий в условиях между странами, одновременно принимая меры к поэтапному прекращению этих выбросов	примерно к 2050 г. или как можно ближе к этому сроку
Ориентировочная контрольная точка 1 на пути к достижению чистого нулевого уровня выбросов парниковых газов в международном судоходстве	Сократить суммарные годовые выбросы парниковых газов в международном судоходстве не менее чем на 20 %, а в идеале на 30 % по сравнению с 2008 г.	к 2030 г.
Ориентировочная контрольная точка 2 на пути к достижению чистого нулевого уровня выбросов парниковых газов в международном судоходстве	Сократить суммарные годовые выбросы парниковых газов в международном судоходстве не менее чем на 70 %, а в идеале на 80 % по сравнению с 2008 г.	к 2040 г.

Стратегия ИМО 2023 формально не является обязательным документом для государств-членов ИМО, но на основании принятой стратегии разрабатываются поправки к документам ИМО, имеющим обязательную силу. Стратегия направлена на определение мер и действий, которые должны быть предприняты в судоходной отрасли с целью увеличения вклада в глобальные усилия по решению проблемы выбросов парниковых газов.

Масштаб задач и целевые показатели по сокращению выбросов, заложенные в Стратегии ИМО 2023, должны учитываться при разработке поправок к МАРПОЛ, то есть при формулировании требований принимается во внимание желательность достижения в результате применения разработанных и принятых требований целевых показателей, указанных в Стратегии ИМО 2023.

При этом конкретные формулировки требований, конкретные значения и параметры в части сокращения углеродоемкости судоходства и сокращения выбросов парниковых газов, а также повышения энергоэффек-

тивности, являются предметом отдельных договоренностей между государствами в рамках стандартных процедур разработки поправок к Конвенции МАРПОЛ.

Поправки 2021 г. к Приложению VI к МАРПОЛ, содержащие требования по энергоэффективности и эксплуатационной углеродоемкости, были приняты Российской Федерацией в рамках процедуры молчаливого согласия и в настоящее время являются составной частью российской правовой системы.

Поправки к Приложению VI к МАРПОЛ, разрабатываемые в настоящее время КЗМС с учетом целевых показателей Стратегии ИМО 2023, в случае их принятия Российской Федерацией также будут являться обязательными к применению и иметь приоритет над нормами национального законодательства в случае их расхождения с положениями МАРПОЛ (ст. 15.4 Конституции РФ).

2. ОСНОВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ВОПРОСУ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

2.1. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года.

Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (далее — Стратегия 2050) [9] разработана во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов», утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р.

Для реализации целевого (интенсивного) сценария Стратегии 2050 необходимо принять меры финансовой и налоговой политики, стимулирующие снижение антропогенных выбросов парниковых газов в наиболее неэффективных углеродоемких отраслях экономики. Прежде всего планируются мероприятия для повышения энергетической и экологической эффективности в различных секторах экономики путем оказания государственной поддержки в отношении внедрения, тиражирования и масштабирования безуглеродных технологий и технологий с низким уровнем выбросов парниковых газов.

Для сектора транспорта в Стратегии 2050 предусмотрено развитие менее углеродоемких видов транспорта, использование новых, энергоэффективных транспортных средств, масштабная электрификация и газификация.

Федеральные органы исполнительной власти должны руководствоваться положениями Стратегии 2050 при разработке и реализации отраслевых документов стратегического планирования и государственных программ.

Минэкономразвития совместно с заинтересованными Федеральными органами исполнительной власти и организациями должно разработать план мероприятий по реализации Стратегии 2050. Проект такого плана разрабатывался Минэкономразвития и направлялся в Федеральные органы исполнительной власти для комментариев в 2022 — 2023 гг. На ноябрь 2024 г. информация об утверждении плана Правительством Российской Федерации отсутствует.

2.2. Климатическая доктрина Российской Федерации.

В толковом словаре С.И. Ожегова слово «доктрина» определяется как «учение, научная концепция (обычно о философской, политической, идеологической теории)», то есть в доктрине должны быть сформулированы основные научно обоснованные принципы, которыми следует руководствоваться в процессе принятия решений в определенных сферах деятельности.

Климатическая доктрина Российской Федерации принята в 2009 г. В ней впервые были сформулированы цели, принципы, содержание и пути реализации единой государственной политики в области климата, которые перешли в действующую версию этого документа.

Новая версия Климатической доктрины утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812 [10], предыдущая версия признана утратившей силу. Документ развивает положения Стратегии 2050, а также учитывает другие стратегические документы в области национальной, экономической, экологической, энергетической безопасности и внешней политики. В новой Климатической доктрине Российской Федерации сформулированы целевые показатели и впервые зафиксированы их количественные характеристики — достижение баланса между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением не позднее 2060 г. и обеспечение к 2030 г. объема выбросов парниковых газов на уровне 1673 млн т CO₂-эквивалента, то есть 54 % от уровня 1990 г. При этом специально указывается, что достижение целевых показателей климатической доктрины не должно приводить к ущербу для национальных интересов с учетом приоритетов развития и что планирование мер по адаптации к изменению климата на отраслевом и региональном уровнях является одним из приоритетов.

3. СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ И ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРАТЕГИИ ИМО 2023, СТРАТЕГИИ 2050 И КЛИМАТИЧЕСКОЙ ДОКТРИНЫ

Главным принципиальным отличием стратегических документов ИМО является их отраслевой характер и применимость только к сектору международного судоходства, в отличие от стратегических документов Российской Федерации, которые применимы к любой деятельности на ее территории, а целевые показатели в них установлены для экономики в целом.

В российских документах стратегического планирования более комплексно описаны угрозы и риски, связанные с разработкой мер реагирования в области изменения климата, а также принятие решений на основе полных и достоверных сведений о происходящих и ожидаемых последствиях изменения климата.

Стратегия ИМО 2023 в этом смысле в большей степени ориентируется на дух и букву РКИК ООН, в которой научная обоснованность данных не является необходимым условием для принятия мер, если существует и осознается угроза окружающей среде (статья 3.3 РКИК ООН и аналогичный подход, закрепленный в резолюции МЕРС.67(37)).

Принципиальным расхождением между российскими документами и Стратегией ИМО 2023 является подход к определению углеродной нейтральности. Российские документы стратегического планирования используют в этой связи термины, разработанные для поддержки реализации РКИК ООН, в соответствии с чем углеродная нейтральность — баланс антропогенных выбросов парниковых газов и их поглощения природными поглотителями (лесами, болотами, водоемами), существующими на территории действия нормативного документа.

Хотя мировой океан является одним из главных поглотителей углекислого газа на нашей планете, в документах ИМО это никак не учитывается, так как деятельность ИМО не привязана к конкретному району или территории. Поглощение CO₂ океаном из атмосферы составляет около 2,6 млрд т в год (по данным [11] за 2019 г.), что составляет около четверти ежегодных выбросов от сжигания ископаемого топлива. Если рассматривать мировой океан как территорию поглощения углекислого газа, выделяемого международным судоходством, и пользоваться подходом, заложенным в РКИК ООН и Климатической доктрине Российской Федерации, то углеродная нейтральность уже достигнута, так как суммарные выбросы от судоходства составляют менее 40 % от CO₂, поглощаемого океаном. В качестве контраргумента можно возразить, что океан не может рассматриваться как территория для одной отрасли (судоходства), и, поскольку он принадлежит всему человечеству, его способность к поглощению CO₂ должна быть распределена между всеми отраслями. В результате в Стратегии ИМО 2023 не было дано определение углеродной нейтральности (чистых нулевых выбросов — net zero emissions) ввиду разногласий в понимании этого термина применительно к судоходству между различными группами государств и невозможности на этапе разработки Стратегии ИМО 2023 достичь компромиссного решения по этому вопросу.

Соответственно, целевой показатель Стратегии ИМО 2023 о достижении «чистого нулевого уровня выбросов парниковых газов в международном судоходстве примерно к 2050 г. или как можно ближе к этому сроку» в настоящее время не имеет среди государств единообразной трактовки и используется государствами в переговорах для обоснования полной декарбонизации отрасли к 2050 г.

Как Стратегия ИМО 2023, так и российские документы стратегического планирования в области реагирования на климатические изменения предназначены для упорядочивания разработки мер регулирования.

В рамках Стратегий ИМО 2018 и 2023 такая работа последовательно проводится. В 2021 г. приняты поправки к Приложению VI к МАРПОЛ, в соответствии с которыми были введены так называемые краткосрочные меры — требования технического (коэффициент энергоэффективности для существующих судов — EEXI) и эксплуатационного характера (ежегодный показатель и рейтинг эксплуатационной углеродоемкости — CII, carbon intensity indicator).

В 2024 — 2025 гг. в соответствии с утвержденным КЗМС планом работы по реализации Стратегии ИМО 2023 должны быть разработаны так называемые среднесрочные меры регулирования в области сокращения выбросов парниковых газов с судов — новые требования Приложения VI к МАРПОЛ, предполагающие введение глобального топливного стандарта (предельного содержания парниковых газов в выбросах с судов) с механизмом поэтапного ужесточения, а также создание механизма тарификации выбросов (углеродный сбор, система торговли выбросами или аналогичная мера). Новые требования должны вступить в силу в 2027 г.

В Российской Федерации также разработан ряд нормативно-правовых актов в соответствии с документами стратегического планирования и в порядке реализации целевых показателей и мер, закрепленных в этих документах. Нормативная база относится к вопросам учета и, в перспективе, ограничения выбросов парниковых газов.

4. РОССИЙСКИЕ НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ АКТЫ В ОБЛАСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Информация о потреблении топлива на морских судах валовой вместимостью более 5000 передается судовладельцами для дальнейшего учета выбросов с 2019 г. На рис. 1 показано общее количество выбросов CO₂ с судов под российским флагом (зеленым) и судов в классе Регистра (голубым). Из рисунка следует, что суммарные выбросы с российских судов колеблются около цифры 5000 т CO₂ в год, что составляет совершенно мизерную долю от общих выбросов Российской Федерации — 0,00026 %. Тем не менее российские нормативные документы по учету выбросов могут затронуть и выбросы с судов.

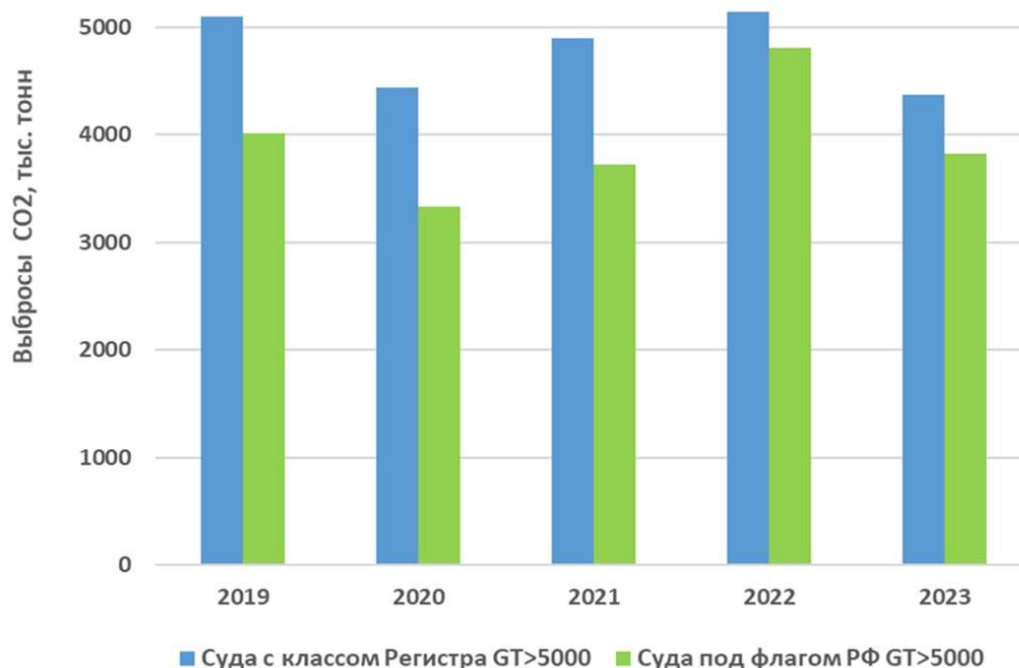


Рис. 1. Суммарные выбросы CO₂ с морских судов валовой вместимостью 5000 и более

Основной документ, регулирующий выбросы парниковых газов в Российской Федерации, — Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [12].

Основные нормативно-правовые акты, разработанные Правительством с целью реализации требований 296-ФЗ:

- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.10.2021 № 2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов» [13];

- Постановление Правительства Российской Федерации от 14.03.2022 № 355 «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям» (далее — ППРФ 355) [14];

- Постановление Правительства Российской Федерации от 20.04.2022 № 707 «Об утверждении Правил представления и проверки отчетов о выбросах парниковых газов, формы отчета о выбросах парниковых газов, Правил создания и ведения реестра выбросов парниковых газов и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» (далее — ППРФ 707) [15].

Основной ведомственный НПА в части реализации положений 296-ФЗ — приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [16].

В ст. 3 Федерального закона 296-ФЗ сформулированы основные принципы, которыми руководствуется Российская Федерация при ограничении выбросов парниковых газов:

- устойчивое и сбалансированное развитие экономики при снижении уровня выбросов парниковых газов (заметим, что экономика здесь поставлена на первое место!);

- обязательное регулярное представление отчетов о выбросах организациями (т.е. организациями и ИП, деятельность которых сопровождается выбросами парниковых газов, масса которых определяется в соответствии со ст. 7 296-ФЗ);

- обязательное выполнение целевых показателей сокращения выбросов парниковых газов, установленных государственными органами на основе анализа ранее представленных отчетов, что предполагает научную обоснованность, системность и комплексность подхода к ограничению выбросов парниковых газов;

- добровольное участие в реализации климатических проектов, которые представляют из себя комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение поглощения парниковых газов.

Всего на январь 2025 г. в госреестре числилось 49 климатических проектов, большинство которых направлено на сокращение выбросов при производстве электроэнергии и переработке минерального сырья [17].

В 296-ФЗ в качестве мер по ограничению выбросов парниковых газов указываются их обязательный учет, установление целевых показателей и поддержка государством деятельности по сокращению выбросов и увеличению поглощения парниковых газов.

К регулируемым организациям согласно 296-ФЗ относятся организации, хозяйственная и иная деятельность которых сопровождается выбросами парниковых газов в эквиваленте 150 000 т CO₂ в год за период до 1 января 2024 г. и 50 000 т CO₂ в год с 1 января 2024 г. и соответствует производственным процессам, установленным ППРФ № 355. При этом сжигание топлива на морских транспортных и рыболовных судах является одним из таких производственных процессов.

В российских нормативно-правовых документах отсутствует четкое указание количества учтенных источников выбросов из одной регулируемой организации, то есть допускается учет как по организации в целом, так и по одному или нескольким структурным подразделениям и филиалам. Последнее обстоятельство очень важно для организаций в области водного транспорта, так как подобная формулировка (п. II.3 Приказа Минприроды № 371) может означать возможность учета как флота компании в целом, так и отдельного судна.

Если перевести выбросы CO₂ путем обратного пересчета в топливо, необходимое для получения 50 000 т CO₂, то под действие 296-ФЗ попадают все организации, сжигающие после 01.01.2024 в год более 15 403 т мазута или 15 893 т дизельного топлива. Если сопоставить эти цифры с данными по расходу топлива на судах, представленные судовладельцами в Главное управление Регистра, то в отчетах за 2023 г. нашлось только одно судно, суммарные выбросы которого превысили 50 000 т CO₂. Еще 7 судов вплотную приблизились к этому порогу, произведя более 40 000 т выбросов CO₂. Интересно, что все эти суда являются нефтеналивными танкерами с высоким ледовым классом, который позволяет не беспокоиться по поводу соответствия показателям энергоэффективности ИМО (EEDI, EEXI и СII к ним не применимы).

Среднее значение в отчетах по выбросам с судов за 2023 г. (всего представлены сведения по 514 судам, из которых 467 — под российским флагом) составило 8494 т CO₂. Если рассмотреть только суда под российским флагом, на которые распространяется 296-ФЗ, то среднее значение выбросов составит 6465 т CO₂, то есть почти на порядок меньше порога применения закона.

Распределение выбросов CO₂ судов под российским флагом в 2023 г. в зависимости от валовой вместимости показано на рис. 2, а в зависимости от дедвейта — на рис. 3.

Хотя среди судов под российским флагом не нашлось судов, превысивших по выбросам порог применения 296-ФЗ, если судоходная компания будет закупать топливо централизованно и отчитываться в рамках 296-ФЗ для группы судов как единая организация, то суммарное количество выбросов может оказаться выше 50 000 т CO₂. Учитывая, что большинство российских компаний управляют более чем 10 судами, а на конец 2024 г. зарегистрировано 11 судоходных компаний с количеством судов 50 и более, вопросы применения 296-ФЗ при организации ими закупок бункерного топлива остаются для них актуальными.

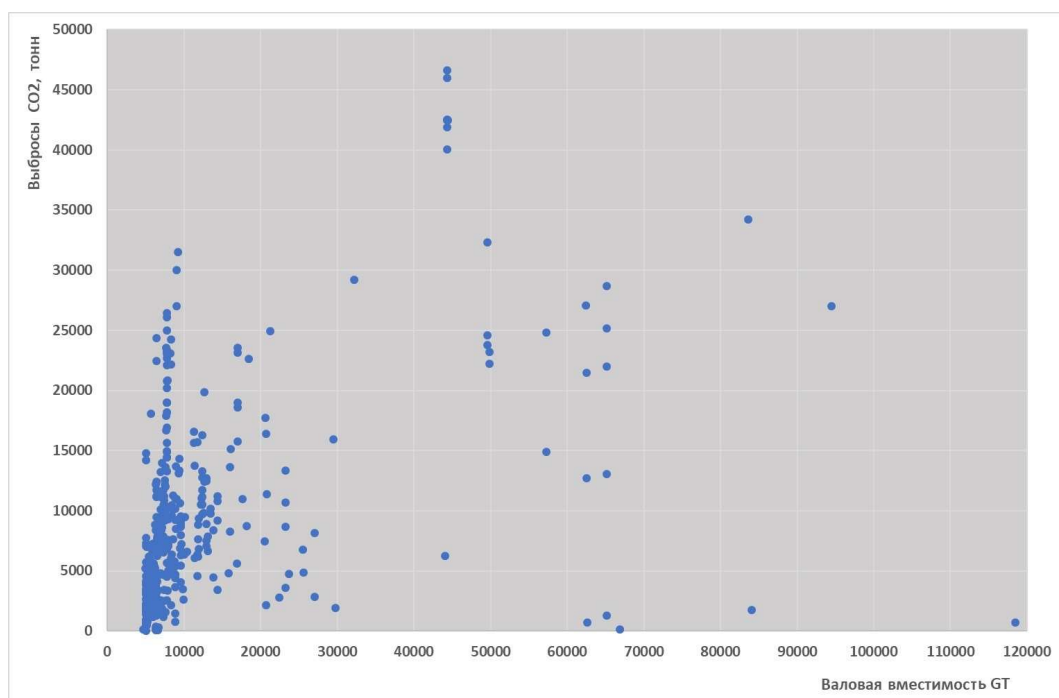


Рис. 2. Распределение выбросов CO₂ с судов под российским флагом в 2023 году в зависимости от валовой вместимости

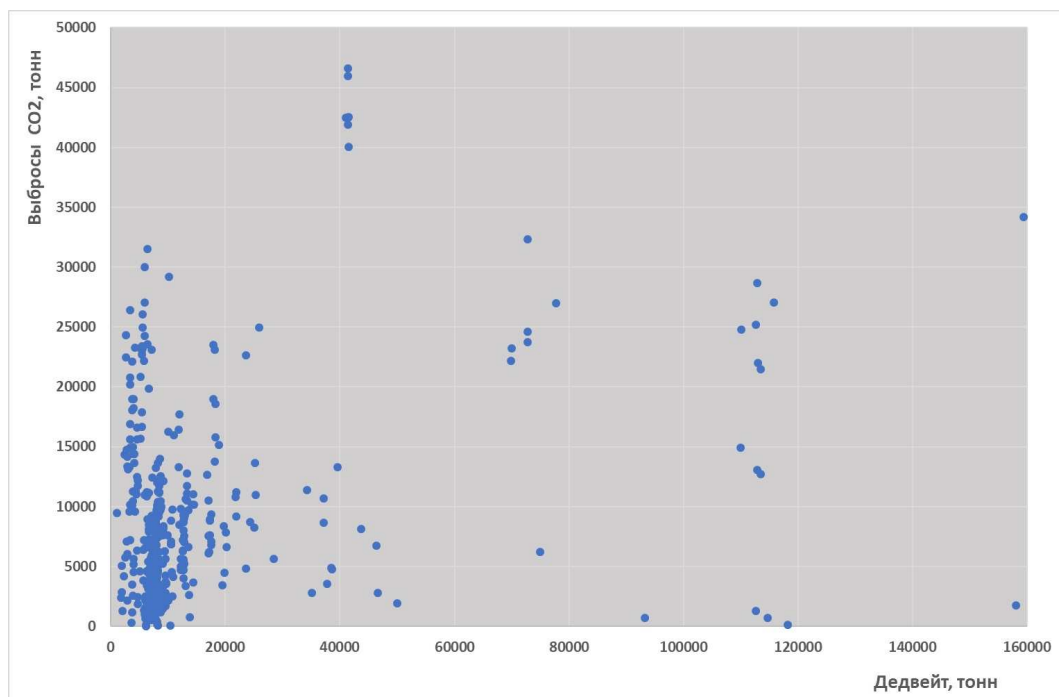


Рис. 3. Распределение выбросов CO₂ с судов под российским флагом в 2023 году в зависимости от дедвейта судна

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ МАРПОЛ И РОССИЙСКОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА В ЧАСТИ ОТЧЕТНОСТИ ПО ВЫБРОСАМ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С СУДОВ

Каждое судно валовой вместимостью 5000 и более должно учитывать количество сожженного в течение календарного года топлива и представлять ежегодный отчет в морскую администрацию государства флага (или признанную ею организацию), которая передает эти данные в систему сбора данных ИМО [18]. Соответствие требованиям подтверждается документом о соответствии, обязательным условием выдачи которого на судно является поставка данных об израсходованном топливе.

Суда валовой вместимостью 5000 и более, совершающие транспортную работу (определенные типы судов, предназначенные для перевозки грузов или пассажиров), должны также на основании этих данных производить расчеты ежегодных показателей углеродоемкости (СИ — carbon intensity indicator) и рейтингов эксплуатационной углеродоемкости судна (А, В, С, D или E, где А — наилучший), которые подлежат проверке морской администрацией (или признанной организацией) и подтверждаются выдачей Удостоверения о соответствии. При этом требуемые значения показателя СИ для присвоения рейтинга ежегодно ужесточаются.

В расчете используется пересчет потребленного топлива в CO_2 -эквивалент. Конкретные методика и коэффициенты для пересчета потребленного на судне топлива в тонны CO_2 содержатся в Руководстве ИМО 2022 г. по расчету достигнутого конструктивного коэффициента энергоэффективности EEDI (резолюция МЕРС.364(79)) [19].

296-ФЗ и подзаконные акты предписывают регулируемым организациям ежегодно готовить и поставлять в соответствии с установленными механизмами отчеты о количестве выбросов CO_2 -эквивалента в атмосферу.

ППРФ № 355 устанавливает коэффициенты пересчета в CO_2 -эквивалент только для трех используемых на водном транспорте видов судового топлива в целях учета и отчетности (флотский мазут, сжиженный нефтяной газ и сжиженный природный газ).

В табл. 2 представлено сравнение коэффициентов пересчета одной тонны различных видов судового топлива в тонны CO_2 в соответствии с ППРФ № 355, приказом Минприроды России № 371 и Руководством ИМО 2022 г. по расчету достигнутого конструктивного коэффициента энергоэффективности EEDI (МЕРС.364(79)).

Таблица 2

Сравнение коэффициентов пересчета судового топлива в тонны CO_2

Вид судового топлива	Коэффициент пересчета одной тонны топлива в CO_2		
	ППРФ 355	Приказ 371	МЕРС.364(79)
Мазут флотский	3,25	3,246	3,114
Сжиженный нефтяной газ:	2,9	2,9	—
пропан	—	2,9	3,0
бутан	—	2,85	3,03
Сжиженный природный газ	2,71	2,59	2,75
Этан	—	2,865	2,927
Дизельное топливо	—	3,146	3,206
Другие моторные топлива	—	3,101	—
Легкое дистиллятное топливо	—	—	3,151
Метанол	—	—	1,375
Этанол	—	—	1,913

Имеются незначительные различия в значениях пересчета для некоторых видов топлива как между двумя российскими документами, так и в сравнении с документом ИМО.

Также следует отметить, что в ППРФ № 355 в перечне видов топлива для водного транспорта отсутствует дизельное топливо, указано только дизельное топливо для железнодорожного и автотранспорта. При этом в ППРФ № 707 (форма ежегодного отчета о выбросах парниковых газов) такой вид топлива присутствует (дизельное топливо — морской и внутренний водный транспорт).

Обращают на себя внимание и отличия в перечнях видов судового топлива в российских документах и документе ИМО. Руководство ИМО в этом отношении гармонизировано с международным стандартом ИСО 8217 «Нефтепродукты. Топлива. Спецификация на судовые топлива», то есть содержит данные по конкретным видам судового топлива (тяжелого: RME-RMK, легкого: RMA-RMD, дизельного: DMX-DMB), используемым производителями топлива и поставляемым с соответствующей маркировкой типа топлива. ИСО 8217, в свою очередь, учтен в Национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 54299-2010

«Топлива судовые. Технические условия» [18], распространяющемся на судовые топлива, получаемые из продуктов переработки нефти и газовых конденсатов.

Все эти факторы в данный момент усложняют определение применимости и порядок осуществления требований 296-ФЗ и подзаконных актов для организаций водного транспорта.

ППРФ № 355 действовало до 1 января 2025 г. В 2024 г. Минприроды разработало проект нового Постановления Правительства. На момент публикации статьи проект нового Постановления Правительства еще проходил необходимые процедуры согласования. В разработанном проекте изменен подход к определению регулируемых организаций. Предполагается использовать единый перечень отраслей (по ОКВЭД) взамен действующего перечня критериев, предусматривающего сочетание отраслей и производственных процессов.

Соответственно, регулируемыми организациями будут считаться организации, осуществляющие хозяйственную деятельность, которая сопровождается выбросами парниковых газов, масса которых эквивалентна 50 и более тыс. т CO₂ в год, среди прочего в области деятельности водного транспорта и морского рыболовства.

Такие организации должны собирать данные и подавать ежегодную отчетность по установленной процедуре. На данный момент кроме подачи отчетности каких-либо национальных требований по ограничению или контролю выбросов парниковых газов не имеется. Однако в рамках 296-ФЗ проводится эксперимент на Сахалине, предусматривающий не только отчетность, но и установление уполномоченным органом субъекта федерации квот на выбросы парниковых газов, необходимости внесения платы при превышении квот или начисления углеродных единиц на счет организации в случае осуществления по итогам отчетного периода деятельности с количеством выбросов парниковых газов ниже установленного порога.

По завершении эксперимента (2028 г.) и в зависимости от его результатов возможно распространение аналогичных мер и на другие субъекты РФ.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Разнотечение в методиках пересчета судового топлива в CO₂-эквивалент.

В настоящее время в методиках пересчета для некоторых видов судового топлива в CO₂-эквивалент в российских документах и профильном Руководстве ИМО имеются разнотечения.

В этой связи представляется целесообразным, чтобы соответствующие российские ведомства, ответственные за совершенствование национальных методик пересчета, провели сравнение с методикой, изложенной в Руководстве ИМО 2022 г., по методу вычисления фактического конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ) для новых судов с целью последующего анализа и, при необходимости, внесения изменений.

2. Дублирование требований МАРПОЛ и 296-ФЗ.

По результатам анализа было определено наличие требований дублирующего характера в Конвенции МАРПОЛ и 296-ФЗ и подзаконных актов. Требования российских документов распространяются на судовладельцев морских судов, если их суда (каждое судно или флот компании в целом) совокупно ежегодно выбрасывают более 150 000 т (до 01.01.2024) или 50 000 т (после 01.01.2024) CO₂-эквивалента в атмосферу. Таким образом, владельцам судов валовой вместимостью более 5000, выбрасывающих 50 000 т CO₂ в год, придется проводить двойную отчетность — в ИМО и в информационную систему оператора реестра выбросов парниковых газов (ГИС «Энергоэффективность»), созданного в соответствии с 296-ФЗ.

Дублирование требований МАРПОЛ и национального законодательства может быть связано с повышенной административной нагрузкой на организации водного транспорта по причине того, что расчеты выбросов проводятся с использованием различных методик, а отчетность следует направлять по различным формам в два адреса.

Представляется необходимым устранить дублирование требований МАРПОЛ, с одной стороны, и 296-ФЗ и подзаконных актов, с другой стороны, в части отчетности по выбросам парниковых газов применительно к организациям водного транспорта.

В этой связи видится целесообразным исключить суда, подпадающие под действие требований правила 27 Приложения VI к МАРПОЛ (морские суда валовой вместимостью 5000 и более, эксплуатирующиеся за пределами только национальной юрисдикции), из области распространения российского законодательства об отчетности по выбросам парниковых газов для регулируемых организаций в области водного транспорта.

В практическом плане возможно рекомендовать российским судовладельцам обратить внимание на этот вопрос с учетом практического опыта применения требований МАРПОЛ и российского законодательства и с прицелом на возможное обсуждение на площадке Российской палаты судоходства в части как использования методики пересчета топлива в выбросы, так и дублирования международных и национальных требований по отчетности в отношении выбросов парниковых газов с судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rabin J. Handbook of Strategic Management. 2nd ed. / J. Rabin, G.J. Miller, W. Bartley Hildreth. — New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.
2. Резолюция Ассамблеи ИМО A.1173(33). Стратегический план Организации на шестилетний период 2024 — 2029 годов. [Электронный ресурс] URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1173\(33\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1173(33).pdf) (дата обращения 27.12.2024).
3. Федеральный закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации». [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841 (дата обращения 27.12.2024).
4. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4 — 15. — EDN FJOQTC.
5. Ключев В.В. О конвергенции международного и национального регулирования выбросов парниковых газов в морском судоходстве / В.В. Ключев // Образование и право. — 2025. — № 1. — С. 470 — 476. [Электронный ресурс] URL: <https://education.law-books.ru/образование-и-право-№-1-2025> (дата обращения 27.02.2025).
6. Шурпак В.К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В.К. Шурпак, М.С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 29 — 36. — EDN QYFSKP.
7. Поправки 2021 года к Приложению к Протоколу 1997 года об изменении Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной Протоколом 1978 года к ней (Пересмотренное Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 2021 года), принятые резолюцией МЕРС.328(76). [Электронный ресурс] URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328\(76\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328(76).pdf) (дата обращения 27.12.2024).
8. Стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов 2023 года, принята Резолюцией МЕРС.377(80). [Электронный ресурс] URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377\(80\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377(80).pdf) (дата обращения 27.12.2024).
9. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года». [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/ba12a67ff89e1b6581fc0e37a3a6ff38f592f68e/?ysclid=m5uwprngqa206319963 (дата обращения 27.12.2024).
10. Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812 «Об утверждении климатической доктрины Российской Федерации». [Электронный ресурс] URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (дата обращения 27.12.2024).
11. Малинин В.Н. Изменчивость обмена углекислым газом между океаном и атмосферой в Северной Атлантике / В.Н. Малинин, П.А. Вайновский // Общество. Среда. Развитие. — 2021. — № 3 (60). — С. 103 — 111. — DOI: 10.53115/19975996_2021_03. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenchivost-obmena-uglekislým-gazom-mezhdu-okeanom-i-atmosferoy-v-severnoy-atlantike> (дата обращения: 05.03.2025).
12. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». [Электронный ресурс] URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47013> (дата обращения 27.12.2024).
13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.10.2021 № 2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов». [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/402963806/?ysclid=m5uw9m07ok135648613> (дата обращения 27.12.2024).
14. Постановление Правительства Российской Федерации от 14.03.2022 № 355 «О критериях отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к регулируемым организациям». [Электронный ресурс] URL: <http://government.ru/docs/all/139799/> (дата обращения 27.12.2024).
15. Постановление Правительства Российской Федерации от 20.04.2022 № 707 «Об утверждении Правил представления и проверки отчетов о выбросах парниковых газов, формы отчета о выбросах парниковых газов, Правил создания и ведения реестра выбросов парниковых газов и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации». [Электронный ресурс] URL: <http://government.ru/docs/all/140589/> (дата обращения 27.12.2024).
16. Приказ Минприроды России от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». [Электронный ресурс] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034?ysclid=m5uwup1es9935362633> (дата обращения 27.12.2024).
17. Реестр углеродных единиц. [Электронный ресурс] URL: <https://carbonreg.ru/ru/projects/> (дата обращения 10.01.2025).
18. Шурпак В.К. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов CO₂ с морских судов, совершающих транспортную работу / В.К. Шурпак, С.А. Толмачев, М.В. Мусонов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 4 — 17. — EDN GSJPWF.
19. Руководство ИМО 2022 года по методу вычисления фактического конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ) для новых судов. Резолюция МЕРС.364(79). [Электронный ресурс] URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (дата обращения 27.12.2024).
20. ГОСТ Р 54299-2010 (ИСО 8217:2010) «Топлива судовые. Технические условия». [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/70477722/?ysclid=m5ux4dubx1857417118> (дата обращения 27.12.2024).

REFERENCES

1. Rabin J., Miller G.J., Bartley Hildreth W. Handbook of Strategic Management. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.
2. IMO Assembly Resolution A.1173(33). Strategic plan for the organization for the six-year period 2024 to 2029. URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1173\(33\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1173(33).pdf) (accessed 27.12.2024).
3. Federal'nyi zakon "O strategicheskoy planirovaniy v Rossiiskoy Federatsii" ot 28.06.2014 N 172-FZ [Federal Law 'On strategic planning in the Russian Federation' of 28.06.2014 N 172-FZ]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841 (accessed 27.12.2024).
4. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4 — 15. (In Russ.)
5. Klyuev V.V. On the convergence of international and national regulation of greenhouse gas emissions in maritime navigation. *Obrazovanie i pravo [Education and Law]*. 2025. No. 1. P. 470 — 476. URL: <https://education.law-books.ru/образование-и-право-№-1-2025> (accessed 27.02.2025). (In Russ.)
6. Shurpyak V.K., Bogdanov M.S. Analysis of the consumption of alternative fuels on sea-going ships. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 29 — 36. (In Russ.)
7. 2021 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (2021 Revised MARPOL Annex VI), Resolution MEPC.328(76). URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328\(76\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.328(76).pdf) (accessed 27.12.2024).
8. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, Resolution MEPC.377(80). URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377\(80\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.377(80).pdf) (accessed 27.12.2024).
9. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 29 oktyabrya 2021 g. № 3052-r "Ob utverzhdenii Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoy Federatsii s nizkim urovнем выбросов парниковых газов до 2050 goda" [Order by the Government of the Russian Federation of 29 October 2021 No. 3052-r "On approval of the Strategy of social and economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions level until 2050"]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657/ba12a67f89e1b6581f-c0e37a3a6ff38f592f68e/?ysclid=m5uwpqngqa206319963 (accessed 27.12.2024).
10. Ukaz Prezidenta Rossiiskoy Federatsii ot 26 oktyabrya 2023 g. № 812 "Ob utverzhdenii klimaticheskoy doktriny Rossiiskoy Federatsii" [Order by the President of the Russian Federation of 26 October 2023 No. 812 "On approval of the Climate Doctrine of the Russian Federation"]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> (accessed 27.12.2024).
11. Malinin V.N., Vainovskii P.A. Izmenchivost' obmena uglekislym gazom mezhdru okeanom i atmosferoi v Severnoy Atlantike [Variability of carbon dioxide exchange between the atmosphere and the North Atlantic Ocean]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Environment. Development]*. 2021. No. 3 (60). P. 103 — 111. DOI: 10.53115/19975996_2021_03. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenchivost-obmena-uglekislym-gazom-mezhdru-okeanom-i-atmosferoy-v-severnoy-atlantike> (accessed 05.03.2025).
12. Federal'nyi zakon ot 02.07.2021 № 296-FZ "Ob ogranichenii выбросов парниковых газов" [Federal Law of 23 June 2021 No 296-FZ "On the limitation of greenhouse gas emissions"]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47013> (accessed 27.12.2024).
13. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 22.10.2021 № 2979-r "Ob utverzhdenii perechnya парниковых газов, v otnoshenii kotorykh osushchestvlyayetsya gosudarstvennyi uchët выбросов парниковых газов i vedenie kadastra парниковых газов" [Resolution of the Government of the Russian Federation of 22 October 2021 No. 2979-r "On approval of the list of greenhouse gases subject to state account of greenhouse gas emissions and inclusion into the inventory of greenhouse gases"]. URL: <https://base.garant.ru/402963806/?ysclid=m5uw9-m07ok135648613> (accessed 27.12.2024).
14. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 14.03.2022 № 355 "O kriteriyakh otneseniya yuridicheskikh lits i individual'nykh predprinimatelei k reguliruemym organizatsiyam" [Decree of the Government of the Russian Federation of 14 March 2022 No. 355 "On the criteria of allocation of legal entities and individual entrepreneurs to the regulated organizations"]. URL: <http://government.ru/docs/all/139799/> (accessed 27.12.2024).
15. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 20.04.2022 № 707 "Ob utverzhdenii Pravil predstavleniya i proverki otchetov o выбросах парниковых газов, formy otcheta o выбросах парниковых газов, Pravil sozdaniya i vedeniya reestra выбросов парниковых газов i o vnesenii izmenenii v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii" [Decree of the Government of the Russian Federation of 20 April 2022 No. 707 "On approval of the Rules of submission and verification of greenhouse gas emissions reports, form of greenhouse gas emissions report, Rules for establishing and maintaining of the greenhouse gas emissions registry and on amendments to certain Decrees of the Government of the Russian Federation"]. URL: <http://government.ru/docs/all/140589/> (accessed 27.12.2024).
16. Prikaz Minprirody Rossii ot 27 maya 2022 g. № 371 "Ob utverzhdenii metodik kolichestvennogo opredeleniya ob'emov выбросов парниковых газов i pogloshchenii парниковых газов" [Order by the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation of 27 May 2022 No. 371 "On the approval of methodologies to quantify the volume of greenhouse gas emissions and greenhouse gas sinks"]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034?ysclid=m5uwup1es9935362633> (accessed 27.12.2024).
17. Reestr uglerodnykh edinit [Registry of carbon credits]. URL: <https://carbonreg.ru/ru/projects/> (accessed 10.01.2025).
18. Shurpyak V.K., Tolmachev S.A., Musonov M.V. New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 4 — 17. (In Russ.)
19. 2022 IMO Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships, Resolution MEPC.364(79). URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (accessed 27.12.2024).
20. GOST R 54299-2010 "Topliva sudovye. Tekhnicheskie usloviya". [State Standard R 54299-2010 (ISO 8217:2010) "Ship fuels. Technical conditions"]. URL: <https://base.garant.ru/70477722/?ysclid=m5ux4dubx1857417118> (accessed 27.12.2024).



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 303.05+656.62
EDN YRHQTS

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКОГО АВТОНОМНОГО И ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО НАДВОДНОГО СУДНА (МАНС)

Д.В. Литов, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 603003 Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, 15, офис 400, e-mail: litov.dv@rs-class.org

О.С. Хватов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

Приведены основные положения концепции полной автономности морского надводного дистанционно управляемого судна (МАНС). Исследование данного вопроса позволяет разработать структуру системы автоматического управления МАНС. Ставится цель помочь проектанту разработать концепцию САУ МАНС. Приведены этапы решения задачи разработки структуры САУ МАНС в соответствии с требованиями Положений по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов РМРС. Сформирован перечень источников информации, образующих ситуационную осведомленность системы управления. Определен минимум необходимых подтверждений того, что представленная проектировщиком концепция обеспечивает уровень безопасности МАНС, эквивалентный или лучший по сравнению с обычным судном.

Ключевые слова: система управления, автономное и дистанционно управляемое морское надводное судно (МАНС), ситуационная осведомленность, эмпатия, черный ящик, структура системы управления, концепция САУ МАНС, разработка, РМРС, Положения МАНС.

Для цитирования: Литов Д.В. Некоторые аспекты построения структуры системы управления морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) / Д.В. Литов, О.С. Хватов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 35 — 43. — EDN YRHQTS.

SOME ASPECTS OF CONTROL SYSTEM STRUCTURE BUILDING FOR MARITIME AUTONOMOUS AND REMOTELY CONTROLLED SURFACE SHIPS (MASS)

D.V. Litov, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 603003 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Svobody, 15, room 400, e-mail: litov.dv@rs-class.org

O.S. Khvatov, DSc, Professor, Volga State University of Water Transport, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5, e-mail: khvatov_oleg@mail.ru

The main provisions of the concept of full autonomy of maritime autonomous and remotely controlled surface ships (MASS) are given. The study of this issue allows to develop the structure of the automatic control system of a MASS ship. The goal is to help the designer develop the concept of ACS MASS. The stages of solving the problem of developing the structure of the MASS control system are in accordance with the requirements of the Regulations on the Classification of Marine Autonomous and Remotely Controlled Surface

Ships of the Russian Maritime Register of Shipping. The list of information sources forming situational awareness of the management system is formulated. The minimum necessary evidence has been determined that the concept presented by the designer ensures a safety level of the MASS equivalent to or better than that of a conventional ship.

Keywords: control system, autonomous and remotely controlled marine surface ship (MASS), situational awareness, empathy, black box, control system structure, MASS ACS concept, development, Russian Maritime Register of Shipping, Regulations on MASS.

For citation: Litov D.V., Khvatov O.S. Some aspects of control system structure building for maritime autonomous and remotely controlled surface ships (MASS). *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 35 — 43. EDN YRHQTS. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время осуществляется федеральный проект «Автономное судовождение» в рамках инициативы «Маяки развития технологий», входящей в состав инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года. Паспорт проекта утвержден 26 декабря 2021 года Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.05.2023 № 1315-р.

Проект «Автономное судовождение» включен в дорожную карту реализации стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года. Соответствующее распоряжение правительства РФ от 3 ноября 2023 года (№ 3097-р) опубликовано на портале правовых актов.

Результатом реализации проекта «Автономное судовождение» должен стать новый облик транспортной отрасли в области мореплавания за счет разработки и внедрения инновационных технологий. В дорожной карте проекта предусматривалось создание автономного портового флота из одной единицы в 2024 году и из трех — в 2025 году.

Теоретические изыскания в области безэкипажных судов и их систем автоматического управления ведутся давно [1, 2]. И в настоящее время появляется первый опыт проектирования и постройки морских автономных надводных судов и их систем автоматического управления (МАНС, САУ МАНС). Под этим подразумевается разработка проектной документации судна в постройке в соответствии с применимыми Положениями по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов Российского морского регистра судоходства 2022 года (далее — Положения МАНС) с учетом требований документации, перечисленной в п. 2.1.1 Положений МАНС. Однако проектными организациями предпринимаются попытки принятия новых технических решений касательно возникающих вопросов САУ МАНС на основе существующего опыта проектирования, когда за прототип берутся традиционные суда. При этом из разрабатываемых проектов автономных судов исчезает их основа — автономность (самоуправление) в смысле управления без оператора, как это предусматривается Положениями МАНС (см. п. 1.2.4 и определение: «Автономное управление — режим управления судном, системами и техническими средствами судна без участия человека»). Проектная работа в этом направлении ведется, и на момент написания статьи в Российский морской регистр судоходства (далее — РС, Регистр) представлен на рассмотрение проект МАНС портового буксира-автомата категории AC RC. Техническая документация проекта представлена ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова» (г. Новороссийск) [3].

Важно отметить, что в настоящее время подходы к проектированию САУ автономных судов проработаны слабо, и написание настоящей статьи продиктовано необходимостью показать вариант начального подхода к рассмотрению вопросов проектирования автономных судов и обоснования принятых решений, отвечающих требованиям существующих нормативных документов, в первую очередь требованиям Положений МАНС.

Ставится цель помочь проектанту разработать концепцию САУ МАНС (не только в объеме Приложения А, но и особенно в соответствии с требованием п. 2.1.2.2.1 Положений МАНС) для дальнейшего ее воплощения в технический проект.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи.

1. Определить источники информации, формирующие ситуационную осведомленность системы управления [4].
2. Получить начальное представление принципов построения структуры САУ для принятия решения о безопасности применения МАНС (концепция САУ МАНС с точки зрения п. 8.4.2.2 Положений МАНС).
3. Определить минимум необходимых подтверждений того, что представленная проектировщиком концепция обеспечивает уровень безопасности МАНС, эквивалентный или лучший по сравнению с обычным судном, спроектированным по существующим правилам РС, как это указано в п. 8.1 Положений МАНС.

Настоящая статья уделяет внимание первому этапу проектирования САУ МАНС наиболее сложной категории AC RC в соответствии с п. 1.2.4 Положений МАНС и отвечает на вопрос «что надо сделать как минимум», не беря во внимание вопрос «как это реализовать». Авторы сознательно в некоторых формулировках отходят от строго научного стиля изложения, чтобы важные, с нашей точки зрения, положения стали нагляднее и понятнее.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Первым шагом проектирования САУ МАНС является разработка ее структурной схемы. И в этот момент с особой остротой встают вопросы: что надо сделать и какие элементы должна включать в свой состав структура? Каковы должны быть информационные связи? Мы бы хотели выделить главные, узловые вопросы принципов построения структуры системы, дать разработчику такой сложной системы, как САУ МАНС, принцип проектирования, начиная с того, какие минимальные действия необходимо выполнить в этом направлении.

Для проработки концепции САУ МАНС, которая определит и структуру связей САУ, зададимся следующим вопросом: что значит заменить человека-оператора (судоводителя) автоматическим устройством?

Чтобы ответить на этот вопрос, воспользуемся методом технической эмпатии и рассмотрим связку «окружающий мир — человек-оператор — объект управления». Структура этой связки, в плане приложений к САУ МАНС, представляется нам следующей:

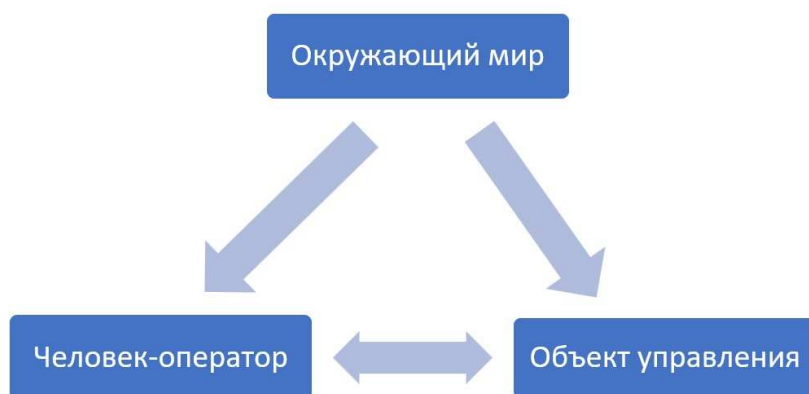


Рис. 1

«Окружающий мир» представляется нам комплексом сенсорных и мотивирующих факторов, побуждающих человека-оператора принимать решения.

«Объект управления» — это техническое средство, движение которого подчиняется соответствующим влияниям окружающего мира, собственного состояния и законам управления.

«Человек-оператор» — субъект, который определяет, задает и реализует эти законы управления.

Для дальнейшей формализации понятий представим эту тройственную систему в соответствии с парадигмой «черного ящика», применяемого с целью анализа автоматических устройств, когда важны множества входных и выходных сигналов, а внутренний состав технического устройства неизвестен.

Определим основные факторы, составляющие «окружающий мир» — первое множество входных сигналов. Используя метод эмпатии и основываясь на существующих экспертных оценках сенсорно-мотивирующих влияний внешней среды на человека-оператора, в состав факторов, способных активировать процесс принятия решения оператором МАНС, мы можем включить следующее:

- состояние внешней среды (окружающего мира);
- цель, ради которой реализуется управление;
- перечень активных эксплуатационных ограничений, действующих в процессе принятия решения;
- трафик;
- наличие входного управляющего сигнала (состояние радиовхода ДУ).

Рассмотрим эти факторы более подробно.

Состояние внешней среды определяется сигналами эхолота и метеорологического комплекса, установленного на судне и на берегу, а также долгосрочными прогнозами, полученными от береговых служб, включая НАВТЕКС и пр.

Цель управления — это не только переход из точки А в точку Б, но и задачи управления состоянием судовых технических средств в текущих режимах судна, включая аварийный. Под управлением мы понимаем воздействие не только на органы изменения навигационных параметров движения судна, но и на органы изменения состояния различных судовых систем и механизмов. Цель и задачи управления могут

корректироваться посредством приема/передачи новых данных по радиоканалу от центра дистанционного управления.

Перечень активных ограничений в процессе принятия решения включает в себя как технические средства, определяющие коридор движения судна, так и регулирующую документацию:

- систему маяков, образующую допустимый судовой ход для организации движения судна и выполнения им различных операций, в том числе при взаимодействии с инфраструктурой;
- Правила управления автономными судами (утв. Приказом Минтранса России от 22.04.2024 № 140);
- Общие правила плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним (утв. Приказом Минтранса России от 12.11.2021 № 395 (ред. от 04.12.2023));
- действующие правила нормативных документов для судна в зависимости от его режима работы (МПССС-72, портовые руководящие документы, портовые постановления и т.д.);
- другую необходимую нормативно-техническую и правовую документацию.

Трафик — это реконструкция окружающей обстановки в реальном масштабе времени с целью обнаружения объектов, представляющих максимальную опасность в процессе движения судна МАНС.

Входной управляющий сигнал — контроль перевода управления с автономного на дистанционное, контроль дистанционного управления. При наличии соответствующего управляющего сигнала автономное судно переходит на дистанционное управление. При этом осуществляется непрерывная идентификация наличия киберугроз и защита от них.

Таким образом может быть представлен минимальный перечень входных сигналов, образующих множество компонента «окружающий мир». Этот перечень прорабатывается проектировщиком в соответствии с требованием п. 9.1.1, 9.1.1.2 Положений МАНС и представляется в Регистр.

Второй компонент триады — «объект управления», то есть судно, может быть представлен вторым множеством входных сигналов — «ответов», перечисленных в разделе «Состояние объекта управления» (см. ниже), а также сигналов, которые необходимы САУ в качестве обратной связи.

Это множество сигналов прорабатывается проектировщиком в соответствии с требованиями ч. XI, XV Правил классификации и постройки морских судов РС (далее — Правила РС/К) применительно к конкретному оборудованию и представляется в Регистр в виде перечня сигналов в соответствии с требованием п. 3.2.8., ч. I Правил РС/К.

Результаты самоконтроля объекта управления — это результаты непрерывного автоматического самоконтроля как системы управления, так и объекта управления с помощью средств АПС.

Состояние объекта управления — текущий режим работы судна: маневрирование, ходовой, проход узкостей, погрузка, неисправность, авария, крен, дифферент, направление, скорость и др. в зависимости от типа судна. Сюда же входят и текущие технические характеристики судовых систем, оборудования и механизмов, подлежащих телеметрированию.

Перечисленные сигналы, входящие в первое множество «окружающий мир» и второе множество «объект управления», являются информационными источниками системы ситуационной осведомленности, о которой пойдет речь далее.

Третий элемент триады — «человек-оператор». Это алгоритмы управления, которые обрабатывают входные сигналы, перечисленные выше, способны активировать процесс принятия решения САУ МАНС без участия человека и обеспечивают уровень надежности не хуже требуемого п. 8.1 Положений МАНС.

Задачей системы управления является принятие решения об изменении курса и скорости судна, а также решения об изменении состояний объектов управления, другими словами — формирование множества выходных сигналов, воздействующих на:

- структуру СЭС;
- системы и механизмы МО, включая СЭУ;
- резервные механизмы;
- палубные механизмы;
- формирование отчетов для дистанционного центра управления.

Соответственно, чтобы перечисленные механизмы и системы были включены в контур управления, они в свою очередь должны отвечать требованиям ч. XV, в том числе разд. 7, Правил РС/К.

С учетом вышесказанного структура САУ МАНС может быть представлена следующим образом (рис. 2).

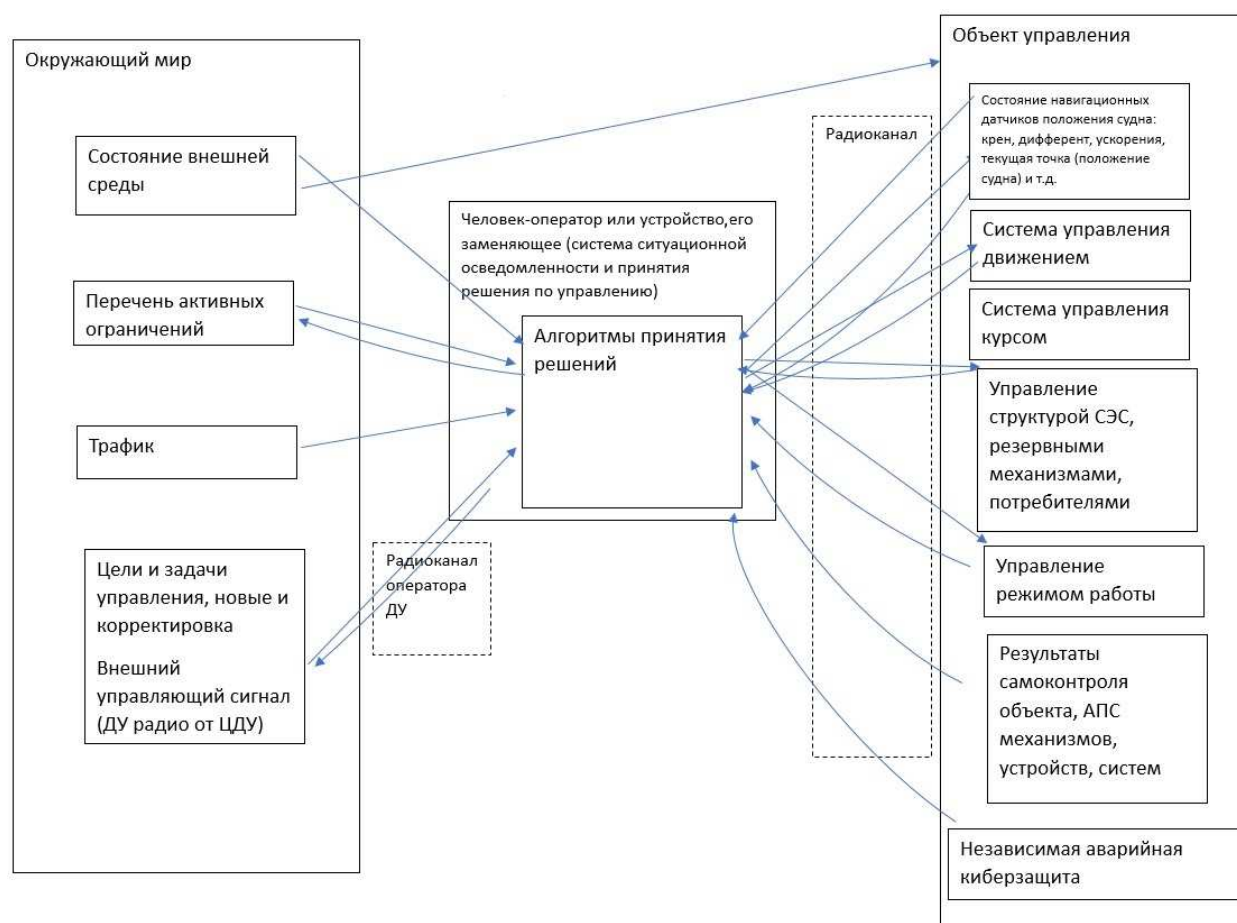


Рис. 2

Выше определена и представлена в графическом виде структура, которая может быть использована на начальном этапе проектных работ, а также перечислены источники информации, формирующие ситуационную осведомленность системы управления (задачи 1 и 2, см. Введение).

Далее определим, какие требования Правил РС и Положения МАНС распространяются на те или иные позиции предлагаемой структуры. Подтверждение соответствия этим требованиям, то есть подтверждение требуемого уровня безопасности, должно быть представлено в Регистр (задача 3, см. Введение).

Состояние внешней среды контролируется имеющимися на борту метеорологическими комплексами, приемниками НАВТЕКС, получаемыми прогнозами погоды. Объем получаемой информации должен быть не менее требуемого п. 9.1.2.2 Положений МАНС. Метеорологические комплексы являются объектом технического наблюдения РС, имеют код номенклатуры 05220000 и отвечают требованиям ч. IV Правил по оборудованию морских судов.

На стадии проектирования разработчику следует представить техническую документацию, подтверждающую выполнение требования п. 9.1.2.2 Положений МАНС.

Перечень активных ограничений — это комплекс физических ограничений движения безэкипажного судна и различных законодательных указаний в соответствии с действующими документами (см. выше). Так, например, в соответствии с указанным в п. 2 Правил управления автономными судами, управление автономным судном в автоматическом режиме допускается осуществлять по заранее заданному маршруту. Это указание Правил учитывается требованием п. 2.1.2.7 и разд. 11 Положений МАНС. Для создания коридоров движения судов МАНС предусматривается разграничивающая движение разметка (п. 2.1.2.8.4 и разд. 11 Положений МАНС). Техническая документация должна быть представлена в объеме, указанном в п. 2.1.2.7 Положений МАНС.

Внешний управляющий сигнал — это дистанционное надежное и безопасное радиоуправление судном, осуществляемое человеком-оператором с пульта дистанционного управления. Подразумевается возможность не только изменения навигационных параметров движения судна, но и управления техническими средствами. Соответственно, этот радиоканал должен быть защищен от возможности несанкционированного доступа или перехвата (обеспечение кибербезопасности).

Учитывая тот значительный ущерб, который может быть нанесен в случае перехвата управления, по мнению авторов, кибербезопасность должна обеспечиваться не только защищенным радиоканалом и наличием демилитаризованных зон, но и независимой системой защиты (как это указано в ч. XV Правил РС) с постоянно действующими, неотключаемыми функциями:

- распознавания ситуации неизбежного столкновения;
- формирования команд экстренного изменения курса и остановки (реверса) СЭУ.

Требования к документации по радиооборудованию указаны в п. 2.1.2.3 с учетом требований по кибербезопасности п. 2.1.2.8, 2.1.2.8.2, его состав и функциональные возможности — в гл. 9.2 с учетом требований п. 9.2.1.5 и разд. 12 Положений МАНС. Выполнение указанных требований подтверждается соответствующей проектной документацией.

Перейдем к рассмотрению составляющих второго компонента — «объекта управления».

Система управления движением — управление СЭУ. Включает в себя силовую установку МАНС, электроэнергетическую систему (СЭС), движительный комплекс, систему управления ДАУ ГД (ДАУ ГЭУ), систему управления судовой электроэнергетикой. Остановимся на этом разделе более подробно.

В соответствии с требованиями гл. 9.4 Положений МАНС, судовая энергетическая установка включает в себя две системы управления:

- систему автоматического электроснабжения (п. 9.4.6 Положений МАНС);
- систему искусственного интеллекта СЭУ (п. 9.4.7 Положений МАНС).

Соответственно, система автоматического электроснабжения решает задачи управления структурой СЭС, резервным оборудованием СЭС, потребителями и т.д. Здесь под структурой СЭС понимается совокупность элементов в их определенном состоянии, входящих в состав судовой электростанции, объединенных в электроэнергетическую систему (источники, коммутационные и защитные устройства, фидеры и т.д.).

Система автоматического управления электроснабжением на основании анализа входных сигналов должна выполнять такой алгоритм управления, при котором обеспечивается построение связанной структуры СЭС максимальной пропускной способности (все необходимые шины ГРЩ под напряжением), с минимальным числом связей (структура без циклов (граф, дерево графа) для обеспечения безопасности электроснабжения).

Касательно управления силовой установкой (СЭУ) МАНС может быть предложено применение системы искусственного интеллекта (ДАУ ГД, ГЭУ) для контроля состояния и управления двигателями, в том числе посредством интеллектуального регулятора оборотов ГД и ДГ [5,6]. В этом случае критериями безопасности могут быть не только задачи обеспечения хода во всех режимах работы судна (т.е. обеспечение надежности СЭУ), но и критерии экономичного потребления топлива с учетом современных требований к контролю вредных выбросов. Успешное решение многокритериальных задач в наше время может быть получено с использованием нейронных сетей, в частности наиболее подходящих для этих целей (построения ассоциативной памяти САР рейкой топливного насоса дизельного двигателя), по мнению авторов, радиально-базисных (RBFN) сетей. Естественно, что технические решения, основанные на этой теории, имеют весомое преимущество в простоте, гибкости и, следовательно, универсальности и надежности, по сравнению, например, с техническими решениями, основанными на возрождаемой сейчас теории перцептронов.

Техническая документация в объеме п. 2.1.2.5.1 (система автоматического электроснабжения с учетом требований п. 9.4.6) и п. 2.1.2.5.2 (система искусственного интеллекта СЭУ с учетом требований п. 9.4.7) Положений МАНС должна быть представлена в Регистр. Применимые требования ч. XI, XV Правил РС должны быть выполнены.

Система управления курсом представляет собой комплекс навигационного оборудования, обеспечивающий маневрирование и движение судна по заданному маршруту. Техническая документация разрабатывается в объеме требований п. 2.1.2.4, 2.1.2.6.3 с учетом требований гл. 9.3 и 10.3 Положений МАНС. Состав навигационного оборудования тесно связан с системой ситуационной осведомленности.

Управление режимом работы объекта — это определение, в каком состоянии находится объект управления и в какой режим работы его требуется перевести в зависимости от выполняемых им задач. Понятно, что в зависимости от этих факторов будет выбран тот или иной алгоритм управления объектом.

Результаты самоконтроля объекта управления, АПС механизмов: на борту судна должен непрерывно выполняться автоматический самоконтроль оборудования, систем и механизмов с формированием сигналов АПС, передаваемых в ЦДУ по радиоканалу. Объем контролируемых параметров должен отвечать в том числе и требованиям ч. XI, а также разд. 4 и 7 ч. XV Правил РС.

Перейдем к рассмотрению центральной части структуры, а именно САУ МАНС, подходу к разработке и получению структуры которой и посвящена данная статья. Это основная система, которая выделяет МАНС

из множества других и определяет степень автономности судна от человека-оператора. В соответствии с п. 9.1.1.3 Положений МАНС, система обеспечения ситуационной осведомленности, в зависимости от уровня автоматизации судна, может решать задачу выработки команд для управляющего воздействия. В этом случае она должна называться системой ситуационной осведомленности и принятия решения по управлению (управление не только параметрами движения, но и состоянием технических средств на борту). Объем технической документации, который необходимо представить Регистру для рассмотрения, указан в п. 2.1.2.2 Положений МАНС. С учетом требований к составу радио- и навигационной аппаратуры, необходимой для работы системы ситуационной осведомленности, (см. п. 9.1.2.8), в объем технической документации входит указанное в п. 2.1.2.3 и 2.1.2.4 Положений МАНС.

Рассмотрение состава и структуры системы ситуационной осведомленности и принятия решения по управлению выходит за рамки настоящей статьи, однако авторы считают необходимым сказать несколько слов по этому вопросу.

Из всего множества определений термина «ситуационная осведомленность» приведем следующее: «Ситуационная осведомленность — это ментальная модель состояния окружающей среды, объекта управления, целей и ограничений в их взаимосвязи, имеющаяся у людей, принимающих решение». По сути дела, это та триада, о которой говорилось выше, но представленная как единое целое — модель картины мира, которая возникает в сознании человека-оператора. Поэтому для достижения поставленной цели — разработки системы ситуационной осведомленности — необходимо разработать техническое устройство с формированием в его памяти такой ментальной модели ситуации, которая по составу и информативности была бы аналогична человеческой. Результатом обработки входной ситуации, если снова применить метод эмпатии, является ответ на три онтологических вопроса: «кто я?» — текущее состояние, режим работы, самоидентификация и самоконтроль систем объекта управления, «где я?» — текущая картина мира, «зачем я?» — остальное из вышеуказанного определения ситуационной осведомленности.

Блок принятия решения по управлению.

Если структура и состав технических средств, входящих в систему ситуационной осведомленности, в настоящее время более-менее понятен и пока что отчасти технически реализуем, то программное ядро, алгоритмы управления принятием решения, не уступающие по эффективности человеку-оператору (уровень «сознания» управляющего «поведением» объекта, его движением и реакцией на события окружающей «сцены»), все еще находятся на стадии разработки. Это и является в настоящее время центральной проблемой в области беспилотных транспортных средств категории АС (табл. 1.2.4 Положения МАНС). Решение этой проблемы до настоящего времени не завершено, несмотря на серьезные усилия в этой области [7 — 9].

Разработка такого алгоритма, по всей видимости, может быть построена на основании следующих рассуждений.

Первое. Как было сказано ранее, алгоритм управления должен заменить человека-оператора. Поэтому насколько человек детерминирован в процессе управления, настолько должен быть детерминирован и заменяющий его алгоритм. Степень детерминированности человека можно оценить, обратившись к вышеизложенному определению ситуационной осведомленности. Хотя одинаковые входные данные обеспечивают одинаковый результат, пути достижения этого результата при управлении человеком-оператором могут различаться в зависимости от результатов анализа текущей ситуации. Аналогичный подход может быть реализован и при разработке алгоритма автоматического управления (о чем подробнее ниже).

Второе. Автоматическое устройство, так же, как человек, должно «понимать» текущую ситуацию, в которой находится объект. Кроме всего прочего, это значит уметь объяснить, то есть ответить на вопрос «почему ты сделал так?», понимать, что происходит вокруг, определять перечень опасностей и составлять их рейтинг. Далее, по результатам анализа текущей ситуации и вариантов развития событий в ближайшем будущем (прогнозирование событий — вот где оно, это не функция системы ситуационной осведомленности, там решаются другие задачи) выбрать такую траекторию движения объекта управления, которая бы минимизировала максимальную опасность в текущей ситуации (например, снизить/увеличить скорость, изменить курс, выполнить маневр «уклонение» и т.п. в объеме знаний специализации «Судовождение»). При этом блок ситуационной осведомленности непрерывно передает полученную информацию в блок принятия решения по управлению. Последний активируется каждый раз после идентификации очередного элемента окружающего мира (после каждого сканирования сцены выполняется передача параметров присутствующих на ней элементов (курс, скорость, размер объекта и т.д.).

Таким образом, система автоматического управления не должна быть только переборной: невозможно заранее все предугадать, все заложить в память управляющего устройства и всему его научить. Система управления, так же как человек-оператор, должна каждый раз самостоятельно конструировать решение на основании единого минимаксного закона, проводя анализ текущей ситуации. При этом должен использо-

ваться и стандартный набор решений (ответов) на стандартные ситуации в случае их появления (имитация опыта человека-оператора).

Возможно, что этот алгоритм будет основан на применении нейронных сетей с автоматическим процессом их обучения с использованием генератора случайных ситуаций (понятно, что от глубины генерирования будет зависеть и время обучения). Обученный таким образом алгоритм подлежит проверке сначала на имитационном стенде, а потом в опытовом бассейне (водоеме) на судне-модели при симуляции различных погодных условий с одновременным созданием помех другими судами-моделями, изменяющими скорость и направление, как это указано в п. 4.5 Положений МАНС.

Во всяком случае в настоящее время пока еще нет требований к алгоритмам системы ситуационной осведомленности и принятия решений, и в процессе их создания следует руководствоваться указанным в гл. 8.1, п. 8.4.2 Положений МАНС в части обеспечения уровня безопасности, эквивалентного или лучшего по сравнению с обычным судном, спроектированным и эксплуатируемым в соответствии с существующими правилами и нормами РС. Соответственно, принятые технические решения в части разработки алгоритма управления, подтверждающие его безопасность и надежность, должны быть задокументированы и представлены Регистру для рассмотрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье рассмотрен подход к разработке концепции САУ МАНС с учетом требований нормативных документов РС, в том числе Положений МАНС:

- проработан перечень источников информации, формирующих ситуационную осведомленность системы управления;
- представлен принцип построения структуры САУ — для возможности принятия решения о безопасности применения МАНС (концепция САУ МАНС с точки зрения п. 8.4.2.2 Положений МАНС);
- определен минимум необходимых подтверждений того, что представленная проектировщиком концепция обеспечивает уровень безопасности МАНС эквивалентной или лучшей по сравнению с обычным судном, спроектированным согласно существующим правилам РС, как это указано в п. 8.1 Положений МАНС. Подтверждения выполнения требований Правил РС и Положений МАНС.

Поскольку в настоящее время опыт проектирования систем МАНС еще только набирает силу [10], разработчику следует в максимально открытой форме представить в РС техническую документацию, кроме всего прочего, раскрывающую решения вопросов, составляющих элементы структуры, полученной в настоящей статье.

В соответствии с требованием 8.5.1 Положений МАНС результаты разработки концепции оформляются в виде пояснительной записки и должны быть представлены Регистру разработчиком либо самостоятельно, либо в составе концепции использования МАНС.

Статья не является окончательной инструкцией по проектированию, и авторы с благодарностью воспримут критику от читателей по адресу litov.dv@rs-class.org.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В.В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В.В. Каретников, С.В. Рудых, А.А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7 — 15.
2. Литов Д.В. Математическое обеспечение автоматического управления судовой электроэнергетикой на базе итеративных методов обработки информации: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Литов; С.-Петерб. гос. ун-т водных коммуникаций. — СПб., 1995. — 20 с.
3. Сенченко В. В окружении стаи буксиров-роботов / В. Сенченко, В. Дергилев // Морской флот. — 2023. — № 3. — С. 32 — 35.
4. Степанова В.И. Единая система мониторинга, диагностики и тестирования оборудования на МАНС: принцип реализации и возможности / В.И. Степанова, С.В. Смоленцев // Актуальные решения проблем водного транспорта: м-лы II Междунар. науч.-практ. конф. — Астрахань, 2023. — С. 411 — 416.
5. Хватов О.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, И.С. Поляков. — Н. Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. — 172 с.
6. Хватов О.С. Повышение эффективности дизель-генераторной электростанции / О.С. Хватов, Д.С. Кобяков // Электротехника. — 2020. — № 12. — С. 25 — 31.
7. Ураков А.Р. Актуальные проблемы автоматического управления транспортными средствами / А.Р. Ураков, Т.В. Тимеряев // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2021. — № 1. — С. 125 — 130.

8. Ураков А.Р. Возможность частичной реализации при алгоритмическом подходе и большом списке сущностей / А.Р. Ураков, Г.И. Федорова // Системная инженерия и информационные технологии. — 2022. — Т. 4. — № 2(9). — С. 44 — 48. — DOI: 10.54708/26585014_2022_42943.
9. Чабак А.А. Обзор актуальных алгоритмов по оптимизации маршрутов автономных судов / А.А. Чабак // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 259 — 270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270.
10. Васильев В. Суда без экипажей: перспективы и варианты / В. Васильев // Морские вести России. — 04.07.2019. [Электронный ресурс] URL: <https://morvesti.ru/analitika/1692/79474/> (дата обращения 03.03.2025).

REFERENCES

1. Karetnikov V.V., Rudykh S.V., Butsanets A.A. On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019. No. 2. P. 7 — 15. (In Russ.)
2. Litov D.V. Matematicheskoe obespechenie avtomaticheskogo upravleniya sudovoi elektroenergetikoi na baze iterativnykh metodov obrabotki informatsii [Mathematical support of automated control of ship electric power system on the basis of iterative methods of information processing: PhD thesis abstr.]. St. Petersburg, 1995. 20 p.
3. Senchenko V. V okruzhении stai buksirov-robotov [Surrounded by a pack of robot tugboats]. *Morskoi Flot = Maritime Fleet*. 2023. No. 3. P. 32 — 35.
4. Stepanova V.I., Smolentsev S.V. Unified system for monitoring, diagnostics and testing of equipment at MASS: implementation principle and opportunities. *Aktual'nye resheniya problem vodnogo transporta [Current Solutions to Water Transport Problems: Proc. of II International Research and Practice Conf.]* Astrakhan, 2023. P. 411 — 416.
5. Khvatov O.S., Dar'nikov A.B., Samoyavchev I.S., Polyakov I.S. Avtonomnye generatornye ustanovki na osnove dvigatelei vnutrennego sgoraniya peremennoi chastoty vrashcheniya [Autonomous generator sets based on variable-speed internal combustion engines]. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2016. 172 p.
6. Khvatov O.S., Kobayakov D.S. Increasing the efficiency of a diesel-generator power plant. *Russian Electrical Engineering*. 2020. No. 12. P. 742 — 748.
7. Urakov A.R., Timeryaev T.V. Actual problems of autonomous vehicle control. *Intellectual Technologies on Transport*. 2021. No. 1. P. 125 — 130. (In Russ.)
8. Urakov A., Fedorova G. Partial implementation capability with algorithmic approach and large list of entities. *Systems Engineering and Information Technologies*. 2022. Vol. 4. No. 2(9). P. 43 — 48. DOI: 10.54708/26585014_2022_42943. (In Russ.)
9. Chabak A.A. Overview of current algorithms for autonomous vessels route optimization. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16. No. 2. P. 259 — 270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270. (In Russ.)
10. Vasil'ev V. Suda bez ekipazhei: perspektivy i variant [Crewless ships: prospects and options]. *Maritime News of Russia*. 04.07.2019. URL: <https://morvesti.ru/analitika/1692/79474/> (accessed 03.03.2025).



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.5.017
EDN UFKSYW

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАЧКИ АВТОНОМНОГО СУДНА

С.В. Шульц, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: svsch9@yandex.ru

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191186 Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 7А, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

В.Ю. Шульц, канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: vysch@yandex.ru

Актуальность выбранной темы исследования объясняется активным развитием автономного судовождения и необходимостью решения проблем, возникающих в процессе эксплуатации морских автономных надводных судов. В данной работе приведен обзор некоторых моделей прогнозирования качки судна на нерегулярном волнении, построенных на основе искусственных нейронных сетей. Практическое преимущество рассмотренных подходов заключается в возможности их применения в составе относительно малопроизводительных бортовых вычислительных комплексов автономных судов, где экономически нецелесообразно или технически невозможно размещение высокопроизводительных вычислительных кластеров, а результаты расчетов должны получаться в реальном времени. Сделан вывод, что результаты расчетов, полученные с помощью рассмотренных моделей, имеют существенную погрешность прогнозирования параметров качки судна вблизи экстремумов кривой углов бортовой и килевой качки, что ставит под вопрос безопасность их применения.

Ключевые слова: автономное судно, моделирование качки, нерегулярное волнение, искусственные нейронные сети.

Для цитирования: Шульц С.В. Обзор применения искусственных нейронных сетей в задачах моделирования качки автономного судна / С.В. Шульц, М.А. Кутейников, В.Ю. Шульц // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025. № 78. С. 44 — 50. — EDN UFKSYW.

AN OVERVIEW OF APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MODELING MOTIONS OF AUTONOMOUS SHIP

S.V. Shults, PhD student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: svsch9@yandex.ru

M.A. Kuteinikov, DSc, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

V.Yu. Shults, PhD, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vysch@yandex.ru

The relevance of the chosen research topic is explained by the active development of autonomous navigation and the need to solve problems arising during the operation of marine autonomous surface ships. This paper provides an overview of some models for predicting motions of a ship in irregular waves, built on the basis of artificial neural networks. The practical advantage of the considered approaches lies in the possibility of their application as part of relatively low-performance onboard computing systems of autonomous ships, where it is economically impractical or technically impossible to place high-performance computing clusters, and

the calculation results should be obtained in real time. It is concluded that the calculation results obtained using the considered models have a significant error in predicting the ship's motions parameters near the extremes of the curve of the angles of rolling and pitching, which calls into question the safety of their application.

Key words: *autonomous ship, simulation of ship motions, irregular sea waves, artificial neural networks.*

For citation: Shults S.V., Kuteinikov M.A., Shults V.Yu. An overview of application of artificial neural networks in modeling motions of autonomous ship. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 44 — 50. EDN UFKSYW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2018 года компаниями Rolls-Royce и Finferries были продемонстрированы возможности первого в мире полностью автономного паромов «Falco» при плавании без участия экипажа. Судно выполнило автоматическую швартовку при помощи разработанной для него автономной навигационной системы. Все операции были выполнены без какого-либо вмешательства со стороны экипажа [1].

В период с 2019 по 2023 год введены в эксплуатацию автономные суда «Маршал Рокоссовский», «Генерал Черняховский» (Россия); «ReVolt», «Yara Birkeland», «ASTAT», «Milliamper» (Норвегия); «Jin Dou Yun» (Китай) и др.

Основная мотивация внедрения систем автономного судовождения [2] — возможность сведения к минимуму человеческого фактора, который является основной причиной морских аварий и катастроф: исследования в области транспортных потерь и безопасности показывают, что причины 75 — 90 % морских аварий, произошедших за последние годы, можно отнести к человеческому фактору [3, 4].

Внедрение систем автономного судовождения позволит в перспективе морским компаниям-перевозчикам экономить средства за счет автоматизации процессов, оптимизации маршрутов, повышения топливной эффективности, снижения требований к конструкции, оснащению судов и условиям плавания в части обитаемости, большей грузоподъемности при том же водоизмещении и др. [5], что делает исследования в области автономного судовождения перспективными и актуальными.

Обеспечение безопасной эксплуатации полностью автономного судна требует среди прочего существования надежного метода, достоверно воспроизводящего движение судна на волнении [6], то есть выполняющего предсказание параметров качки судна на нерегулярном волнении во избежание его опрокидывания и навала на другие суда.

Искусственные нейронные сети известны своей способностью к нахождению нелинейных зависимостей в данных. В этой связи интерес вызывают методы прогнозирования параметров качки, основанные на искусственных нейронных сетях.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧКИ СУДНА

В статье [7] предложена модель предсказания килевой качки на основе искусственной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (long short-term memory, LSTM), использующей в качестве входных данных двумерный последовательный временной ряд высот волн. Обучение модели выполняется при помощи алгоритма адаптивной оценки момента («Adam»).

Валидация разработанной модели выполнена путем сопоставления ее прогнозов с данными параметров качки судна, полученными методами вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD). Дополнительно проведено сравнение результатов работы модели с результатами модели одномерного временного ряда волн. Моделирование проводилось для случаев четырех-, пяти- и шестибалльного волнения.

В отличие от одномерной модели, которая показывает способность к предсказанию параметров вертикальной качки (линейные колебания), но плохо справляется с предсказанием килевой (вращательные колебания), разработанная модель показывает лучшие результаты в обоих случаях. Недостатком модели является существенная погрешность определения дифферента вблизи экстремумов кривой углов килевой качки (рис. 1).

В работе [8] для прогнозирования бортовой качки используется гибридная модель на базе авторегрессионного интегрированного скользящего среднего (autoregressive integrated moving average, ARIMA) и глубокой нейронной сети (deep neural network, DNN).

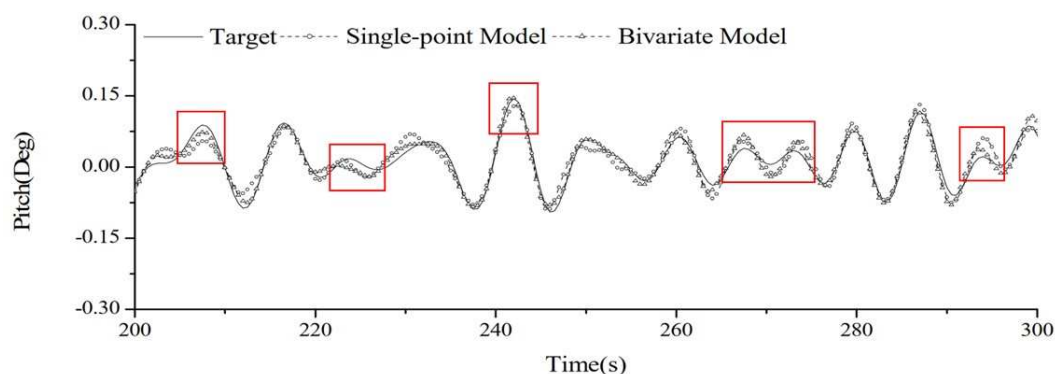


Рис. 1. Сравнение точности предсказаний одномерной (одноточечной) и двумерной моделей на четырехбалльном волнении. Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений дифферента

Модель ARIMA является вычислительно простой линейной моделью анализа и прогнозирования временных рядов, однако входные данные в задачах прогнозирования качки практически всегда существенно нелинейны. Искусственные нейронные сети же, в том числе DNN, способны качественно моделировать нелинейные системы. Гибридная модель представляет собой комбинацию линейной и нелинейной составляющих. Теоретически сильная сторона гибридного подхода заключается в способности одинаково хорошо моделировать линейные и нелинейные системы.

Валидация модели выполнена путем сопоставления результатов прогнозирования с набором данных, полученным путем записи параметров качки плавучей добывающей установки на нерегулярном волнении.

Точность линейной модели ARIMA ожидаемо оказалась хуже, чем у «оригинальной» DNN и гибридной моделей (рис. 2). Модель DNN и гибридная модель показывают лучшую способность к прогнозированию параметров качки, причем гибридная модель работает точнее на всех протестированных горизонтах (длительностях) предсказания.

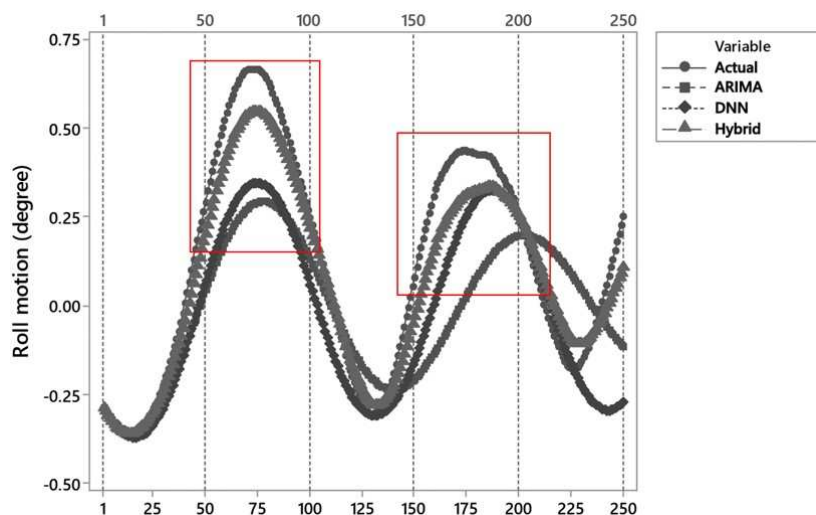


Рис. 2. Сравнение точности предсказаний моделей ARIMA, DNN и гибридной модели. Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений крена

Недостатком всех трех моделей является существенная погрешность определения крена вблизи экстремумов кривой углов бортовой качки.

В работе [9] для предсказания рыскания судна под действием волн, ветра и течений в реальном масштабе времени используется вейвлет-нейронная сеть с временной задержкой на основе модели нелинейной авторегрессии с экзогенными входами (nonlinear autoregressive moving average with exogenous inputs, NARMAX).

Вейвлет-нейронная сеть (wavelet neural network, WNN) представляет собой разновидность нейронной сети с локальным откликом, использующей в качестве функции активации вейвлет-функцию. WNN устанавливает связь между вейвлет-преобразованием и параметрами сети через так называемое аффинное соединение.

В предлагаемом подходе на вход вейвлет-нейронной сети текущие параметры качки и пространственных перемещений судна подаются вместе с архивными данными.

Валидация модели выполнена путем сравнения прогнозируемых значений рыскания с реальными данными, записанными аппаратурой, установленной на судне «YUKUN» во время выхода в море.

Разработанная модель обладает хорошими возможностями аппроксимации (рис. 3).

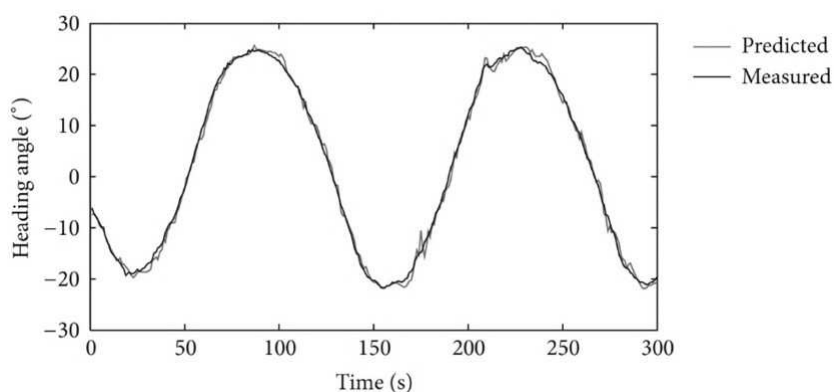


Рис. 3. Результат прогнозирования моделью WNN рыскания на 300 секунд вперед. Отклонения предсказанных значений курсового угла от фактических незначительны

Важно отметить, что исследовавшийся в статье [9] вопрос в контексте автономного судовождения очень важен с точки зрения предотвращения столкновений с другими судами (т.н. «навала» на другое судно), но непосредственного отношения к безопасности судна в аспекте предотвращения опрокидывания не имеет.

В работе [10] для предсказания ускорений вертикальной качки судна в реальном масштабе времени рассматривается использование моделей на основе искусственной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и управляемых рекуррентных блоков (gated recurrent unit, GRU) рекуррентной нейронной сети (recurrent neural network, RNN).

Модели семейства RNN подходят для решения задач обучения с учителем (supervised learning) на последовательных во времени наборах данных. Архитектура RNN является обобщением искусственной нейронной сети прямого распространения, в которую добавлена кольцевая структура таким образом, чтобы выходные данные некоторых нейронов подавались обратно на вход сети.

Оригинальная модель RNN подвержена проблемам взрывающегося и исчезающего градиента (exploding and vanishing gradient), кроме того, составляющая градиента мала в направлении, соответствующем долгосрочной корреляции, поэтому классическая модель RNN дает наилучшие прогнозы лишь в краткосрочной перспективе. Для устранения описываемых проблем авторы в своей работе рассматривают две производные от RNN и более эффективные модели: LSTM и GRU. Обучение сети в обоих случаях происходит при помощи алгоритма адаптивной оценки момента («Adam»).

Валидация разработанной модели была проведена на данных временной динамики вертикальных ускорений, записанных в носовой, кормовой оконечностях и на миделе крупномасштабной модели судна в процессе самоходных испытаний модели в море.

Предложенный подход показал ограниченную способность к предсказанию величин ускорений крупномасштабной модели судна на десятки секунд вперед.

Недостатком обеих рассмотренных моделей является существенная погрешность определения ускорений вблизи экстремумов кривой ускорений вертикальной качки в носовой и кормовой оконечностях (рис. 4).

В работе [11] для краткосрочного прогнозирования бортовой качки судна на волнении предлагается использовать искусственную нейронную сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Особенностью предлагаемого подхода является учет не только архивных данных по изменению крена судна, но и значения высот волн на некотором удалении от корпуса судна.

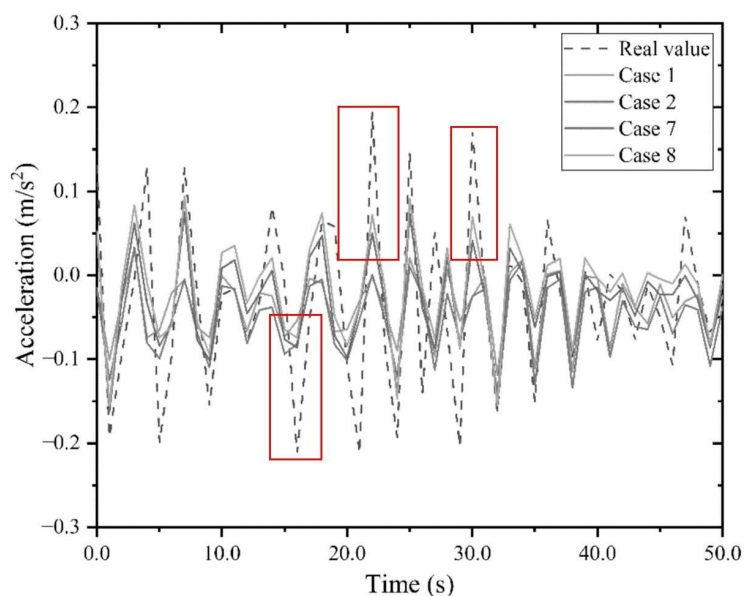


Рис. 4. Измеренные и предсказанные значения вертикального ускорения в носовой оконечности. Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений ускорения

Данные о высотах волн и характеристиках качки, использованные для обучения и валидации модели, были получены методами вычислительной гидродинамики (CFD). Моделировалось пятибалльное волнение по спектру Пирсона — Московица и качка масштабной модели судна на нем. На практике высоты волн могут быть получены с помощью установленного на судне лидара или радиолокационной станции.

Анализ результатов расчетов, выполненный авторами работы, позволяет сделать следующие выводы:

- по сравнению с результатами прогнозирования, основанными исключительно на архивных данных о крене, прогнозирование бортовой качки с учетом высот волн значительно улучшает как точность, так и продолжительность периода прогнозирования;
- длительность периода прогнозирования увеличивается с увеличением расстояния от корпуса судна до точек, где замеряется высота волны;
- по мере увеличения количества точек, в которых измеряется высота волны, длительность периода прогнозирования модели увеличивается.

Недостатком модели является существенная погрешность определения крена вблизи экстремумов кривой углов бортовой качки (рис. 5).

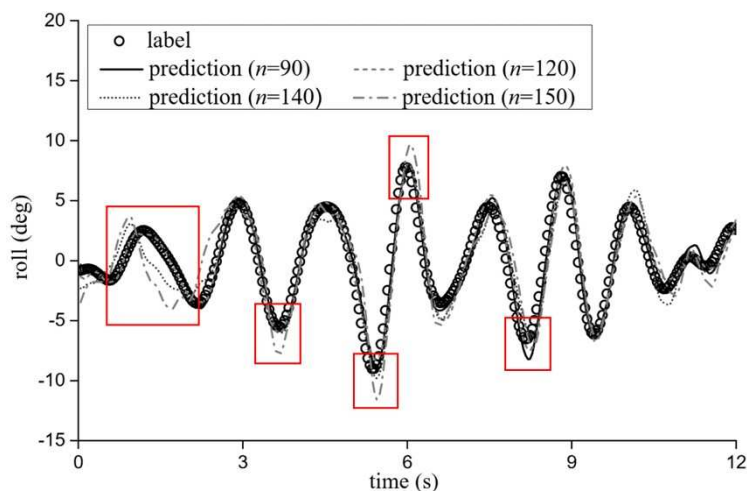


Рис. 5. Предсказание крена на основе архивных данных одновременно с замерами высоты волны в 1 м, 3 и 5 м от корпуса судна. Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений крена

В работе [12] предложен метод прогнозирования бортовой качки судна, основанный на двунаправленной сети долгой краткосрочной памяти (bidirectional long short-term memory, Bi-LSTM) и механизме внимания к временным закономерностям (temporal pattern attention, TPA).

Модель Bi-LSTM-TPA сочетает в себе преимущества моделей Bi-LSTM и TPA. С помощью Bi-LSTM извлекаются временные особенности многомерных временных рядов в прямом и обратном направлениях. Модель TPA принимает на вход выходные характеристики сети Bi-LSTM и извлекает из них полезную для прогнозирования информацию о закономерностях, содержащуюся в состоянии каждого признака. Объединение моделей Bi-LSTM и TPA теоретически могло бы позволить использовать преимущества каждой из них в полной мере, тем самым повысив точность прогнозирования.

Валидация модели выполнена путем сравнения прогнозируемых значений параметров бортовой качки с реальными данными, записанными на судне во время выхода в море. Измерялся угол крена, угловое ускорение бортовой качки и др. Дополнительно проведено сравнение результатов работы модели с результатами работы «оригинальной» модели LSTM и метода опорных векторов (support vector machine, SVM).

Модель Bi-LSTM-TPA показала несколько лучшую точность прогнозирования, чем модели SVM и LSTM, особенно вблизи экстремумов кривой углов бортовой качки, где, как было показано ранее, модель LSTM не способна точно предсказывать значения крена. Однако отклонения (рис. 6) существенны, и применение полученных результатов может подвергнуть риску безопасность автономного судна.

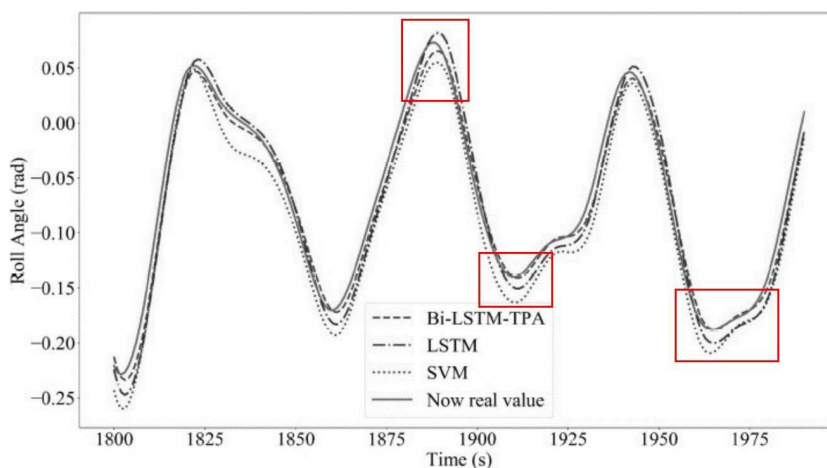


Рис. 6. Сравнение результатов работы моделей SVM, LSTM и Bi-LSTM-TPA.

Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений дифферента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искусственные нейронные сети в настоящее время успешно используются для решения сложно формализуемых задач, связанных с обработкой неструктурированных данных, и других задач, для которых не существует заранее заданного алгоритма решения.

К практическим преимуществам использования подходов на основе искусственных нейронных сетей в автономном судовождении можно отнести возможность их применения в составе относительно мало-производительных бортовых вычислительных комплексов автономных судов, где экономически нецелесообразно или технически невозможно размещение высокопроизводительных вычислительных кластеров, а результаты расчетов должны получаться в реальном времени.

Недостатком рассмотренных моделей является то, что результаты расчетов, получаемые с их помощью, имеют существенную погрешность прогнозирования параметров качки судна вблизи экстремумов кривой углов бортовой и килевой качки, что ставит под вопрос безопасность применения этих результатов.

Искусственная нейронная сеть в сути своей является аппроксиматором, работающим по закономерностям, извлеченным из архивных данных на этапе обучения. Модели предсказания качки, основанные на искусственных нейронных сетях, не содержат в себе физики процесса качки, а потому дают недостоверные результаты, когда параметры входного процесса выходят за границы аппроксимационных возможностей модели или за границы «изученного» материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Madusanka N.S. Digital twin in the maritime domain: a review and emerging trends / N.S. Madusanka, Y. Fan, S. Yang, X. Xiang // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11. Issue 5. — P. 1021. — DOI: 10.3390/jmse11051021.
2. Айзинов С.Д. Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С.Д. Айзинов, А.А. Буцанец, С.В. Смоленцев, В.Г. Сенченко, М.С. Лопатин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83 — 96.
3. Kasyk L. The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents / L. Kasyk, A.E. Wolnowska, K. Pleskacz, T. Kapuściński // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13. — Issue. 11. — P. 6780. — DOI: 10.3390/app13116780.
4. Гомзяков М.В. Обзор аварийности морских транспортных судов Дальневосточного региона / М.В. Гомзяков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 4 — 10.
5. Казунин Д.В. Разработка проекта требований РС к автономным судам / Д.В. Казунин, В.В. Ефимов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 60/61. — С. 4 — 22.
6. Кутейников М.А. Критерии риска потери устойчивости судна без хода / М.А. Кутейников, В.Р. Самойлов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 40 — 50.
7. Liu Y. Improving deterministic pitch motions estimation using bivariate sequential wave input / Y. Liu, Q. Zheng, W. Duan, L. Huang // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 688. Issue 3. — P. 033017. — DOI 10.1088/1757-899X/688/3/033017.
8. Suhermi N. Roll motion prediction using a hybrid deep learning and ARIMA model / N. Suhermi, S. Suhartono, D.D. Prastyo, B. Ali // *Procedia Computer Science*. — 2018. — Vol. 144. — P. 251 — 258. — DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.526.
9. Zhang W. Real-time ship motion prediction based on time delay wavelet neural network / W. Zhang, Zh. Liu // *Journal of Applied Mathematics*. — 2014. — Vol. 4. — Article ID 176297. — DOI: 10.1155/2014/176297.
10. Su Y. Real-time prediction of large-scale ship model vertical acceleration based on recurrent neural network / Y. Su, J. Lin, D. Zhao, C. Guo et al. // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 8. Issue 10. — P. 777. — DOI: 10.3390/jmse8100777.
11. Tian X. Machine learning for short-term prediction of ship motion combined with wave input / X. Tian, Y. Song // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13. Issue 9. — P. 5298. — DOI: 10.3390/app13095298.
12. Wang Y. Ship roll prediction algorithm based on Bi-LSTM-TPA combined model / Y. Wang, H. Wang, D. Zou, H. Fu // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9. Issue 4. — P. 387. — DOI: 10.3390/jmse9040387.

REFERENCES

1. Madusanka N.S., Fan Y., Yang S., Xiang X. Digital twin in the maritime domain: a review and emerging trends. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Issue 5. P. 1021. DOI: 10.3390/jmse11051021.
2. Aizinov S.D., Butsanets A.A., Smolentsev S.V., Senchenko V.G., Lopatin M.S. Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 83 — 96. (In Russ.)
3. Kasyk L., Wolnowska A.E., Pleskacz K., Kapuściński T. The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue. 11. P. 6780. DOI: 10.3390/app13116780.
4. Gomzyakov M.V. Overview of maritime transport casualties in the Far East. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 4 — 10. (In Russ.)
5. Kazunin D.V., Efimov V.V. Development of draft RS requirements for autonomous vessels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 60/61. P. 4 — 22. (In Russ.)
6. Kuteinikov M.A., Samoilov V.R. Criteria of risk of stability loss under dead ship condition. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56/57. P. 40 — 50. (In Russ.)
7. Liu Y., Zheng Q., Duan W., Huang L. Improving deterministic pitch motions estimation using bivariate sequential wave input. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 688. Issue 3. P. 033017. DOI 10.1088/1757-899X/688/3/033017.
8. Suhermi N., Suhartono S., Prastyo D.D., Ali B. Roll motion prediction using a hybrid deep learning and ARIMA model. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 144. P. 251 — 258. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.526.
9. Zhang W., Liu Zh. Real-time ship motion prediction based on time delay wavelet neural network. *Journal of Applied Mathematics*. 2014. Vol. 4. Article ID 176297. DOI: 10.1155/2014/176297.
10. Su Y., Lin J., Zhao D., Guo C. et al. Real-time prediction of large-scale ship model vertical acceleration based on recurrent neural network. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. Issue 10. P. 777. DOI: 10.3390/jmse8100777.
11. Tian X., Song Y. Machine learning for short-term prediction of ship motion combined with wave input. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 9. P. 5298. DOI: 10.3390/app13095298.
12. Wang Y., Wang H., Zou D., Fu H. Ship roll prediction algorithm based on Bi-LSTM-TPA combined model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. Issue 4. P. 387. DOI: 10.3390/jmse9040387.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.12
EDN TWDHMMW

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАСЧЕТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА ПРИ ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

М.С. Бойко, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

Объектом исследования в статье являются конструкции морских транспортных судов, подверженные длительному воздействию низких температур окружающего воздуха. Предметом исследования являются методы определения расчетной температуры окружающего воздуха при выборе стали для корпусных конструкций. Рассмотрены методы, которые базируются на требованиях нормативных документов. Выполнен обзор существующей отраслевой нормативной базы, включая Правила Российского морского регистра судоходства, требования Международной ассоциации классификационных обществ, Международной морской организации, Финско-шведской морской администрации, Береговой охраны США. Выполнены расчеты температуры на основе анализа открытой отечественной базы данных измерений с 2013 по 2024 г. в зимний период для точек наблюдения в восточной части Балтийского моря (Финский залив) и на Северном морском пути. Проведено сопоставление значений температуры, полученных по разным методикам. Приведены результаты применения методов теории вероятностей и математической статистики для определения значения расчетной температуры воздуха. Определены параметры нормального закона распределения расчетной температуры для рассмотренных точек наблюдения, получены вероятностные оценки требуемых значений температуры.

Ключевые слова: корпус судна; низкая температура воздуха; Балтийское море, Северный морской путь, суда ледового класса; MDAT; DAT.

Для цитирования: Бойко М.С. Об определении расчетной температуры окружающего воздуха при выборе материалов корпусных конструкций на основе требований нормативных документов / М.С. Бойко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 51 — 64. — EDN TWDHMMW.

DEFINITION OF DESIGN AMBIENT TEMPERATURE FOR THE PURPOSE OF MATERIAL SELECTION FOR SHIP HULL BASED ON THE NORMATIVE DOCUMENTS

M.S. Boyko, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

The object of the study presented in the paper are the structures of ship hull subjected to the long-term influence of low ambient air temperature. The subject of the study are the methods aimed to define the value of design air temperature required to select the steel grade for hull structures. The methods addressed in the paper are based on the industry regulatory framework. The following requirements have been reviewed: rules of Russian Maritime Register of Shipping, International Association of Classification Societies, International Maritime Organization, Finnish-Swedish Maritime Administration, and US Coast Guard rules. The calculations of design temperature have been performed, which are based on the available Russian climate database for several observation points. The calculations cover the period of 2013—2024 for winter season in the eastern part of Baltic Sea (Gulf of Finland) and Northern Sea Route area. The comparison is made between different probability theory methods and statistics applied to define the value of design air temperature. Normal law parameters have been calculated for all the selected observation points. Eventually, the design temperatures have been calculated which are based on probability theory methods.

Key words: ship hull; low ambient temperature; Baltic Sea; Northern Sea Route; ice class ships; MDAT; DAT.

For citation: Boyko M.S. Definition of design ambient temperature for the purpose of material selection for ship hull based on normative documents. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 51 — 64. EDN TWDHWW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании конструкций морских транспортных судов применяют требования нормативных документов по выбору материалов корпусных конструкций. Для конструкций, подверженных длительному воздействию низких температур, выбор стали производится исходя из ответственности конструкции, фактически принятой толщины конструктивных элементов и расчетной температуры конструкций. Расчетная температура конструкции, в свою очередь, определяется по специальным методикам, описание которых приводится в нормативных документах, и зависит от расчетной температуры окружающего воздуха.

Расчетная температура окружающего воздуха является одним из основных параметров, обеспечивающих безопасность эксплуатации судна. Величина данной температуры определяется на ранних стадиях проектирования, как правило, указывается в техническом задании на разработку проекта судна, в судовой спецификации. Данный параметр во многом определяет объем требований, которые предъявляются к материалу конструкций, и стоимость материалов. Важность рассматриваемого параметра для проектирования судна и развития требований нормативных документов определяет актуальность проведения комплексных исследований применяемых методик расчета, регулярного выполнения сопоставительных расчетов и совершенствования требований классификационных обществ.

Объектом исследования в статье являются конструкции морских транспортных судов, подверженные длительному воздействию низких температур окружающего воздуха. Предметом исследования являются методы определения расчетной температуры окружающего воздуха при выборе стали для корпусных конструкций.

Рассмотрены условия эксплуатации судна в восточной части Балтийского моря (Финский залив) и на трассах Северного морского пути (СМП) в зимний период.

В статье приведен обзор требований нормативных документов, а также обзор научных публикаций по рассматриваемой тематике. Выполнены расчеты температуры окружающего воздуха с применением требований нормативных документов и на основе открытой базы данных измерений температуры за период 2013 — 2024 гг. Проведено сопоставление значений расчетной температуры, полученных по разным нормативным документам.

В статье также приведены результаты применения методов теории вероятностей и математической статистики для определения тех значений расчетной температуры, которые предусмотрены действующими нормативными документами.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Существующие методы определения расчетной температуры окружающего воздуха, которая используется при выборе стали для корпусных конструкций, можно разделить на следующие типы:

- 1) методы, основанные на анализе данных измерений температуры воздуха в районе эксплуатации;
- 2) методы, которые предполагают использование однозначно зафиксированных в нормативном документе максимальных значений температуры в зависимости от ледового класса судна;
- 3) методы, которые предполагают использование однозначно зафиксированного в нормативном документе значения температуры в районе эксплуатации.

Перечисленные методы описаны в отраслевых нормативных документах, которые можно условно разделить на следующие группы:

- 1) требования классификационных обществ;
- 2) требования морских администраций (МА).

Рассмотрим некоторые характерные примеры требований классификационных обществ к определению температуры окружающего воздуха.

В соответствии с Правилами классификации и постройки морских судов [1] Российского морского регистра судоходства (РС) при определении расчетной температуры корпусных конструкций вводится понятие минимальной расчетной температуры окружающего воздуха T_A . В качестве величины T_A принимается минимальная среднесуточная температура воздуха, отмеченная за пятилетний период эксплуатации в наиболее неблагоприятных по условиям охлаждения акваториях.

Кроме указанного выше метода, в Правилах [1] также зафиксированы максимально допустимые значения температуры T_A для судов с ледовым классом РС:

- $T_A \geq -40$ °C для ледоколов ледовых классов Icebreaker9, Icebreaker8, Icebreaker7 и судов ледовых классов Arc9, Arc8, Arc7, Arc6, Arc5;
- $T_A \geq -30$ °C для ледоколов ледового класса Icebreaker6 и судов ледового класса Arc4;
- $T_A \geq -10$ °C для судов ледовых классов Ice3, Ice2 и Ice1.

Требования Правил [1] допускают также выбор материалов корпусных конструкций в соответствии с Унифицированным требованием S6 Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) [2]. В Унифицированном требовании [2] вводится понятие осредненного значения средней температуры суточного температурного диапазона за каждые сутки года. Осредненное значение определяется в каждые сутки года по массиву значений в течение как минимум 10 лет. Данный параметр обозначается MDAT (Mean Daily Average Temperature). В качестве расчетного значения температуры, на основе которого выбирается сталь для конструкций, должно приниматься минимальное значение среди всех значений MDAT в течение рассматриваемого периода эксплуатации, которое обозначается LMDAT (Lowest Mean Daily Average Temperature).

Кроме MDAT, в документе вводится понятие осредненного значения нижней температуры суточного температурного диапазона за каждые сутки года. Осредненное значение определяется в каждые сутки года по массиву значений в течение как минимум 10 лет. Данный параметр обозначается MDLT (Mean Daily Low Temperature). Минимальное значение MDLT в течение рассматриваемого периода эксплуатации обозначается LMDLT (Lowest Mean Daily Low Temperature). Значение LMDLT используется для определения полярной рабочей температуры (ПРТ) в соответствии с Международным кодексом для судов, эксплуатирующихся в полярных водах. Величину ПРТ следует принимать по меньшей мере на 10 °C ниже LMDLT, как указано в документе РС «Руководство по применению положений Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярного кодекса)» [3].

Особо следует рассмотреть требования к конструкциям судов, перевозящих сжиженный природный газ (СПГ) наливом. Для судов данного типа характерно воздействие низкой температуры на конструкции не только со стороны окружающего воздуха, но и со стороны перевозимого груза. Такие суда должны удовлетворять требованиям Международного кодекса постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом [4] (далее — Кодекс МКГ). Требования Кодекса МКГ полностью учтены в Правилах классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом [5].

Правила [5], в полном соответствии с Кодексом МКГ, требуют, чтобы при определении температуры корпусных конструкций в общем случае температура окружающего воздуха принималась равной 5 °C. Однако приводится дополнительное условие: более низкие значения температуры допускаются для судов, эксплуатирующихся в районах, где в течение зимних месяцев могут наблюдаться более низкие температуры. Для ледоколов и судов ледовых классов температура окружающей среды в любом случае не должна приниматься выше значения T_A .

Рассмотрим некоторые характерные примеры требований морских администраций к определению температуры окружающего воздуха.

Применительно к региону Балтийского моря следует рассмотреть в качестве примера требования Финско-шведской морской администрации, которые применяются к Балтийским ледовым классам. Согласно Руководству по применению требований Финско-шведской морской администрации [6], температура воздуха в северной части Балтийского моря в основном в течение зимнего периода опускается ниже 0°C и периодически может опускаться до температуры -30°C . Указано, что в отдельные периоды времени могут наблюдаться значения температуры до -40°C . В качестве значения температуры окружающего воздуха, на которое следует ориентироваться при проектировании судна, Руководство фиксирует значение -30°C для всех Балтийских ледовых классов.

Безопасность судоходства в Балтийском море была предметом пристального внимания государств региона при разработке требований Хельсинской конвенции [7] по защите морской среды Балтийского моря. В документе Рекомендация 25/7 [8], дополняющем требования Хельсинской конвенции, указано, что судно должно быть способно безопасно эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха до -30°C , что должно учитываться при выборе материалов корпусных конструкций.

Еще одним примером требований МА являются требования Береговой охраны США [9], широко применяющиеся при проектировании и постройке современных судов для транспортировки СПГ. Нормативные документы Береговой охраны применяются для судов-газовозов, заходящих в территориальные воды США для выполнения грузовых операций. Расчетная температура воздуха для выбора материалов корпуса должна приниматься равной -18°C , а для судов, входящих в территориальные воды Аляски, должна приниматься равной -29°C . Данное требование должно применяться при выборе материалов конструкций, которые являются смежными с системой хранения СПГ, оборудованной вторичным барьером. Для систем хранения иной конфигурации Береговая охрана США ссылается только на необходимость применения требований признанного классификационного общества.

Вопросы определения температуры окружающего воздуха при проектировании и эксплуатации судов обсуждаются в научных публикациях. Подробное исследование методов определения расчетной температуры для судов и плавучих сооружений в районе СМП выполнено в работе R. Bridges et al. [11]. Авторами использована база данных температур, ограниченная 2010 г., однако учитывалась история наблюдений примерно с середины XX века. Применительно к судам в статье выполнены расчеты температуры только в соответствии с Унифицированным требованием S6. Получены следующие значения для района СМП: LMDAT = $-34,5^{\circ}\text{C}$ и LMDLT = $-37,9^{\circ}\text{C}$ в районе мыса Терпай-Тумса.

Также в статье [11] проведено сопоставление существующих требований нормативных документов к выбору категории стали для группы связей I. Более подробное сопоставление требований применительно ко всем группам связей выполнено в статье В.Ю. Филина и др. [12], где подтверждается достаточность требований РС к выбору категорий стали конструкций, эксплуатирующихся при низкой температуре окружающего воздуха.

Фундаментальные исследования процессов изменения температуры в регионе Арктики проводятся при участии специалистов Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. Так, в статье Т.К. Карандашевой и др. [13] рассмотрены тенденции повышения приземной температуры в районе Баренцева и Карского морей. Использовались данные по 31 метеостанции в рассматриваемом районе за период 1991 — 2020 гг., получены параметры, характеризующие скорость потепления в Арктике. В статье Г.В. Алексеева и Н.Е. Харланенковой [14] получены среднесезонные значения температуры на береговых и островных метеостанциях в Арктике, получена корреляция между температурой воздуха и изменениями ледового покрова, также сделан вывод о тенденциях к потеплению.

В статье H. Sulistiyono et al. [15] вопрос определения расчетной температуры рассмотрен в контексте возможности применения риск-ориентированных методов обеспечения безопасности эксплуатации судов в Арктике, с акцентом на задачу «винтеризации». Обозначено, что применение требований нормативных документов позволяет получить только абсолютное значение расчетной температуры, однако не позволяет получить частоту ее возникновения и продолжительность негативного воздействия на судно. Предложен метод определения расчетной температуры окружающего воздуха, который позволяет учитывать указанные факторы.

В статье Y. Xiu et al. [16] приведены расчеты температуры окружающего воздуха в Арктике на основе Унифицированного требования МАКО S6, однако ставится под сомнение возможность использования измерений на береговых метеостанциях для определения температуры в море. Поэтому для расчетов авторами предложено использовать математическую модель реанализа MERRA-2. Сделан вывод о необходимости дальнейшего изучения вопроса определения расчетной температуры окружающего воздуха, необходимого для выбора материалов корпуса судов и плавучих сооружений в Арктике.

Рассмотрим также ряд публикаций, посвященных определению температуры окружающего воздуха в регионе Балтийского моря.

Результаты фундаментальных исследований изменения климатических параметров представлены, например, в статьях А. Rutgersson et al. [17], И.А. Захарчука и др. [18]. На основе данных долговременных измерений температуры воздуха сделан вывод о наблюдаемых в регионе процессах потепления, получены численные оценки скорости потепления в различных районах. В статье Ж.Ш. Стонт и Т.В. Букановой [19] выполнен анализ изменения среднемесячной температуры воздуха в юго-восточной части Балтийского моря в период 2004 — 2017 гг., при этом использовались данные метеостанции, размещенной на морской стационарной платформе, удаленной от береговой линии.

В статье К. Tikka et al. [20] проведены параллели между особенностями эксплуатации нефтеналивных судов в условиях Арктики и в условиях Балтийского моря в зимний период, подчеркивается необходимость учета низкой температуры окружающего воздуха. Приведены краткие результаты сопоставления требований нормативных документов, применимых для условий Арктики и условий Балтийского моря в зимний период.

Учитывая вышеизложенное, в рамках настоящего исследования выполнены расчеты температуры окружающего воздуха в соответствии с требованиями Правил классификации и постройки морских судов РС [1] и Унифицированным требованием МАКО S6 [2]. Искомыми являются следующие значения температуры: T_A , LMDAT, LMDLT. Рассматриваются два района эксплуатации: восточная часть Балтийского моря (Финский залив) и район СМП. В качестве исходных данных для расчетов использовалась открытая база данных температуры на сайте www.rp5.ru. В рассмотренных районах эксплуатации выделены несколько «точек наблюдения» — географических объектов, для каждого из которых на сайте определена метеостанция и доступен архив замеров температуры окружающего воздуха в течение необходимого для расчета периода: с 2013 г. по 2024 г.

В статье приведены как окончательные результаты расчета параметров T_A , LMDAT, LMDLT для точек наблюдения, так и промежуточные результаты. Для каждых суток в течение рассматриваемого зимнего периода получены значения T_A^D — минимальной среднесуточной температуры воздуха, отмеченной за пятилетний период эксплуатации на каждые сутки зимы, а также значения MDAT и MDLT. Получены значения DLT (Daily Low Temperature), то есть минимальные зафиксированные значения температуры в течение каждых суток за все время наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для восточной части Балтийского моря (Финского залива) выбраны следующие точки наблюдения: Усть-Нарва, Озерки, Выборг, Котка, Руссаро, Турку. Положение точек наблюдения на географической карте показано на рис. 1, информация о соответствующих метеостанциях приведена в табл. 1. На рис. 2 и 3 приведены примеры распределения значений DLT, MDAT, MDLT и TDA для точек Усть-Нарва и Выборг. В табл. 2 приведены результаты обработки полученных данных, приведены окончательные результаты расчета для всех точек наблюдения.

Таблица 1

Индекс метеорологических станций для точек наблюдения в восточной части Балтийского моря	
Наименование точки наблюдения	Индекс метеорологической станции
Усть-Нарва	BMO 26058
Озерки	BMO 22897
Выборг	BMO 22892
Котка	BMO 02967
Руссаро	BMO 02982
Турку	METAR EFTU

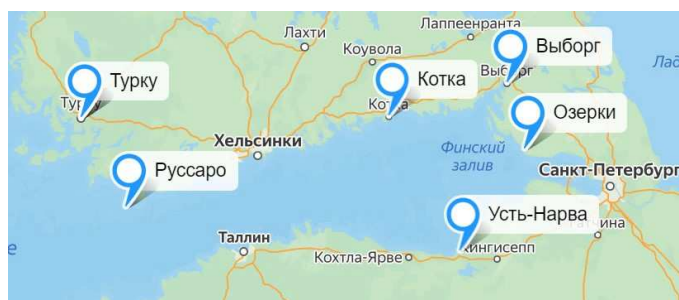


Рис. 1. Точки наблюдения в восточной части Балтийского моря (Финский залив)

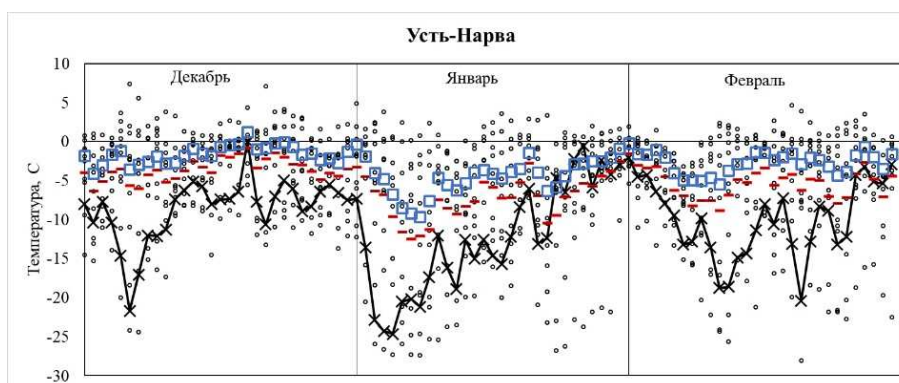


Рис. 2. Температура в точке наблюдения Усть-Нарва:

● — DLT; — MDLT; ■ — MDAT; × — T_A^D

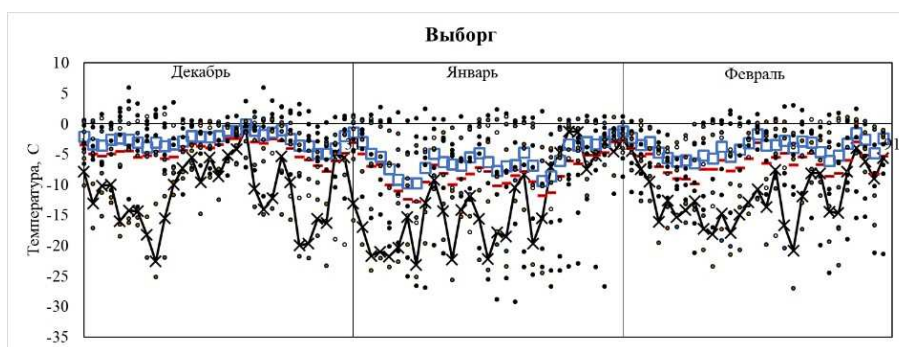


Рис. 3. Температура в точке наблюдения Выборг:

● — DLT; — MDLT; ■ — MDAT; × — T_A^D

Таблица 2

Результаты расчета температуры для точек наблюдения в восточной части Балтийского моря

Точка наблюдения	Обозначение температуры	Минимальное за месяц			Минимальное за сезон	
		Декабрь	Январь	Февраль		
Усть-Нарва	DLT	–24,4	–27,4	–28,1	LDLT	–28,1
	MDAT	–4,1	–9,6	–5,4	LMDAT	–9,6
	MDLT	–6,3	–12,4	–8,7	LMDLT	–12,4
	T_A^D	–21,7	–24,6	–20,3	T_A	–24,6
Озерки	DLT	–21,7	–27,2	–25,5	LDLT	–27,2
	MDAT	–3,7	–9,5	–6,3	LMDAT	–9,5
	MDLT	–6,0	–11,9	–9,2	LMDLT	–11,9
	T_A^D	–17,8	–22,1	–18,3	T_A	–22,1
Выборг	DLT	–25,1	–29,2	–27,0	LDLT	–29,2
	MDAT	–4,8	–9,7	–6,4	LMDAT	–9,7
	MDLT	–7,7	–12,7	–9,8	LMDLT	–12,7
	T_A^D	–22,5	–23,1	–20,8	T_A	–23,1
Котка	DLT	–16,4	–23,7	–21,5	LDLT	–23,7
	MDAT	–1,5	–6,2	–4,5	LMDAT	–6,2
	MDLT	–3,7	–7,7	–6,8	LMDLT	–7,7
	T_A^D	–13,0	–16,4	–16,4	T_A	–16,4
Руссаро	DLT	–13,0	–18,5	–17,2	LDLT	–18,5
	MDAT	–0,3	–5,2	–2,5	LMDAT	–5,2
	MDLT	–1,9	–7,3	–4,6	LMDLT	–7,3
	T_A^D	–10,6	–13,9	–13,1	T_A	–13,9
Турку	DLT	–22,0	–27,0	–22,0	LDLT	–27,0
	MDAT	–3,1	–8,6	–5,0	LMDAT	–8,6
	MDLT	–6,0	–12,3	–9,0	LMDLT	–12,3
	T_A^D	–19,9	–21,3	–16,0	T_A	–21,3

По результатам выполненного исследования можно сделать нижеследующие выводы.

Во всех рассмотренных точках наблюдения температура T_A оказалась ниже, чем температуры LMDAT, абсолютная разница в значениях составляет от 10 °C до 15 °C, в среднем 12,8 °C.

Во всех рассмотренных точках наблюдения значение температуры T_A ближе к значению расчетной температуры воздуха, которая регламентируется нормативными документами Финско-шведской МА [6], чем к LMDAT. При этом наиболее серьезными по условиям охлаждения оказываются районы точек наблюдения Усть-Нарва и Выборг со значениями $T_A = -24,6$ °C и $T_A = -23,1$ °C соответственно. В обоих случаях значение температуры оказалось больше, чем указанное в требованиях [6] значение -30 °C, что характеризует в целом консервативную оценку температуры в требованиях [6] и может быть объяснено распространением требований также на северную часть Балтийского моря.

Применение значений T_A , указанных выше, для судов для транспортировки СПГ, предназначенных для эксплуатации в восточной части Балтийского моря, позволит автоматически выполнить требования Береговой охраны США по расчетной температуре окружающего воздуха, за исключением территориальных вод Аляски.

Для района СМП определены следующие точки наблюдения: Териберка, Тамбей, Диксон, мыс Челюскин, Хатанга, Тикси, Певек. Положение точек наблюдения на географической карте показано на рис. 4, информация о соответствующих метеорологических станциях приведена в табл. 3. На рис. 5 — 7 приведены примеры распределения значений DLT, MDAT, MDLT и T_A^D для нескольких точек: Диксон, Хатанга, Тикси. В табл. 4 приведены результаты обработки полученных данных и окончательные результаты расчета.

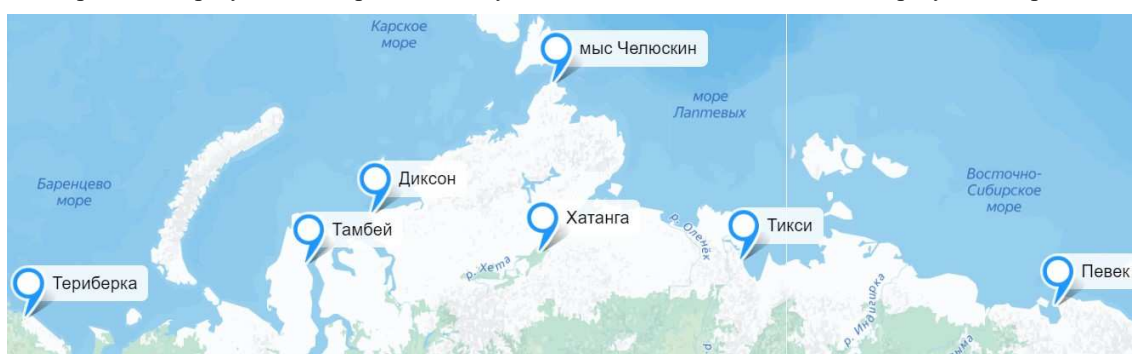


Рис. 4. Точки наблюдения на СМП

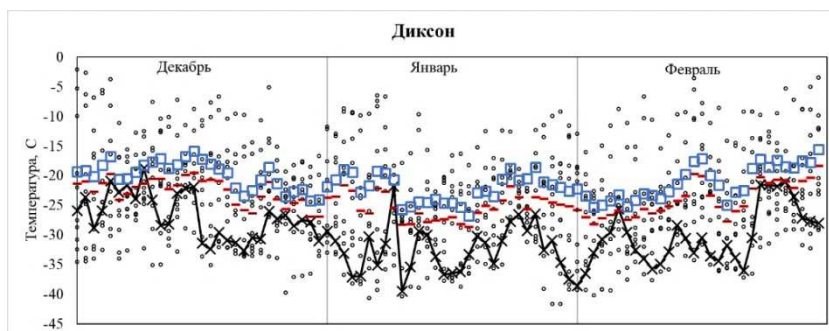


Рис. 5. Температура в точке наблюдения Диксон:

● — DLT; — MDLT; ■ — MDAT; × — T_A^D

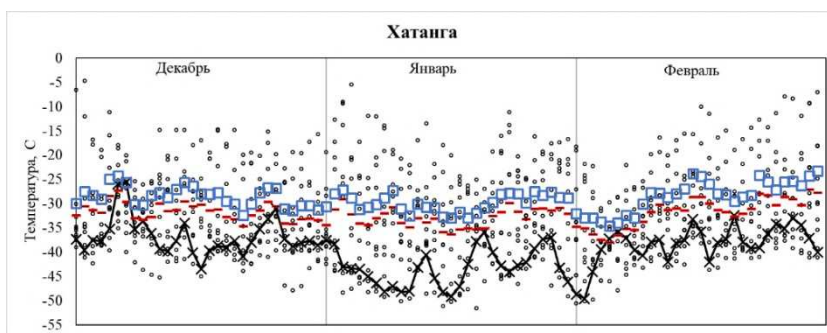


Рис. 6. Температура в точке наблюдения Хатанга:

● — DLT; — MDLT; ■ — MDAT; × — T_A^D

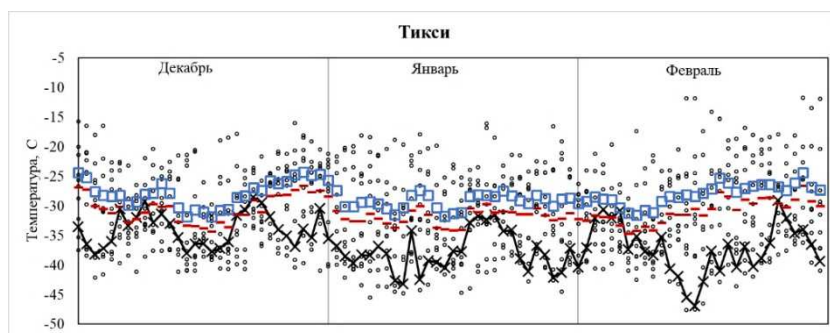


Рис. 7. Температура в точке наблюдения Тикси:

○ — DLT; — MDLT; □ — MDAT; × — T_A^D

Таблица 3

Индекс метеорологических станций для точек наблюдения в восточной части Балтийского моря

Наименование точки наблюдения	Индекс метеорологической станции
Териберка	BMO 22028
Тамбей	BMO 20864
Диксон	BMO 20674
мыс Челюскин	BMO 20292
Хатанга	BMO 20891
Тикси	BMO 21824
Певек	BMO 25051

Таблица 4

Результаты расчета температуры для точек наблюдения в районе СМП

Точка наблюдения	Обозначение температуры	Минимальное за месяц			Минимальное за сезон	
		Декабрь	Январь	Февраль		
Териберка	DLT	−17,7	−23,4	−25,7	LDLT	−25,7
	MDAT	−7,3	−9,2	−9,9	LMDAT	−9,9
	MDLT	−9,0	−12,2	−12,1	LMDLT	−12,2
	T_A^D	−16,1	−19,0	−23,5	T_A	−23,5
Тамбей	DLT	−35,9	−40,0	−39,3	LDLT	−40,0
	MDAT	−22,9	−27,8	−25,2	LMDAT	−27,8
	MDLT	−26,9	−31,5	−29,6	LMDLT	−31,5
	T_A^D	−35,2	−37,9	−36,6	T_A	−37,9
Диксон	DLT	−39,7	−41,6	−40,2	LDLT	−41,6
	MDAT	−24,3	−26,8	−25,3	LMDAT	−26,8
	MDLT	−26,9	−28,6	−28,1	LMDLT	−28,6
	T_A^D	−32,7	−39,5	−36,1	T_A	−39,5
мыс Челюскин	DLT	−35,6	−39,5	−39,0	LDLT	−39,5
	MDAT	−24,5	−28,7	−25,9	LMDAT	−28,7
	MDLT	−27,3	−31,3	−28,9	LMDLT	−31,3
	T_A^D	−32,9	−37,6	−35,7	T_A	−37,6
Хатанга	DLT	−47,9	−51,5	−49,8	LDLT	−51,5
	MDAT	−32,4	−33,0	−34,7	LMDAT	−34,7
	MDLT	−34,6	−36,3	−38,0	LMDLT	−38,0
	T_A^D	−43,5	−49,6	−44,1	T_A	−49,6
Тикси	DLT	−42,1	−45,5	−47,6	LDLT	−47,6
	MDAT	−31,8	−31,7	−31,6	LMDAT	−31,8
	MDLT	−34,3	−34,2	−34,7	LMDLT	−34,7
	T_A^D	−38,2	−43,2	−46,9	T_A	−46,9
Певек	DLT	−39,5	−42,0	−40,6	LDLT	−42,0
	MDAT	−27,4	−29,7	−27,8	LMDAT	−29,7
	MDLT	−29,9	−32,2	−30,5	LMDLT	−32,2
	T_A^D	−35,9	−37,3	−39,0	T_A	−39,0

По результатам проведенного исследования можно сделать нижеследующие выводы.

Во всех рассмотренных точках наблюдения температура T_A оказалась ниже, чем температуры LMDAT, абсолютная разница в значениях составляет от 9 °C до 15 °C, в среднем 12,1 °C.

Точки наблюдения на СМП целесообразно разделить на группы:

- Западный сектор (Териберка, Тамбей, Диксон, мыс Челюскин);
- Восточный сектор (Тикси, Певек);
- устье северных рек (Хатанга).

Для Западного сектора наиболее суровым по условиям охлаждения оказался район точки наблюдения Диксон со значением расчетной температуры воздуха $T_A = -39,5$ °C.

Для Восточного сектора наиболее суровым по условиям охлаждения оказался район точки наблюдения Тикси со значением расчетной температуры воздуха $T_A = -46,9$ °C.

Среди всех рассмотренных точек наблюдения на СМП наиболее суровой по условиям охлаждения оказалась точка наблюдения Хатанга со значением расчетной температуры воздуха $T_A = -49,6$ °C.

Принимая во внимание, что ПРТ в нормативных документах [3] определяется в зависимости от значения LMDLT, представляет интерес соотношение значений LMDLT и T_A для районов СМП. Полученные результаты показывают, что для всех точек наблюдения абсолютное значение разности температур находится в пределах от 6 °C до 12 °C, в среднем 9,5 °C. Таким образом, результаты расчетов показали, что значение ПРТ для рассмотренных районов в среднем находится близко к значению T_A .

Для содействия процессу проектирования судов и развития нормативных документов целесообразно получить устойчивые значения расчетной температуры, которые в меньшей степени зависели бы от истории предыдущих измерений. Устойчивые значения температуры могут быть получены, если искомое значение температуры в районе эксплуатации рассматривать как случайную величину. Тогда характерные устойчивые значения можно получить с применением аппарата теории вероятностей и математической статистики. В рамках настоящего исследования рассмотрим температуру MDLT, T_A^D и MDAT в течение трех зимних месяцев как стационарную случайную величину. Примем гипотезу о том, что рассматриваемая величина во всех трех случаях распределяется по нормальному закону, при котором плотность вероятности $p(t)$ выражается в общем виде следующим образом:

$$p(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где t — случайная величина температуры;
 σ — стандартное отклонение случайной величины;
 μ — оценка математического ожидания случайной величины.

Приняв гипотезу о нормальном распределении температуры, можно воспользоваться известным свойством закона о том, что 68 % значений рассматриваемой случайной величины попадают в интервал $\mu \pm \sigma$, 96 % значений попадают в интервал $\mu \pm 2\sigma$, а интервал $\mu \pm 2\sigma$ практически определяет наибольшее значение рассматриваемой величины.

Следует рассмотреть вопрос о том, какой из указанных выше интервалов следует использовать для оценки максимального значения температуры окружающего воздуха. В рамках настоящего исследования будем ориентироваться на методы, которые использовались специалистами ИМО при разработке Полярного кодекса [10], то есть расчетное значение оценивать по интервалу $\mu \pm 2\sigma$.

Для проверки справедливости дальнейшего применения гипотезы о нормальном распределении значений температуры были построены графики нормальной вероятности для рассмотренных точек наблюдения. На рис. 8 — 12 приведены примеры графика нормальной вероятности для нескольких точек. Графики нормальной вероятности для каждой искомой температуры получены на базе 90 значений температуры. Вывод о справедливости нормального закона распределения в данном случае выполняется на основе качественной оценки: следует оценить, насколько хорошо точки на графике располагаются вдоль прямой линии.

По результатам качественной оценки нельзя сделать однозначный вывод о справедливости применения нормального закона распределения, так как в отдельных случаях наблюдаются отклонения от прямой. Однако в рамках настоящей статьи для инженерной оценки значений применяется допущение о нормальном распределении, величина погрешности является предметом дальнейшего исследования. Данный подход характеризует полученное решение только как первое приближение.

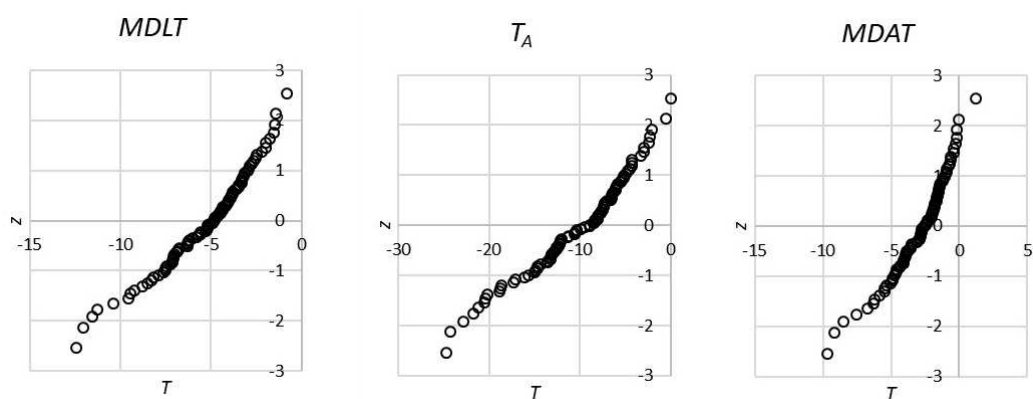


Рис. 8. График нормальной вероятности для точки наблюдения Усть-Нарва

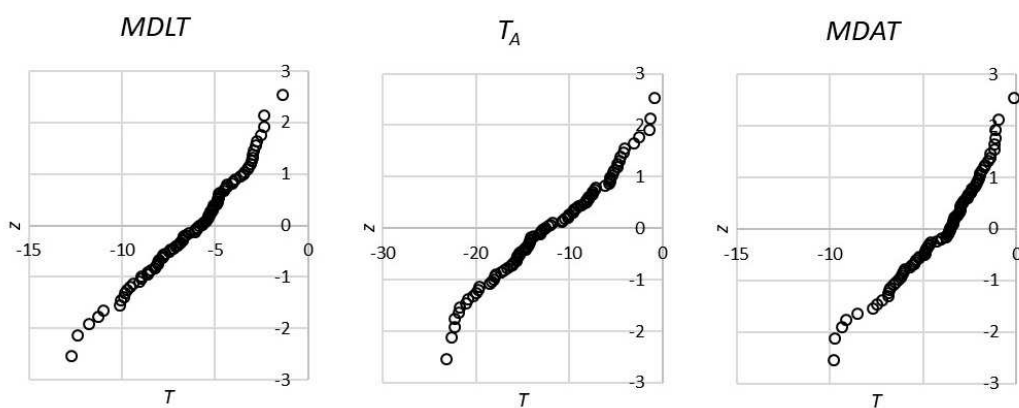


Рис. 9. График нормальной вероятности для точки наблюдения Выборг

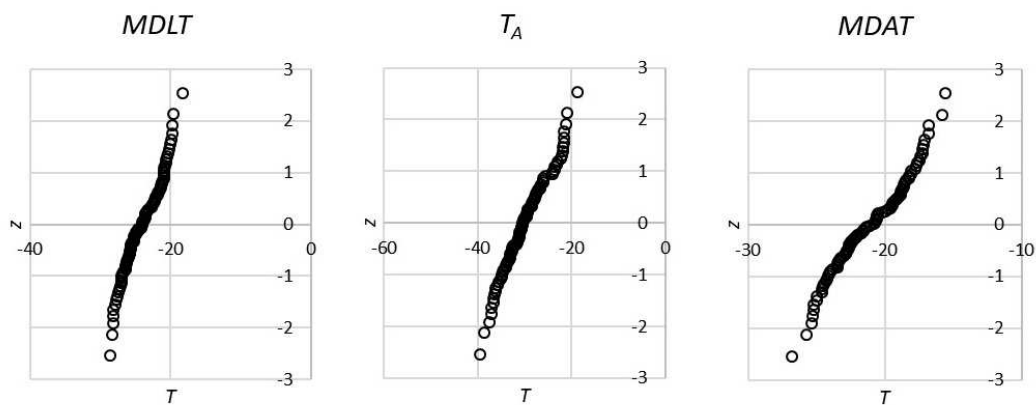


Рис. 10. График нормальной вероятности для точки наблюдения Диксон

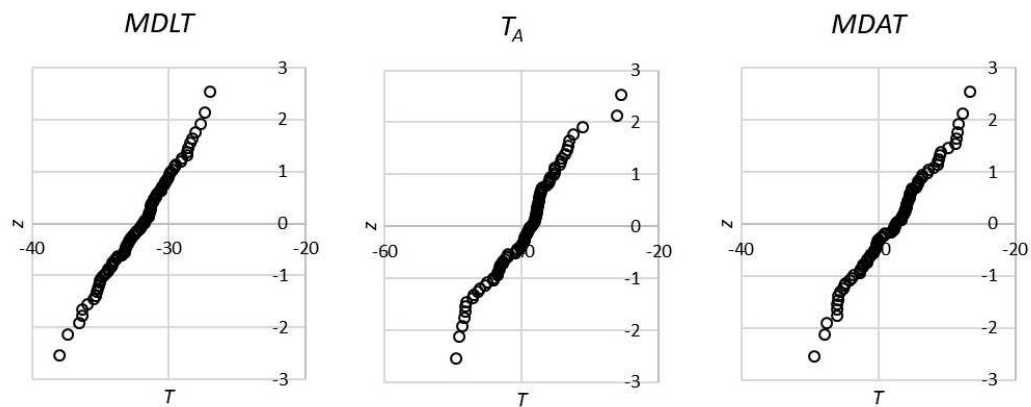


Рис. 11. График нормальной вероятности для точки наблюдения Хатанга

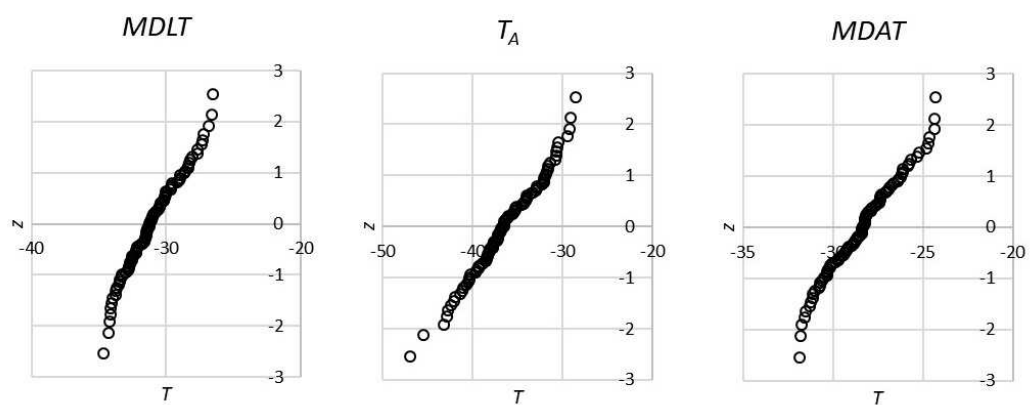


Рис. 12. Параметры нормального закона для точки наблюдения Тикси

Таблица 5

Оценка параметров нормального закона для точек в районе Балтийского моря

Точка наблюдения	Параметры закона					
	MDLT		T_A		MDAT	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Усть-Нарва	-5,3	2,5	-10,3	5,6	-2,9	2,1
Озерки	-5,5	2,6	-10,9	5,6	-3,5	2,1
Выборг	-1,8	1,8	-5,8	3,9	-0,1	1,6
Котка	-3,5	1,9	-7,3	4,6	-1,8	1,8
Турку	-5,1	2,3	-9,7	5,4	-2,2	1,9
Руссаро	-1,8	1,8	-5,8	3,9	-0,1	1,6

Таблица 6

Оценка параметров нормального закона для точек в районе СМП

Точка наблюдения	Параметры закона					
	MDLT		T_A		MDAT	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Териберка	-8,0	1,9	-12,3	3,9	-6,0	1,7
Тамбей	-22,4	3,5	-28,5	6,1	-18,9	3,8
Диксон	-23,9	2,6	-29,8	4,8	-21,1	2,7
мыс Челюскин	-25,5	2,2	-29,6	3,8	-22,9	2,2
Хатанга	-32,1	2,4	-39,4	4,7	-28,9	2,6
Тикси	-31,0	2,0	-36,3	3,9	-28,3	1,9
Певек	-26,2	3,4	-31,6	4,1	-23,4	3,6

Полученные значения математического ожидания μ и стандартного отклонения σ для точек наблюдения в районе Балтийского моря приведены в табл. 5, а для точек наблюдения в районе СМП — в табл. 6.

В табл. 7 приведены оценки минимальных значений температуры для точек наблюдения в Балтийском море, а в табл. 8 — для точек наблюдения на СМП, полученные с применением вероятностных методов.

Таблица 7

**Оценка минимальных значений температуры для точек наблюдения
в восточной части Балтийского моря на основе вероятностных методов**

Точка наблюдения	Оценка минимальных значений								
	$\mu - \sigma$			$\mu - 2\sigma$			$\mu - 3\sigma$		
	LMDLT	T_A	LMDAT	LMDLT	T_A	LMDAT	LMDLT	T_A	LMDAT
Усть-Нарва	-7,8	-15,9	-4,9	-10,3	-21,5	-7,0	-12,9	-27,2	-9,1
Озерки	-8,0	-16,5	-5,6	-10,6	-22,5	-7,8	-13,2	-27,8	-9,9
Выборг	-8,7	-17,8	-6,2	-11,2	-23,5	-8,4	-13,8	-29,3	-10,6
Котка	-5,5	-11,9	-3,6	-7,4	-16,4	-5,3	-9,4	-21,0	-7,1
Турку	-7,4	-15,0	-4,1	-9,7	-20,4	-6,0	-12,1	-25,8	-8,0
Руссаро	-3,5	-9,6	1,6	-5,3	-13,5	-3,2	-7,1	-17,4	-4,9

Таблица 8

**Оценка минимальных значений температуры для точек наблюдения
в районе СМП на основе вероятностных методов**

Точка наблюдения	Оценка минимальных значений								
	$\mu - \sigma$			$\mu - 2\sigma$			$\mu - 3\sigma$		
	LMDLT	T_A	LMDAT	LMDLT	T_A	LMDAT	LMDLT	T_A	LMDAT
Териберка	-9,9	-16,1	-7,6	-11,8	-20,0	-9,4	-13,7	-23,9	-11,2
Тамбей	-25,9	-34,6	-22,7	-29,5	-40,7	-26,4	-33,1	-46,9	-30,2
Диксон	-26,6	-34,6	-23,8	-29,2	-39,3	-26,5	-31,8	-44,1	-29,2
мыс Челюскин	-27,7	-33,4	-25,1	-29,9	-37,2	-27,3	-32,0	-40,9	-29,5
Хатанга	-34,5	-44,1	-31,5	-36,9	-48,9	-34,1	-39,2	-53,6	-36,7
Тикси	-33,0	-40,2	-30,3	-35,0	-44,0	-32,2	-37,1	-47,9	-34,2
Певек	-29,6	-35,6	-26,9	-33,0	-39,7	-30,5	-36,5	-43,8	-34,1

По результатам проведенного исследования можно сделать нижеследующие выводы.

Для наиболее охлаждаемой точки наблюдения в восточной части Балтийского моря — точка наблюдения Выборг — получено значение $T_A = -23,5$ °С. Для Западного сектора СМП в наиболее охлаждаемой точке наблюдения — Тамбей — получено значение $T_A = -40,7$ °С. Для Восточного сектора СМП в наиболее охлаждаемой точке наблюдения — Тикси — получено значение $T_A = -44,0$ °С. Для точки наблюдения Хатанга — точка наблюдения в устье северных рек — получено значение $T_A = -48,9$ °С.

Следует также, что рассмотренный метод расчета позволяет сохранить соотношения значений T_A , LMDAT, LMDAT и ПРТ, полученные ранее по результатам анализа климатической базы данных при строгом применении требований нормативных документов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведен анализ требований классификационных обществ и МА по выбору расчетной температуры окружающего воздуха, которую необходимо использовать при выборе стали для корпусных конструкций. Рассмотрены методы, основанные на анализе данных измерений температуры в рассматриваемом районе эксплуатации; минимальные требования в зависимости от ледового класса судна; а также требования МА, которые конкретизируют значение расчетной температуры воздуха. Выполнен обзор публикаций по теме исследования.

Проведены расчеты температуры окружающего воздуха в соответствии с требованиями РС и МАКО. Расчеты проведены на основе открытой базы климатических данных за период с 2013 г. по 2024 г. Рассмотрены условия эксплуатации в зимний период в двух акваториях: восточная часть Балтийского моря

(Финский залив) и Северный морской путь. Полученные значения температуры сопоставлены между собой, а также с применимыми требованиями МА.

Приведены результаты применения методов теории вероятностей и математической статистики для определения расчетной температуры окружающего воздуха в рассматриваемых акваториях. Принимается гипотеза о нормальном распределении значения температуры, получены параметры нормального закона для всех рассмотренных точек наблюдения. На основе полученных параметров получены оценки расчетной температуры на основе вероятностных методов.

В рамках представленного исследования рассматривались только вопросы определения окружающего воздуха в районе конкретных географических объектов в зимний период. Поэтому в качестве дальнейших направлений исследования целесообразно в первую очередь расширить номенклатуру расчетов до всего календарного года, что позволит определять расчетную температуру в зависимости от сезона навигации. Также целесообразно дополнить результаты исследования анализом фактической интенсивности судоходства в рассматриваемых акваториях в зависимости от сезона навигации.

В направлении вероятностной оценки значений температуры в качестве дальнейших направлений исследования целесообразно рассмотреть задачу уточнения закона распределения расчетной температуры в зимний период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025. [Электронный ресурс] URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=A011D0A4-F22C-4505-A3C4-332156964EDF&f=2-020101-174-2> (дата обращения 06.03.2025).
2. UR S6 Use of Steel Grades for Various Hull Members — Ships of 90 m in Length and Above, Rev.9 Corr.2 Nov 2021 / International Association of Classification Societies. [Электронный ресурс] URL: <https://iacs.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/05/18114147/ur-s6rev9corr2.pdf> (дата обращения 23.11.2024).
3. Руководство по применению положений Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярного кодекса) / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2020. [Электронный ресурс] URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=735E29AC-610F-4D5C-9A50-7A70A9C2BE18&f=2-030101-031> (дата обращения 23.11.2024).
4. Resolution MSC.370(93). Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), 2014. [Электронный ресурс] URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370\(93\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370(93).pdf) (дата обращения 13.08.2023).
5. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом. Часть IV. Хранение груза / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024. [Электронный ресурс] URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=8E3390C1-F159-4EFE-B13E-8C6579548659&f=2-020101-176-4> (дата обращения 06.03.2025).
6. Guidelines for the Application of the 2017 Finnish-Swedish Ice Class Rules. TRAFI/708629/03.04.01/2018, 2019.
7. Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area, 2014. [Электронный ресурс] URL: https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/06/Helsinki-Convention_July-2014.pdf (дата обращения 23.11.2024).
8. Revised HELCOM Recommendation 25/7, 2016. Baltic Marine Environment Protection Commission. [Электронный ресурс] URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/06/Rec-25-7.pdf> (дата обращения 23.11.2024).
9. US Coast Guard. 46 CFR § 154.176 — Longitudinal contiguous hull structure. [Электронный ресурс] URL: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/46/154.176> (дата обращения 23.11.2024).
10. Development of a Mandatory Code for Ships Operating in Polar Waters. Statistical data on temperature in polar and sub-polar regions. SDC 1/ INF.12. International Maritime Organization, 2013.
11. Bridges R. A study on the specification of minimum design air temperature for ships and offshore structures / R. Bridges, K. Riska, L. Lu, M. du-Couedic-de-Kerant et al. // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 160. — P. 478 — 489.
12. Филин В.Ю. Обоснование требований МАКО и Регистра к выбору материалов корпусных конструкций, эксплуатируемых при низких климатических температурах. Часть 1. Сопротивление старту трещины / В.Ю. Филин, А.В. Ильин, А.В. Ларионов, Е.Д. Назарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 48 — 58. — EDN AJUOKJ.
13. Карандашева Т.К. Современные тенденции изменения приземной температуры воздуха в регионе Баренцева и Карского морей / Т.К. Карандашева, Б.В. Иванов, В.И. Демин, А.Д. Ревина и др. // Российская Арктика. — 2024. — Т. 6. № 3. — С. 55 — 64. — DOI: 10.24412/2658-4255-2024-3-55-64.
14. Алексеев Г.В. Связь между сокращением морских льдов и ростом температуры воздуха в Арктике / Г.В. Алексеев, Н.Е. Харланенкова // Лед и снег. — 2024. — №1. — С. 96 — 105. — DOI: 10.31857/S2076673424010077.
15. Sulistiyono H. Estimating design temperatures in Arctic environments: A new approach / H. Sulistiyono, L.M. Lye, F.I. Khan, M. Yang et al. // 2014 OCEANS St. John's. St. John's, NL Canada. — DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7002975.
16. Xiu Y. Estimating spatial distributions of design air temperatures for ships and offshore structures in the Arctic Ocean / Y. Xiu, Q. Wang, Z. Li, G. Li et al. // Polar Science. — 2022. — Vol. 34. — DOI: 10.1016/j.polar.2022.100875.
17. Rutgersson A. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years / A. Rutgersson, J. Jaagus, F. Schenk, M. Stendel // Climate Research. — 2014. — Vol. 61. — P. 177 — 190. — DOI: 10.3354/cr01244.
18. Захарчук Е.А. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата / Е.А. Захарчук, Е.Н. Литина, Ю.П. Клеванцов, В.Н. Сухачев и др. // Труды Государственного океанографического института. — 2017. — № 218. — С. 6 — 62. — EDN YLMAZW.

19. Stont Z.I. General features of air temperature over coastal waters of the south-eastern Baltic Sea for 2004 — 2017 / Z.I. Stont, T.V. Bukanova // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2019. — № 3. — DOI: 10.2205/2019ES000657.
20. Tikka K. Tanker design considerations for safety and environmental protection of Arctic waters: Learning from past experience / K. Tikka, K. Riska, S. Liu // *WMU Journal of Maritime Affairs*. — 2008. — № 7. — P. 189 — 204.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=622C3FCC-4B74-4CC3-A8DA-CEDA96F19F2D&f=2-020101-174-2> (accessed 06.03.2025).
2. UR S6 Use of Steel Grades for Various Hull Members — Ships of 90 m in Length and Above, Rev.9 Corr.2 Nov 2021. International Association of Classification Societies. URL: <https://iacc.s3.af-south-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/05/18114147/ur-s6rev9corr2.pdf> (accessed 23.11.2024).
3. Guidelines on Application of the International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code) / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2020. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=D06E341C-9467-4B4E-9CCD-CFD2464D91C9&f=2-030101-031> (accessed 23.11.2024).
4. Resolution MSC.370(93). Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), 2014. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370\(93\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370(93).pdf) (accessed 13.08.2024).
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, 2024. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=DF2953A4-CBA0-4DEF-BFBB-398204F28E49&f=2-020101-176-4> (accessed 06.03.2025).
6. Guidelines for the Application of the 2017 Finnish-Swedish Ice Class Rules. TRAFI/708629/03.04.01.01/2018, 2019.
7. Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area, 2014. URL: https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/06/Helsinki-Convention_July-2014.pdf (accessed 23.11.2024).
8. Revised HELCOM Recommendation 25/7, 2016. Baltic Marine Environment Protection Commission. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/06/Rec-25-7.pdf> (accessed on 23.11.2024).
9. US Coast Guard. 46 CFR § 154.176 — Longitudinal contiguous hull structure. URL: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/46/154.176> (accessed 23.11.2024).
10. Development of a Mandatory Code for Ships Operating in Polar Waters. Statistical data on temperature in polar and sub-polar regions. SDC 1/ INF.12. International Maritime Organization, 2013.
11. Bridges R., Riska K., Lu L., du-Couedic-de-Kerérant M. et al. A study on the specification of minimum design air temperature for ships and offshore structures. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 160. P. 478 — 489.
12. Filin V.Yu., Ilyin A.V., Larionov A.V., Nazarova E.D. Substantiation of IACS and RS requirements for the selection of hull materials for structures operated at low climatic temperatures. Part 1. Crack start resistance. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 48 — 58. (In Russ.)
13. Karandasheva T.K., Ivanov B.V., Demin V.I., Revina A.D. et al. Current trends in surface air temperature changes in the Barents and Kara Seas region. *Russian Arctic*. 2024. Vol. 6. No. 3. P. 55 — 64. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-3-55-64. (In Russ.)
14. Alekseev G.V., Kharlanenkova N.E. On a relation between shrinking of sea ice coverage and climate warming in the marine Arctic. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024. Vol. 64. No. 1. P. 96 — 105. DOI: 10.31857/S2076673424010077. (In Russ.)
15. Sulistiyono H., Lye L.M., Khan F.I., Yang M. et al. Estimating design temperatures in Arctic environments: A new approach. *2014 OCEANS St. John's*. St. John's, NL Canada. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7002975.
16. Xiu Y., Wang Q., Li Z., Li G. et al. Estimating spatial distributions of design air temperatures for ships and offshore structures in the Arctic Ocean. *Polar Science*. 2022. Vol. 34. DOI: 10.1016/j.polar.2022.100875.
17. Rutgeresson A., Jaagus J., Schenk F., Stendel M. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years. *Climate Research*. 2014. Vol. 61. P. 177 — 190. DOI: 10.3354/cr01244.
18. Zakharchuk E.A., Litina E.N., Klevantsov Y.P., Sukhachev V.P. et al. Nonstationarity of the hydrometeorological processes in the Baltic Sea at climate changing conditions. *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta [Transactions of the State Oceanography Institute]*. 2017. No. 218. P. 6 — 62. EDN YLMAZW. (In Russ.)
19. Stont Z.I., Bukanova T.V. General features of air temperature over coastal waters of the south-eastern Baltic Sea for 2004 — 2017. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. (3). DOI: 10.2205/2019ES000657.
20. Tikka K., Riska K., Liu S. Tanker design considerations for safety and environmental protection of Arctic waters: Learning from past experience. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2008. No. 7. P. 189 — 204.

УДК 620.17 + 539.421 + 004.942
EDN RLYVXW

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И ОБРАЗЦАХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Ю. Филин, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: ctod@crism.ru

А.В. Мизецкий, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: npk3@crism.ru

Д.Р. Бараков, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: npk3@crism.ru

Немаловажным аспектом защиты национальных интересов России в Арктике является использование судостроительных сталей, обеспечивающих отсутствие хрупких разрушений при низких температурах эксплуатации. Хладостойкость сталей проверяется с помощью специальных механических испытаний, требования к результатам которых должны иметь расчетное обоснование.

В статье рассмотрено моделирование конструкционных элементов из листовой стали и образцов методом конечных элементов (МКЭ) и представлено описание предлагаемых условий конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения. Локальные условия разрушения связывают событие хрупкого разрушения с достижением критического значения жесткости напряженного состояния, вязкого разрушения — с накопленной пластической деформацией отрыва и сдвига. Их совместное применение в расчетах позволяет моделировать вид излома и количественно оценивать соотношение различных параметров, например, в случае испытания падающим грузом — доли волокнистой составляющей и работы разрушения, а также оценивать трещиностойкость, необходимую для торможения трещины в типовом конструкционном элементе. Это позволяет перейти к обоснованию требований к результатам испытаний по определению температур вязко-хрупкого перехода.

Ключевые слова: судостроительные стали, хладостойкость, испытания падающим грузом, механика разрушения, моделирование методом конечных элементов.

Для цитирования: Филин В.Ю. Многофакторная модель распространения трещины в конструкционных моделях и образцах для расчетов методом конечных элементов / В.Ю. Филин, А.В. Мизецкий, Д.Р. Бараков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 65 — 73. — EDN RLYVXW.

MULTIPARAMETRICAL MODEL OF CRACK PROPAGATION IN STRUCTURAL ELEMENTS AND SPECIMENS FOR FEM CALCULATIONS

V.Yu. Filin, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: ctod@rambler.ru

A.V. Mizetsky, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

D.R. Barakov, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

An important aspect of Russian national interest protection in Arctic is the application of shipbuilding steels ensuring no cases of brittle fracture at low service temperatures. Cold resistance of steels is verified by special mechanical tests, their required results should have a calculated substantiation.

This paper considers finite element method (FEM) simulation of structural members made of steel plate and specimens and gives a description of suggested conditions of concurring brittle and ductile fracture. Local fracture conditions connect a brittle fracture event with an attainment of a critical first principal stress to stress intensity ratio while a ductile one with an accumulated plastic tear and shear strain. Their simultaneous application allows the simulation of fracture appearance and quantitatively assessment of the interrelation of different parameters, e.g. in case of drop weight tear test, the shear portion and impact energy, as well as the fracture toughness needed to arrest a crack in a typical structural element. The above technique gives an opportunity of the required ductile-to-brittle transition temperatures substantiation.

Keywords: shipbuilding steels, cold resistance, drop weight tear test, fracture mechanics, simulation by finite element method.

For citation: Filin V.Yu., Mizetsky A.V., Barakov D.R. Multiparametrical model of crack propagation in structural elements and specimens for FEM calculations. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 65 — 73. EDN RLYVXW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие арктических территорий имеет стратегическое значение: значительная часть запасов энергоресурсов России находится на шельфовых месторождениях. Защита национальных интересов России в Арктике приобретает особое значение и требует развития морской, прибрежной и материковой инфраструктуры. Строятся новые суда для Северного морского пути.

Крупногабаритные сварные конструкции Арктики изготавливают из низколегированных сталей, обеспечивающих прочность при умеренной стоимости. Однако такие конструкции могут хрупко разрушаться при эксплуатационном нагружении в условиях низких климатических температур. Поэтому принята система контроля качества материалов и уровни требований, многие годы обеспечивавшие малое количество случаев разрушения. Однако проектные характеристики современных конструкций делают необходимым применение более прочного проката в больших толщинах, в то же время стоит противоположная задача удешевления его изготовления. Разработаны марки стали с индексом «Arc» [1, 2], обсуждается применимость существующих требований Регистра к материалам для новых типов конструкций [3] либо в случаях, когда таковые не были конкретизированы [4]. В таких условиях научное обоснование требований к материалам играет ключевую роль.

В статье [5] была показана связь минимально необходимой работы удара металла проката судостроительных сталей при статочных испытаниях с возможностью торможения трещины, распространяющейся в конструкции по хрупкому механизму. Расчетные соотношения получали на основании расчетов МКЭ.

Подобные расчеты также проводили для образцов, используемых при специальных механических испытаниях по определению температур вязко-хрупкого перехода: температуры нулевой пластичности NDT [6], температуры критической на больших образцах $T_{КБ}$ [7], температуры TDWTT, определяемой при испытаниях на разрыв падающим грузом DWTT (ИПГ) [8], а также для конструктивных элементов. Цель выполненных расчетов — с использованием механики разрушения определить связь критических событий либо температур, связанных с каждым видом испытания, и подтвердить либо откорректировать температурные запасы, ранее внесенные в Правила РС [9] для сталей с индексом «Arc», применяемых для наиболее ответственных конструкций Севера.

Предлагаемый подход не ограничивается исключительно арктическими марками сталей и может быть использован для любых трубных и судостроительных сталей, в том числе для сталей толщиной от 7,5 мм, которые могут быть испытаны по методике DWTT, но для них не могут быть определены температуры NDT и $T_{КБ}$.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТОРМОЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ

Как было отмечено в статье [5], для обеспечения торможения трещины критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I должен быть как минимум равен нагруженности в вершине трещины, которая также определяется в терминах КИН. Такие значения КИН могут быть найдены для конструктивных элементов в разных толщинах и практически любых образцов, используемых для механических испытаний, в том числе специальных. Сравнение КИН для образца и конструктивного элемента позволяет перейти к температурному запасу между наступлением данных событий с использованием известной ожидаемой зависимости КИН в температурной области вязко-хрупкого перехода,

$$K_I|_{T_D} = K_I|_{T_{II}} \exp(0,02(T_D - T_{II})), \quad (1)$$

где T_D — минимальная температура применимости материала, соответствующая торможению трещины в конструктивном элементе,
 T_{II} — температура испытания, соответствующая выполнению условия по какой-либо процедуре испытания.

Оценка минимального КИН материала, необходимого для торможения туннелирующей трещины в конструктивном элементе, также описывается численной процедурой, предложенной А.В. Ильиным, не связанной с применением МКЭ [10, 11]:

$$K_{Ia} = \sqrt{3,5 \cdot 10^{-5} \sigma_{T3}^{2,42} S}, \quad (2)$$

где $\sigma_{T3} \approx 1,33 R_{p02}$ — эффективный предел текучести материала при быстром нагружении [5], МПа,
 S — толщина металла, мм,
 K_{Ia} — КИН при торможении трещины.

Расчеты МКЭ распространения трещины в моделях образцов для специальных механических испытаний позволяют оценить уровни K_{Ia} , соответствующие достижения условий, различных для разных видов испытаний: распространение трещины до края образца NDT, 70 % волокнистой составляющей в изломе образца T_{KB} или DWTT. Также возможно установление соответствия КИН и работы разрушения образца, что, в первую очередь, было использовано в [5] при оценке необходимого уровня работы удара. Такой подход также важен для перехода к количественной оценке результатов испытания по методике DWTT [8].

В расчетах используются трехмерные модели с равномерной сеткой конечных элементов (КЭ) в области распространения трещины и несколько конкурирующих условий хрупкого и вязкого разрушения в плоскости надреза, также добавлено условие возникновения расщепления в середине толщины металла. Такое расщепление характерно для сталей, произведенных методами термомеханической обработки (ТМО).

2. ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ МОДЕЛИ ОБРАЗЦА ИЛИ КОНСТРУКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ТРЕЩИНОЙ

«Разрушение» при моделировании, реализованное в виде «расщепления» (снятия условия совместности перемещения) узлов сетки КЭ, осуществляется при выполнении хотя бы одного из перечисленных ниже условий, с фиксацией данного события в протоколе расчета. Это позволяет строить карты изломов и определять долю волокнистой составляющей согласно стандартным процедурам испытаний образцов. Основной задачей при формулировании условий разрушения было обеспечение их применимости в двух ситуациях: для тела без трещины и тела с распространяющейся трещиной, в котором первые главные напряжения преимущественно нормальны к ее плоскости. Такие варианты охватывают необходимые типовые случаи нагружения.

Условие 1: достижение критического значения жесткости напряженного состояния — отношения первых главных напряжений к интенсивности напряжений $\chi = \sigma_1 / \sigma_i$ — известный силовой критерий хрупкого разрушения, калибровка значений которого для элементов равномерного разбиения сетки КЭ предложена А.В. Ильиным [11]. Значения в элементах сетки используются потому, что в ее узлах, выходящих на текущий фронт трещины, МКЭ дает некорректные значения компонент напряжений, что естественно в связи с их сингулярностью у вершины трещины. Поскольку величина χ зависит от размера КЭ, для определения связи данного условия с КИН материала используется решение калибровочной задачи.

Условие 2: достижение критической величины пластической деформации — имело очевидный недостаток: критическая деформация при полностью вязком характере разрушения различна в изломе образца с трещиной и в изломе гладкого образца на одноосное растяжение (для сталей — порядка 0,6 [12] и 2,0, соответственно). В настоящее время условие 2 отдельно не используется и является частью условия 4.

Условие 3: достижение критического значения накопленной пластической сдвиговой деформации $\gamma_{cpl} = (\varepsilon_{1pl} - \varepsilon_{3pl})/2$ — условие вязкого разрушения срезом. Данное условие относится к разрушению «губ среза» и проверялось только на моделях тел с трещиной. Поскольку, как сказано выше, предельная величина ε_{1pl} для судостроительной стали при вязком разрушении в таком случае достигает 0,6, то интервал возможных значений γ_{cpl} составляет от 0,3 при $\varepsilon_{3pl} = 0$ до 0,6 при $\varepsilon_{3pl} = -\varepsilon_{1pl}$ (деформации в направлении толщины отрицательны, происходит утяжка поперечного сечения). Значение γ_{cpl} принимали в середине этого диапазона, подбирая его по получаемому при одновременном применении условий 3 и 4 соотношению площадей, соответствующих областям вязкого среза и отрыва в изломе.

Условие 4 — двойное: нормализованное по величине накопленной пластической деформации условие вязкого отрыва Кокрофта — Лэтэма — Оха CLONE (Cockroft Latham Oh Normalized by ε) [8] и одновременное достижение некоторого уровня накопленной пластической деформации ε_{ipl} .

Кокрофт и Лэтэм предложили свое условие вязкого разрушения в 1967 году [13] по результатам исследования образцов на растяжение, оно имело размерность плотности работы деформирования,

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma^* d\varepsilon, \quad (5)$$

где ε_f — деформация при разрушении, $\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1-\psi}$, ψ — относительное сужение,

σ^* — «максимальные нормальные напряжения» растяжения (по смыслу то же, что первые главные напряжения σ_1 , иногда также обозначают σ_1^+).

В 1979 году Ох и др. [14] нормализовали критерий (5) по напряжениям, разделив подынтегральное выражение на величину интенсивности напряжений σ_i и приведя его к безразмерному виду,

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} (\sigma_1^+ / \sigma_i) d\varepsilon. \quad (6)$$

В виде (6) критерий широко применяется для анализа способности металлов к глубокой пластической деформации, например, при штамповке [15], поскольку в таких задачах напряжения при нагружении могут менять знак. В статье Стебунова и др. [16] перечислены и более поздние модификации критерия Кокрофта — Лэтэма вида

$$\Psi = \int_0^{\varepsilon_{ipl}} \frac{1}{\varepsilon_{if}(\chi, \mu_\sigma)} d\varepsilon_{ipl}, \quad (7)$$

где Ψ — повреждающий фактор,

ε_{if} — разрушающие деформации, зависящие от жесткости НДС и от параметра Лоде — Надаи

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - 0,5(\sigma_1 - \sigma_3)}{0,5(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{\sigma_2 - \gamma}{\gamma},$$

учитывающего влияние вторых главных напряжений. Иными словами, учитывается многоосность нагружения.

Условия вида (7) имеют следующие особенности [16]: локальный рост «повреждаемости» пропорционален росту пластических деформаций и обратно пропорционален величине разрушающих деформаций, которая, в свою очередь, зависит от жесткости НДС. В дополнение, рост «повреждаемости» не зависит от пути нагружения, что соответствует гипотезе линейного суммирования повреждений.

Предлагаемый критерий CLONE (8) является менее радикальным изменением условия (6):

$$CLONE = C / \varepsilon_{ipl} = \frac{1}{\varepsilon_{ipl}} \int_0^{\varepsilon_{ipl}} \frac{\sigma_1(\varepsilon_{ipl})}{\sigma_i(\varepsilon_{ipl})} d\varepsilon_{ipl}. \quad (8)$$

Проверка приемлемости условия CLONE в первую очередь проводилась для тел без трещины. Сопоставляли результаты расчетов МКЭ и испытаний на растяжение пятикратных образцов по ГОСТ 1497 и образцов по API 5L с длиной рабочей части 2 дюйма. Результаты представлены в таблице.

Как видно из таблицы, критерий CLONE обеспечивает значительно меньшее различие оценок на образцах со схожей жесткостью напряженного состояния, чем величина накопленной пластической деформации либо критерий Кокрофта — Лэтэма — Оха (6).

Далее исследовали применение условия CLONE для тела с трещиной. Первое достижение критического

Таблица

Проверка условия вязкого разрушения при растяжении

Труба с толщиной стенки 27,5 мм, ориентация образцов поперечная. Материал — сталь X80 (K65). $R_{p02} = 600$ МПа, $R_m = 660$ МПа			
Образец по ГОСТ: ширина 30 мм, длина 175 мм (кратность 5,4), напряжение в момент разрушения 371 МПа*. Образец по API: ширина 38 мм, длина 51 мм (кратность 1,4), напряжение в момент разрушения 397 МПа*.			
Результаты моделирования МКЭ	Образец по ГОСТ	Образец по API (короткий)	Разность, %
Напряжение в момент разрушения*, МПа	371	398	—
$\varepsilon_{ipl}(\max)$	1,438	1,394	3,0
$C(\max)$, формула (6)	1,970	1,888	4,0
CLONE (max), формула (8)	1,370	1,366	0,3
Труба с толщиной стенки 16,0 мм, ориентация образцов поперечная. Материал — сталь X100 (K80), $R_{p02} = 749$ МПа, $R_m = 808$ МПа			
Образец по ГОСТ: ширина 30 мм, длина 125 мм (кратность 5,0), напряжение в момент разрушения 510 МПа*. Образец по API: ширина 38 мм, длина 51 мм (кратность 1,8), напряжение в момент разрушения 523 МПа*.			
Результаты моделирования МКЭ	Образец по ГОСТ	Образец по API (короткий)	Разность, %
Напряжение в момент разрушения*, МПа	511	524	—
$\varepsilon_{ipl}(\max)$	1,220	1,300	6,0
$C(\max)$, формула (6)	1,650	1,750	5,7
CLONE (max), формула (8)	1,366	1,379	1,0
*Напряжение в момент разрушения определяли как нагрузку в данный момент, отнесенную к начальному поперечному сечению рабочей части образца.			

значения CLONE при нагружении такой модели происходит при уровне K_I , ожидаемо пропорциональном пределу текучести материала, при низких значениях ε_{ipl} , практически при появлении зоны пластических деформаций. Данный момент ожидаемо оказывается сеточно зависимым. Поэтому, на первый взгляд, применять такое условие для образца с трещиной не имеет смысла. Однако вычисление CLONE в ходе моделирования продвижения трещины показало, что области достижения заданных величин CLONE и ε_{ipl} не совпадают, и «разрушение» при достижении только одного из двух условий не происходит. Это приближает модельную диаграмму деформирования тела с трещиной и поглощенную энергию (площадь под диаграммой) к получаемым экспериментально.

Критическое значение ε_{ipl} (бывшее условие 2) принимали достаточно большим ($\varepsilon_{ipl}=0,5$ для цифрового двойника стали K65/X80) на основании решения еще одной калибровочной задачи. Использовали модель конструкционного элемента со сквозной трещиной и тем же размером КЭ, что был принят при расчетах моделей образцов DWTT. Калибровочную модель нагружали растяжением, чтобы оперировать термином «номинальные напряжения», распространение трещины не моделировали. Вместо этого устанавливали связь приложенных брутто-напряжений и накопленной интенсивности пластической деформации. Значение $\varepsilon_{ipl}=0,5$ достигается при приложенных напряжениях на 0,5% выше напряжений общей текучести модели, что дает некоторый допуск на деформационное упрочнение для исследуемого материала.

Условие 5 используется с целью исследования склонности стального проката к расщеплениям параллельно прокатанным поверхностям. Оно отличается от условия 1 только величиной и местом применения — для элементов, выходящих на плоскость симметрии модели (к середине толщины металла).

Дополнительные особенности применения рассматриваемых условий разрушения:

- условия 1 и 5, относящиеся к хрупкому разрушению, анализируются по значениям, получаемым для элементов сетки КЭ. Остальные условия, относящиеся к вязкому разрушению, исследуются по значениям, получаемым в узлах сетки;

- условия 1 и 5 в ходе расчетов МКЭ анализируются с того момента, когда в конкретном КЭ начинается пластическая деформация (материал выходит за поверхность текучести). Задаваемые критические величины χ должны находиться в пределах, получаемых при решении калибровочной задачи. Например, для стали марки X80 (K65), при размере КЭ в области равномерного разбиения 0,5 мм, $\chi=2,25 \dots 2,83$, последнее соответствует максимально достижимой в модели жесткости. Очевидно, что с ростом размера КЭ верхний предел значений χ снижается. Достижение условия 1 в ходе нагружения модели не всегда означает наступление «хрупкого разрушения», например, если дальнейшее продвижение трещины требует увеличения приложенного перемещения, а также если величина накопленной пластической деформации в данной области излома превышает некоторую величину, по данным [12], разделяющую диапазоны, характерные для хрупкого и вязкого разрушения, например $\varepsilon_{ipl}=0,1$. Картограмму излома следует анализировать совместно с модельной диаграммой нагружения и распределением ε_{ipl} в изломе;

- условие 3: критическая накопленная сдвиговая деформация может находиться в диапазоне $\gamma_{cpl}=0,3 \dots 0,6$ и обычно принимается равной 0,45. От величины γ_c зависит соотношение площадей среза и отрыва в волокнистой части излома. При $\gamma_c \geq 0,5$ преобладает отрыв;

- условие 4 при расчетах МКЭ анализируется только в области больших пластических деформаций, например $\varepsilon_{ipl} > 0,5$. Используется критическая величина CLONE, вычисленная для цифрового двойника материала при решении задачи растяжения гладкого образца без трещины, для момента, когда достигаются те же напряжения при разрушении, которые были зафиксированы при реальных испытаниях (примеры в таблице). Диапазон критических значений CLONE составляет от 1,05 для высокопрочной износостойкой стали до 1,40 для судостроительной и трубной стали с пределом текучести 500 — 600 МПа;

- если любое из перечисленных условий выполнено для узлов сетки, отстоящих от текущего фронта трещины, для корректного решения задачи одновременно с «расщеплением» данных узлов необходимо снять запрет на перемещение узлов, находящихся между ними и текущим фронтом трещины, в противном случае «неразрушенная» область в дальнейшем окажется разгруженной и не будет «разрушена». Подобный процесс экспериментально наблюдается при испытаниях на торможение трещины при падающем КИН по стандарту ASTM E 1221, где называется «ligamentation».

3. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МКЭ

При расчетах МКЭ варьируемой для данного материала (зависящей от температуры) величиной является параметр χ и соответствующее ему из решения калибровочной задачи значение K_I материала.

Представлены результаты расчетов моделей конструктивных элементов и образцов ИПГ толщиной 25 мм из стали X80 (K65) с $R_{p02}=600$ МПа, эффективный («динамический») предел текучести 798 МПа, материал считается гомогенным и не склонным к расщеплениям. Для данного материала разработан цифровой двойник, описывающий «истинную» диаграмму нагружения при быстром нагружении, и определено критическое значение $CLONE=1,37$. По формуле (2) значение $K_{Ia}=96$ МПа·м^{0,5}.

Подробное описание моделей КЭ было представлено в [8]. Модель конструктивного элемента представляет собой пластину больших размеров в плане со сквозной центральной трещиной длиной $2a=1,125$. Размер КЭ в зоне трещины 0,5 мм. Нагружение производится приложенным перемещением с шагом 0,1 мм; на каждом шаге анализируются условия разрушения, приводящие к продвижению трещины, до полного прекращения их выполнения, после чего осуществляется следующий шаг по перемещению. Трещина считается остановившейся, если на нескольких последующих шагах нагружения не происходит нового старта магистрального хрупкого разрушения (на каждом шаге требуется увеличение приложенной нагрузки), а уровень приложенных напряжений при этом превышает 0,7 статического предела текучести R_{p02} .

Выполнены расчеты МКЭ для $\chi=2,55$ ($K_I=92$ МПа·м^{0,5}), $\chi=2,58$ ($K_I=97$ МПа·м^{0,5}) и $\chi=2,83$ ($K_I=194$ МПа·м^{0,5}). В первом случае трещина неограниченно распространяется по хрупкому механизму при приложенных брутто напряжениях растяжения 523 МПа, во втором случае отмечено торможение трещины после максимального подраста $\Delta a=11,5$ мм, при этом приложенные брутто напряжения 585 МПа. Таким образом, расчетное значение K_{Ia} соответствует полученному по формуле (2).

Наиболее показательной для иллюстрации конкурирующих условий разрушения является картограмма излома, полученного при $\chi=2,83$, где разрушение распространялось преимущественно по вязкому механизму, приведенная на рис. 1.

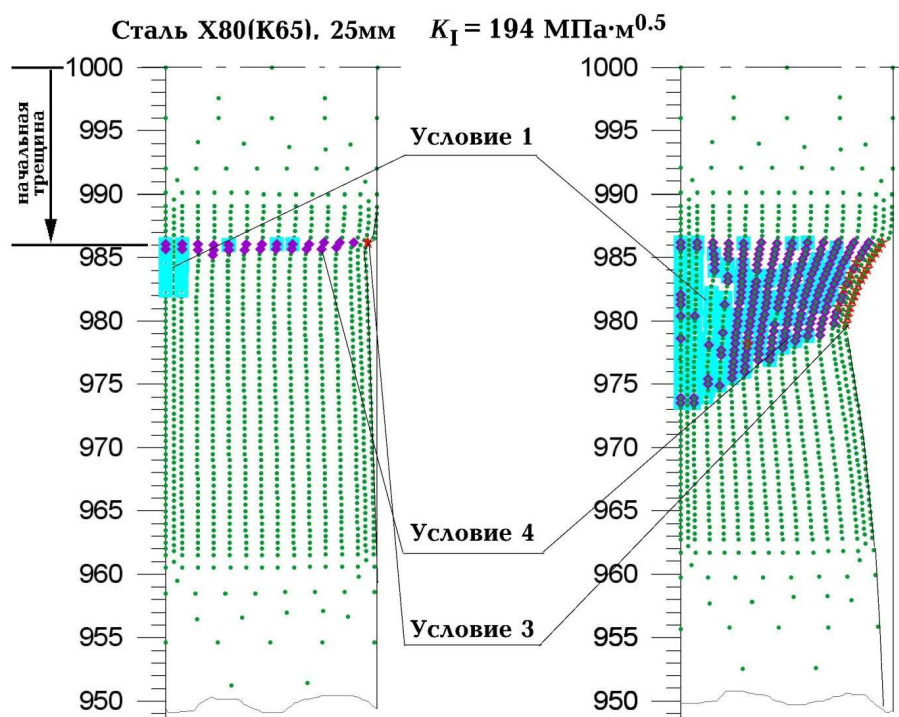


Рис. 1. Картограмма излома модели конструктивного элемента

На рис. 2 показана картограмма излома и картина распределения интенсивности пластической деформации в изломе образца ИПГ, изготовленного из того же материала, при $\chi = 2,48$ ($K_I = 83 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$). Конечноэлементная модель образца DWTT аналогична модели образца Шарпи, представленной в работе [5]. В областях вязкого разрушения модельного излома, соответствующих выполнению условий 3 и 4, накопленная пластическая деформация ε_{ipl} достигает 0,5 ... 0,6, что показано на рис. 2.

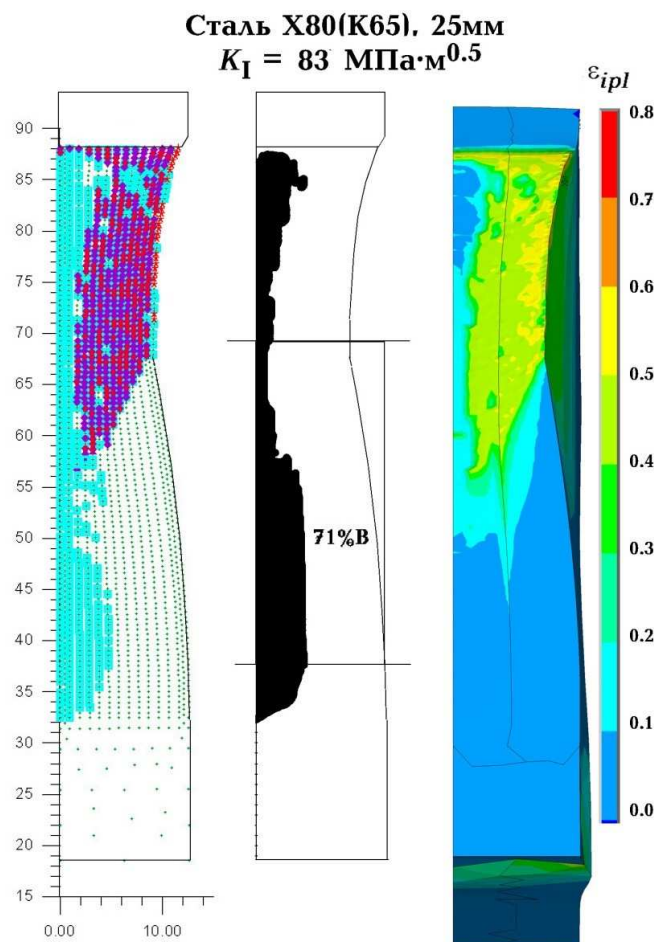


Рис. 2. Картограмма излома и распределение пластических деформаций в изломе модели образца ИПГ (нижняя часть излома на рассматриваемый момент не разрушена)

Поскольку картографирование излома на рис. 2 позволяет получить долю волокнистой составляющей около 70 %, можно считать, что заданное при расчете K_I материала соответствует температуре $T_{\text{и}} = T_{\text{DWTT}}$. Тогда, из формулы (1), $\Delta T = T_D - T_{\text{и}} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$, то есть температура T_{DWTT} , полученная при испытаниях падающим грузом, в данном примере должна быть несколько ниже минимальной температуры применимости материала. Для получения полной картины зависимости ΔT от толщины и категории прочности металла требуется проведение серийных расчетов.

ВЫВОДЫ

В статье дано развернутое описание совокупности предлагаемых условий конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения для использования в расчетах МКЭ моделей образцов и конструктивных элементов. В том числе впервые рассмотрено моделирование конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения в изломе с расщеплением. Представлены границы применимости используемых условий разрушения.

Подтверждено, что результаты оценки КИН, необходимого для торможения трещины в конструкциях, получаемые с использованием численной процедуры и метода МКЭ, практически совпадают, в том числе при

наличии расщеплений. Это позволяет использовать соотношения (1) и (2) для обоснования требований к температурам вязко-хрупкого перехода, значениям работы удара и иным характеристикам судостроительных и трубных сталей. Примеры таких соотношений для однородных материалов представлены в [8]. Дальнейшие расчеты МКЭ позволят учесть особенности материалов, склонных к расщеплению при нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башаев В.К. Разработка технологии производства листового проката толщиной до 50 мм из высокопрочных сталей с индексом «Arc» / В.К. Башаев, Е.И. Хлусова, С.А. Голосиенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С. 100 — 111.
2. Башаев В.К. Хладостойкость высокопрочной легированной стали с пределом текучести 500 МПа / В.К. Башаев, Г.Д. Мотовилина, В.В. Рябов, О.В. Сыч и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 29 — 38.
3. Аносов А.П. Устройство для активной противоледовой защиты морских нефтегазовых сооружений / А.П. Аносов, Н.И. Восковчук // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 58 — 67.
4. Тряскин В.Н. Оценка возможности применения действующих Правил РС к конструкциям ледовых усилений стоечных судов / В.Н. Тряскин, В.В. Платонов, И.А. Свистунов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62/63. — С. 89 — 99.
5. Филин В.Ю. Обоснование требований МАКО и Регистра к выбору материалов корпусных конструкций, эксплуатируемых при низких климатических температурах. Часть 2. Сопротивление распространению трещины / В.Ю. Филин, А.В. Ильин, А.В. Ларионов, Е.Д. Назарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 56 — 69.
6. Филин В.Ю. Экспериментальные исследования и расчеты распространения трещины при температуре нулевой пластичности судостроительной стали / В.Ю. Филин, А.В. Мизецкий, Д.Р. Бараков, М.М. Пегливанова // Вопросы материаловедения. — 2024. — № 2(118). — С. 144 — 153.
7. Filin V.Yu. Quality control of steels for large-sized welded structures of the Arctic shelf: Application of Russian and foreign requirements / V.Yu. Filin // Inorganic Materials: Applied Research. — 2019. — Vol. 10. No. 6. — P. 1492 — 1503. — DOI 10.1134/S207511331906008X.
8. Barakov D.R. Actual problems of strength and reliability of steel arctic structures. Assessment procedures of crack start and arrest condition / D.R. Barakov, V.Yu. Filin // Proceedings of the XIII International Conference "Navy and Shipbuilding Nowadays" (NSN'24). — ICR "NP-PRINT", 2024. — P. 239 — 246.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. «Материалы» / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023. — 390 с.
10. Филин В.Ю. Количественные оценки сопротивления распространению разрушения судостроительных и трубных сталей / В.Ю. Филин, А.В. Ильин, А.В. Ларионов, А.В. Мизецкий и др. // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: м-лы и докл. VIII Всеросс. конф. (Красноярск, 16 — 20 сентября 2023 г.). — Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. — С. 83 — 88. — DOI 10.25743/SSTS.2023.78.16.019.
11. Ильин А.В. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной / А.В. Ильин, Д.М. Артемьев, В.Ю. Филин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2018. — Т. 84. — № 1(I). — С. 56 — 65.
12. Ларионов А.В. Оценка связи сопротивления металла вязкому разрушению с поглощенной энергией при испытаниях падающим грузом / А.В. Ларионов, В.Ю. Филин, А.В. Ильин // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: м-лы XIV Всеросс. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 25 марта 2022 г.). — М.: НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, 2022. — С. 506 — 520.
13. Cockcroft M.G. Ductility and the workability of metals / M.G. Cockcroft, D.J. Latham // Journal of the Institute of Metals. — 1968. — Vol. 96. — P. 33 — 39.
14. Oh S.I. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part 2: Workability in extrusion and drawing / S.I. Oh, C.C. Chen, S. Kobayashi // Journal of Engineering for Industry. — 1979. — Vol. 101. — P. 36 — 44.
15. Власов А.В. О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2017. — Вып. 11. Ч. 1. — С. 46 — 58.
16. Stebunov S. Prediction of fracture in cold forming with modified Cockcroft-Latham criterion / S. Stebunov, A. Vlasov, N. Biba // Procedia Manufacturing. — 2018. — Vol. 15. — P. 519 — 526.

REFERENCES

1. Bashaev V.K., Khlusova E.I., Golosienko S.A. Development of manufacturing procedures for rolled plates of thickness up to 50 mm made of high strength steels with index "Arc". *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2013. No. 36. P. 100 — 111. (In Russ.)
2. Bashaev V.K., Motovilina G.D., Ryabov V.V., Sych O.V. et al. Cold resistance of high strength alloy steel with a yield stress of 500 MPa. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2014. No. 37. P. 29 — 38. (In Russ.)
3. Anosov A.P., Voskovschuk N.I. Active ice protection of offshore oil and gas facilities. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 58 — 67. (In Russ.)
4. Tryaskin V.N., Platonov V.V., Svistunov I.A. Assessment of the possibility to apply current requirements of RS Rules to berth-connected ships ice reinforcement. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 62/63. P. 89 — 99. (In Russ.)
5. Filin V.Yu., Ilyin A.V., Larionov A.V., Nazarova E.D. Substantiation of IACS and RS requirements for the selection of hull materials for structures operated at low climatic temperatures. Part 2: Resistance to crack propagation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 56 — 69. (In Russ.)

6. Filin V.Yu., Mizetsky A.V., Barakov D.R., Peglivanova M.M. Experimental studies and calculation of crack propagation at the nil ductility temperature of shipbuilding steel. *Voprosy materialovedeniya [Problems of materials science]*. 2014. No. 2(118). P. 144 — 153. (In Russ.)
7. Filin V.Yu. Quality control of steels for large-sized welded structures of the Arctic shelf: Application of Russian and foreign requirements. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. No. 6. P. 1492 — 1503. DOI 10.1134/S207511331906008X.
8. Barakov D.R., Filin V.Yu. Actual problems of strength and reliability of steel arctic structures. Assessment procedures of crack start and arrest condition. *Proceedings of the XIII International Conference "Navy and Shipbuilding Nowadays" (NSN'24)*. IKP "NP-PRINT", 2024. P. 239 — 246.
9. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIII "Materials" / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024. 390 p.
10. Filin V.Yu., Ilyin A.V., Larionov A.V., Mizetsky, A.V. et al. Kolichestvennye otsenki soprotivleniya rasprostraneniya razrusheniya sudostroitel'nykh i trubnykh stali [Quantitative estimates of fracture propagation resistance of hull and pipe steels]. *Bezopasnost' i monitoring prirodnnykh i technogennykh system: materialy i dorkady. VIII Vserossiiskaya konferentsiya* [Safety and monitoring of natural and man-made systems: materials and reports. VIII All-Russian conference] (Krasnoyarsk, 16 — 20 September 2023). Novosibirsk: FIC IVT, 2023. P. 83 — 88. DOI 10.25743/SSTS.2023.78.16.019.
11. Ilyin A.V. Artemiev D.M., Filin V.Yu. Modelirovanie MKE rasprostraneniya i tormozheniya khrupkogo razrusheniya v plastinakh s ishkodnoi treschinoi [Simulation of the propagation and arrest of the brittle fracture in steel plates with initial crack using finite element method]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Plant laboratory. Diagnostics of materials]*. 2018. Vol. 84. No.1(I). P. 56 — 65.
12. Larionov A.V., Filin V.Yu., Ilyin A.V. Ocenka svyazi soprotivleniya materiala vjazkomu razrusheniju s pogloschennoj energiej pri ispytaniyakh padayuschim грузом [On the correlation of shear fracture resistance of metal with the absorbed energy at drop weight tear test]. *Fiziko-mechanicheskie ispytaniya, prochnost', nadezhnost' sovremennykh konstrukcionnykh i funkcionnykh materialov: materialy XIV Vserossiiskoi konferentsii po ispytaniyam i issledovaniyam svoystv materialov "TestMat"* [Physical-mechanical tests, strength, reliability of modern structural and functional materials: Proceedings of XIV All-Russian conference on testing and investigation of material properties. Moscow, 25 march 2022]. NRC Kurchatov institute — VIAM Publ., 2022. P. 506 — 520.
13. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals*. 1968. Vol. 96. P. 33 — 39.
14. Oh S.I., Chen C.C., Kobayashi S. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part 2: Workability in extrusion and drawing. *Journal of Engineering for Industry*. 1979. Vol. 101. P. 36 — 44.
15. Vlasov A.V. O primeneni kriteriya Kokrofta-Latama dlya prognozirovaniya razrusheniya pri ob'emnoi shtampovke [On the application of Cockcroft-Latham criterion for fracture prediction in 3D stamping]. *Izvestia TulGU. Technicheskie nauki [News of Tula State University. Technical sciences]*. 2017. Vol. 11, part 1. P. 46 — 58.
16. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of fracture in cold forming with modified Cockcroft-Latham criterion. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 15. P. 519 — 526.

УДК 629.123 + 532.583.4
EDN TBXALX

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ И ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИИ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА НОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

Е.М. Апполонов, д-р техн. наук, профессор, АО ЦКБ «Лазурит», 191036 Россия, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 6, корп. 2, лит. А, e-mail: em_appolonov@cdb-lazurit.ru

В.В. Платонов, канд. физ.-мат. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158 Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

В.Н. Тряскин, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лотманская ул., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

Излагаются методика и алгоритм построения зависимостей для определения параметров расчетных ледовых нагрузок на бортовые конструкции судов ледового плавания, основанных на новой модели динамического разрушения льда (МДРЛ). Рассмотрены теоретические основы МДРЛ. Для построения расчетных зависимостей выполнены сбор и анализ представительной статистической информации по форме корпуса судов ледового плавания в широком диапазоне водоизмещения и для различных ледовых классов. На основе систематизации этой информации предложено разделение судов на несколько групп, отличающихся значениями параметров формы корпуса на уровне расчетной ватерлинии. Обоснованы исходные данные для выполнения расчетов ледовых нагрузок по новой модели. Структура исходных данных определяется матрицей планирования эксперимента — численного эксперимента с использованием специализированного программного обеспечения. Расчетные зависимости представлены в виде квадратичных регрессионных зависимостей. Настройка расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок выполнена на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов. Приведены результаты практической апробации расчетных зависимостей. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования требований Правил Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: судно ледового плавания, районы ледовых усиления, модель динамического разрушения льда, расчетные зависимости для определения ледовых нагрузок, Правила Регистра.

Для цитирования: Апполонов Е.М. Методика разработки и практическая апробация расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усиления транспортных судов ледового плавания, основанных на новой модели динамического разрушения льда / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 74 — 95. — EDN TBXALX.

METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT AND PRACTICAL TESTING OF CALCULATED DEPENDENCIES FOR DETERMINING ICE LOADS ON THE STRUCTURES OF ICE REINFORCEMENTS OF ICE-NAVIGATION TRANSPORT VESSELS BASED ON A NEW MODEL OF DYNAMIC ICE DESTRUCTION

E.M. Appolonov, DSc, Professor, Lazurit CDB, 191036 Russia, St. Petersburg, Ligovsky pr., 6/2A, e-mail: em_appolonov@cdb-lazurit.ru

V.V. Platonov, PhD (Eng.), Krylov State Research Centre, 196158 Russia, St. Petersburg, Moskovskoe sh., 44, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

V.N. Tryaskin, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

A methodology and algorithm for constructing dependencies for determining the parameters of calculated ice loads on the on-board structures of ice navigation vessels based on a new model of dynamic ice destruction (MDRL) are described. The theoretical foundations of MDRL are considered. To construct the calculated dependencies, representative statistical information on the shape of the hull of ice navigation vessels was collected and analyzed in a wide range of displacement and for various ice classes. Based on the systematization of this information, it is proposed to divide ships into several groups, differing in the values of hull shape parameters at the level of the calculated waterline. The initial data for performing calculations of ice loads according to the new model are substantiated. The structure of the initial data is determined by the experiment design matrix — a numerical experiment using specialized software. The calculated dependencies are presented in the form of quadratic regression dependencies. The adjustment of the calculated dependencies for determining the parameters of ice loads is based on calculations of ice loads for

real ships. The results of practical testing of the calculated dependencies are presented. The results obtained can be used to improve the requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping.

Key words: ice navigation vessel, areas of ice reinforcement, model of dynamic ice destruction, calculated dependencies for determining ice loads, Rules of the Register.

For citation: Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodology for the development and practical testing of calculated dependencies for determining ice loads on the structures of ice reinforcements of ice-navigation transport vessels based on a new model of dynamic ice destruction. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 74 — 95. EDN TBXALX. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Действующие требования Правил Российского морского регистра судоходства к ледовым усилениям судов и ледоколов (Правила Регистра) [1] были разработаны в конце 90-х годов прошлого века и прошли почти 20-летнюю практическую апробацию. По требованиям действующих Правил построены и строятся современные российские суда ледового плавания и ледоколы, анализ опыта эксплуатации которых показывает, что данные о ледовой повреждаемости носят единичный характер и в целом уровень ледовой прочности, заложенный в действующие Правила, является удовлетворительным. Однако, с другой стороны, анализ научно-теоретической основы действующих Правил позволил сделать вывод, что гидродинамическая модель, используемая при определении расчетных ледовых нагрузок, переоценивает роль процесса динамического вытеснения разрушенного льда за пределы зоны контакта и игнорирует процесс разрушения льда непосредственно от смятия. Эта особенность обуславливает завышенное влияние на ледовую нагрузку скорости и массы судна, что, прежде всего, должно учитываться при экстраполяции накопленного опыта нормирования ледовой прочности судов малых и средних размерений и средних ледовых классов на перспективные крупнотоннажные суда, суда высоких арктических категорий и ледоколы нового типа.

Для исключения этого недостатка и совершенствования требований к ледовой прочности судов ледового плавания предлагается выполнить переход к новой модели динамического разрушения льда (МДРЛ), согласующейся с современными экспериментальными данными о разрушении льда при ударном воздействии. Для внедрения новой модели разрушения льда в практику проектирования судов ледового плавания и ледовой классификации Правил Регистра требуется разработка алгоритмов и программного обеспечения для определения параметров ледовых нагрузок на ее основе и построение расчетных зависимостей, предназначенных для использования в требованиях Правил Регистра. Поэтому целью настоящей работы является разработка системы расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на конструкции ледовых усиления судов ледового плавания, основанных на модели динамического разрушения льда и ориентированных на применение в Правилах Регистра.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МДРЛ

Как было указано выше, в отечественном судостроении с конца 1970-х годов при определении ледовых нагрузок используется гидродинамическая модель удара твердого тела о лед (далее ГДМ) [2]. Многочисленные эксперименты по сбрасыванию полусферических грузов на лед (Drop Ball Tests) с измерением давлений в нескольких точках полусферы [3, 4], эксперименты по внедрению в лед среднемасштабных инденторов [5] и натурные ледовые испытания судов, оснащенных специальной системой для измерения давлений в зоне контакта корпуса со льдом [6], проведенные в 1980-е — 1990-е годы, поставили под сомнение достоверность ГДМ. Анализ результатов этих экспериментов позволил установить следующую качественную картину разрушения льда при местном смятии применительно к случаю удара наклонным бортом о скругленную кромку льдины, при котором зона контакта значительно вытянута в продольном (вдоль судна) направлении (рис. 1), представляющему основной практический интерес:

- в центре зоны контакта располагается относительно небольшая по отношению к общей высоте распределения ледовой нагрузки область прямого контакта внедряемого корпуса со льдом;
- по обе стороны от области прямого контакта по высоте зоны контакта располагаются области разрушенного льда, вытесняющегося в процессе внедрения корпуса в лед;
- форма распределения давлений по высоте зоны контакта имеет четко выраженный пик в области прямого контакта, а за пределами зоны прямого контакта, в пределах областей вытеснения разрушенного льда, давления быстро убывают.

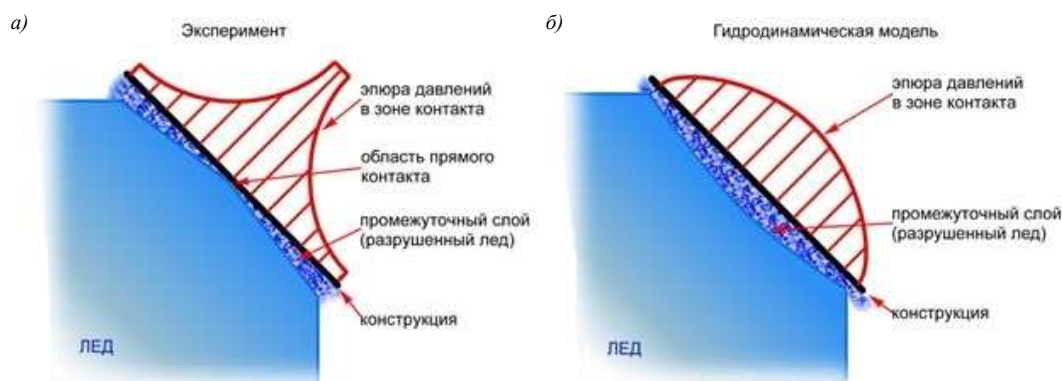


Рис. 1. Физическая картина разрушения льда при местном смятии: а — эксперимент; б — ГДМ

Таким образом, согласно изложенной физической картине, максимальные давления реализуются в области, где промежуточный слой отсутствует, а с увеличением толщины промежуточного слоя давления уменьшаются. В рамках ГДМ имеет место обратная ситуация, при которой максимальные давления возникают в области максимальной толщины промежуточного слоя в центре зоны контакта и распределение давлений по высоте зоны контакта имеет параболический характер.

Первым шагом к учету фактической картины разрушения льда при местном смятии была разработка модифицированной ГДМ, косвенно принимавшаяся во внимание при разработке действующих Правил Регистра [7]. Далее была сформулирована модель динамического разрушения льда при местном смятии (МДРЛ) [8], получившая свое развитие в работах [9, 10]. МДРЛ описывает два параллельных процесса: смятие льда как твердого тела в области прямого контакта и вытеснение разрушенного мелкодисперсного льда. Для описания процесса вытеснения используются уравнения ГДМ и вводится система дополнительных условий, отвечающих наблюдаемой в экспериментах физической картине разрушения льда (рис. 2):

- область прямого контакта тела со льдом, расположенная в центре зоны контакта, мала по сравнению с полной шириной зоны контакта, ледовое давление в ее пределах можно считать постоянным;
- раздробленный лед образует тонкий промежуточный мелкодисперсный слой между бортом судна и массой неразрушенного льда;
- в области разрушенного льда толщина промежуточного слоя монотонно возрастает при удалении от области прямого контакта, ледовое давление при этом монотонно убывает.

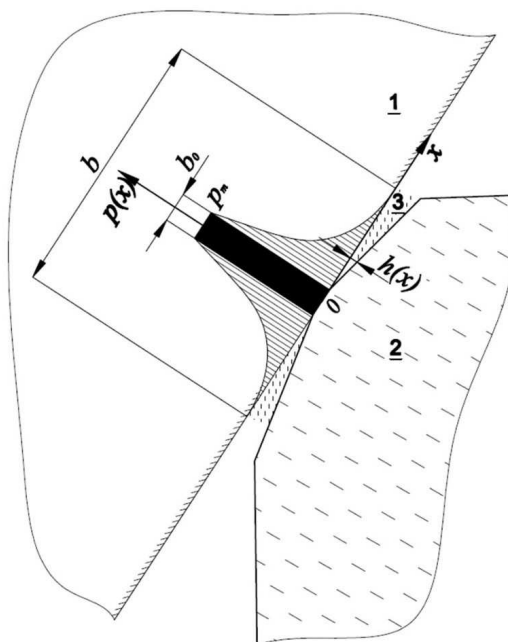


Рис. 2. Модель динамического разрушения льда (зона контакта вытянута вдоль борта судна): 1 — твердое тело (борт судна); 2 — ледовое поле; 3 — промежуточный слой разрушенного мелкодисперсного льда

В дальнейшем для внедрения МДРЛ в практику проектирования было выполнено ее совершенствование [10], на ее основе разработаны рекомендации по определению параметров ледовых нагрузок на ледоколы, предназначенные для использования в Правилах Регистра для определения размеров элементов конструкций ледовых усилений [11], и методика определения допустимых скоростей движения судна во льдах [12].

2. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМЫ КОРПУСА СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Для анализа формы корпуса традиционных и современных судов ледового плавания были выбраны существующие проекты, по которым имелась в наличии необходимая информация (табл. 1, 2). Под традиционными понимались суда ледового плавания, форма корпуса которых отвечает рекомендациям п. 3.10.1.2.2 Правил Регистра [1], а под современными — суда ледового плавания, форма корпуса которых отличается от рекомендуемой. Эти рекомендации регламентируют угол наклона форштевня, угол входа ватерлинии и углы наклона борта к ДП в некоторых сечениях по длине судна. В настоящей работе приводятся результаты анализа формы корпуса традиционных (табл. 1) и современных (табл. 2) судов ледового плавания в носовой, кормовой оконечностях и средней части.

Таблица 1

Проекты традиционных судов ледового плавания

№	Название	Год постройки	Тип	Водоизмещение, тыс. т	Ледовая категория
1	FSO Producer	1978	Танкер	145,780	—
2	Велта	1971	Танкер	2,285	ЛУ1 / Ice1
3	Delphin	1978	УСС ¹	14,672	ЛЗ / Ice1
4	Nancy	1980	Балкер	48,119	ЛЗ / Ice1
5	Tahoma Reefer	1980	Рефрижератор	6,629	ЛУ1 / Ice1
6	Марта Арендзее	1985	Рыболовное	2,449	ЛУ2 / Ice2
7	Corolina	—	УСС	19,915	ЛУ2 / Ice2
8	Maro	1981	УСС	4,868	ЛЗ / Ice2
9	Хатанга	1987	Танкер	30,059	Л2 / Ice3
10	Lee	1985	Накатное судно	10,606	Л2 / Ice3
11	Механик Ярцев	1990	Лесовоз	4,309	Л1 / Arc4
12	Breezy	1973	Лесовоз	6,757	Л1 / Arc4
13	Dream	1973	Лесовоз	6,745	Л1 / Arc4
14	Energy Annabelle	1980	Балкер	32,030	УЛ4 / Arc4
15	Surf	1978	Балкер	20,096	Л1 / Arc4
16	Варзуга	1977	Танкер	22,050	УЛ / Arc5
17	Иоганн Махмасталь	1990	Лесовоз	12,520	УЛ / Arc5
18	Севморпуть	1988	Контейнеровоз	54,324	УЛ / Arc5
19	Fifth	1977	Балкер	27,060	УЛ / Arc5
20	Норильск	1982	Ro-Lo	33,850	УЛА / Arc7
21	Яуза	1974	БМСТ ²	11,062	УЛА / Arc7

¹Универсальное сухогрузное судно.

²Большой морской сухогрузный транспорт.

Таблица 2

Проекты современных судов ледового плавания

№	Название	Год постройки	Тип	Водоизмещение, тыс. т	Ледовая категория
1	Проект 22480	—	Пассажирское	2,134	Arc4
2	РН Сахалин	2018	Танкер	5,164	Arc4
3	Василий Динков	2008	Танкер	92,198	Arc6
4	Академик Трешников	2011	НИС ¹	16,750	Arc7
5	Енисей	2011	Танкер	25,555	Arc7
6	Штурман Альбанов	2016	Танкер	58,765	Arc7
7	Christophe de Margerie	2016	Газовоз	143,866	Arc7
8	IBSV 10022	—	Судно снабж.	11,674	Arc7
9	Проект 125	—	Танкер	162,176	Arc7
10	Проект 803	—	ПБКОВР ²	44,972	Arc7

¹Научно-исследовательское судно.

²Плавучая база комплексного обеспечения буровых работ.

Анализ показал, что водоизмещение традиционных судов ледового плавания в среднем находится в диапазоне от 2,0 до 35,0 тыс. т. У современных судов ледового плавания водоизмещение может принимать значение в широком диапазоне — от 2,0 до 170,0 тыс. т.

Для традиционных судов ледового плавания характерны протяженные носовые и кормовые заострения, достигающие 35 — 40 % длины судна. Среднестатистические значения углов наклона ватерлинии и борта в носовом районе традиционных судов не превосходят 30° и 40° (рис. 3, 4), а в кормовом районе 40° и 60° соответственно (рис. 5, 6).

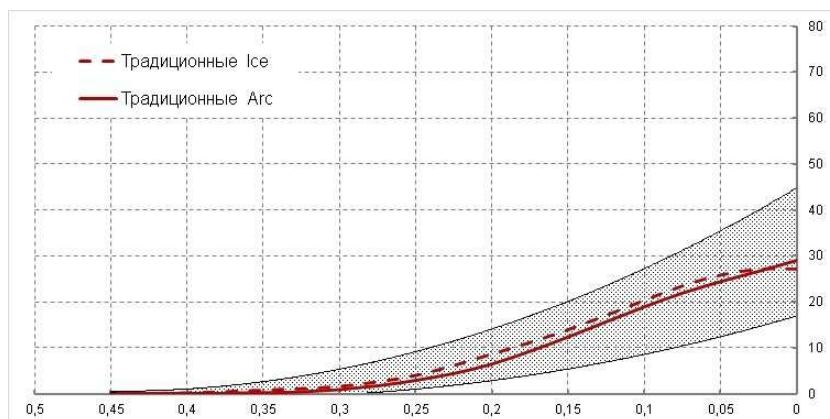


Рис. 3. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

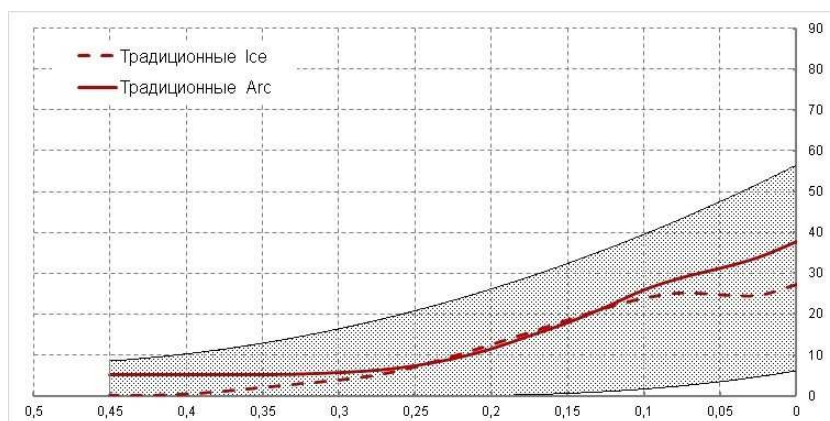


Рис. 4. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

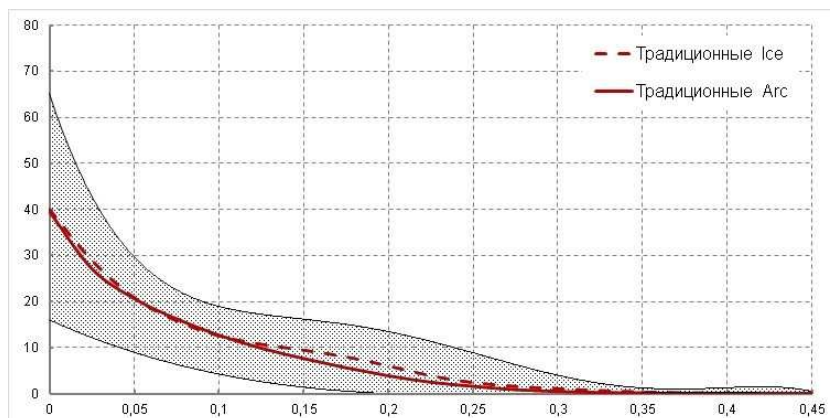


Рис. 5. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

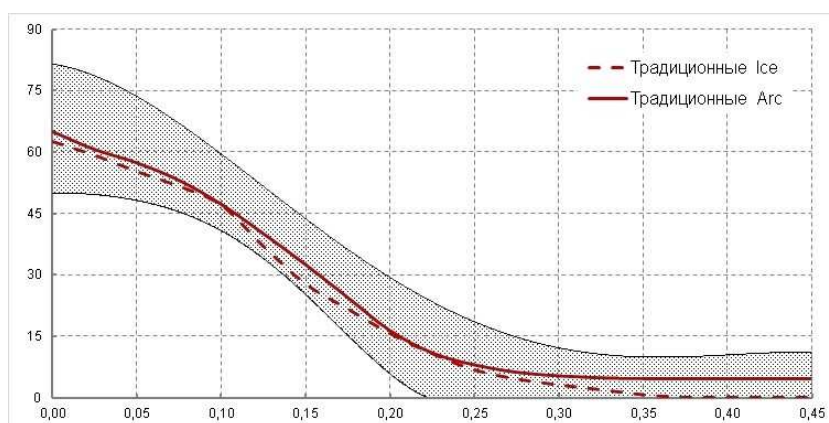


Рис. 6. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

Для современных судов ледового плавания характерна значительно меньшая протяженность носового и кормового заострений, которые не превосходят 25 % длины судна для носовой оконечности и 15 % — для кормовой. Это приводит к формам корпуса в оконечностях со значительно большими среднестатистическими значениями углов наклона ватерлиний и шпангоутов, которые могут достигать 55° — 70° в носовой оконечности (рис. 7, 8) и 65° — 75° — в кормовой (рис. 9, 10).

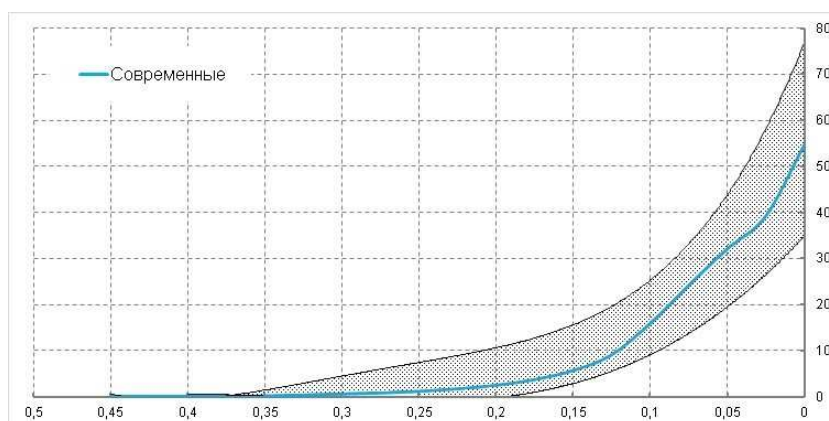


Рис. 7. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

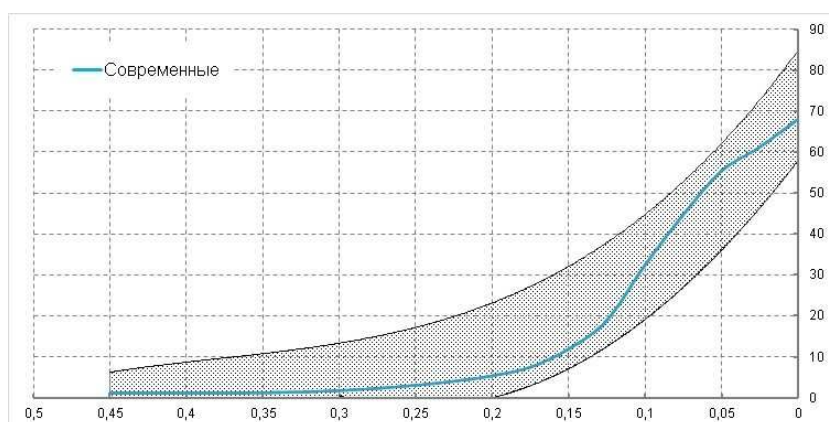


Рис. 8. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

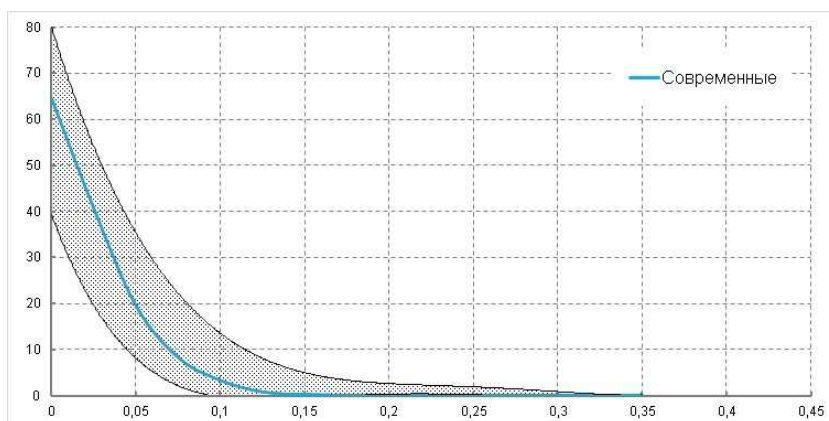


Рис. 9. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

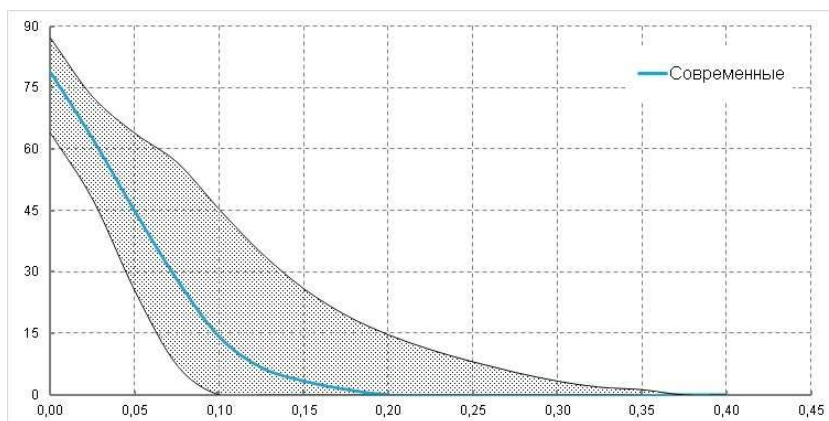


Рис. 10. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

На основании обобщения информации по форме корпуса рассмотренных судов выделены две представительные группы судов ледового плавания:

1) традиционные суда ледового плавания (без носового бульба) с категориями ледовых усиления Ise1 — Ise3 и Arc4 — Arc7 в диапазоне водоизмещения 5,0 — 35,0 тыс. т;

2) современные суда ледового плавания (без носового бульба) с категориями ледовых усиления Ise1 — Ise3 и Arc4 — Arc9 в диапазоне водоизмещения 5 — 170,0 тыс. т.

Суда 2-й группы, учитывая слишком широкий диапазон водоизмещения, дополнительно были разделены на подгруппы: 5,0 — 35,0 тыс. т. и 30,0 — 170,0 тыс. т.

Суда с бульбовыми обводами носовой оконечности недостаточно представлены в статистике и поэтому в настоящем исследовании не рассматривались.

3. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

Как было описано выше, МДРЛ описывает два параллельных процесса: смятие льда как твердого тела в области прямого контакта и вытеснение разрушенного мелкодисперсного льда. Для описания процесса вытеснения используются уравнения ГДМ и вводится система дополнительных условий, отвечающих наблюдаемой в экспериментах физической картине разрушения льда (см. рис. 2). Для вытянутой в длину зоны контакта, реализуемой при ударе корпуса судна о лед, разрешающее уравнение ГДМ сводится к виду:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} h^3 + 3h^2 \left(\frac{dp}{dx} \frac{dh}{dx} \right) = -3\mu v, \quad (1)$$

где $p(x)$ — давление в промежуточном слое;
 $h(x)$ — толщина промежуточного слоя;
 μ — коэффициент внутреннего трения;
 v — мгновенная скорость внедрения тела в лед;
 x — координата.

Уравнение (1) дополняется следующей системой допущений, вытекающей из анализа экспериментальных данных:

$$\begin{aligned} h &= kx; \\ p(x) &= p_m, \text{ при } x \leq 0,5b_0; \\ p(0,5b) &= 0; \\ p(x) &\leq p_m, \text{ при } 0,5b_0 < x \leq 0,5b_0; \\ b_0 &\ll b, \end{aligned} \quad (2)$$

где k — постоянный коэффициент, определяемый по экспериментальным данным;
 b — размер высоты зоны контакта судна со льдом;
 b_0 — размер области прямого контакта тела со льдом;
 p_m — давление в области прямого контакта тела со льдом, которое можно принять постоянным и равным пределу прочности льда на местное смятие;
 x — координата, отсчитываемая (с учетом симметрии) от центра зоны контакта в положительном направлении.

С учетом условий (2), дифференциальное уравнение, описывающее мгновенное распределение давлений по зоне контакта, примет вид:

$$x \frac{d^2 p}{dx^2} + 3 \frac{dp}{dx} = -A v/x^2, \quad (3)$$

где A — параметр МДРЛ.

Решение дифференциального уравнения (3) применительно к случаю удара наклонного борта судна о скругленную кромку ледового поля позволяет получить следующие результаты:

— в области прямого контакта тела со льдом $x \leq 0,5b_0$, расположенной в центре зоны контакта, ледовое давление постоянно и равно p_m :

$$p(x) = p_m, \quad (4)$$

— ледовое давление в зоне вытеснения $0,5b_0 < x \leq 0,5b_0$ монотонно убывает по закону:

$$p(x) = \left[p_m - 2 \frac{Av}{b} (b/b_0 - 1) \right] \frac{(b/2x)^2 - 1}{(b/b_0)^2 - 1} + \frac{2Av}{b} (b/2x - 1), \quad (5)$$

— погонная ледовая нагрузка определяется по формуле:

$$p = p_m b \frac{1 + \bar{b}_0}{2\bar{b}_0} - 2 \left(\frac{2(1 - \bar{b}_0)}{1 + \bar{b}_0} + \ln(\bar{b}_0) \right) vA, \quad (6)$$

где $\bar{b}_0 = b_0/b$,

— значение интегрального усилия взаимодействия со льдом определяется по формуле:

$$P = \frac{4q}{3} \sqrt{2Rb \sin \beta'}, \quad (7)$$

где R — радиус скругления кромки льда;
 β' — угол наклона к вертикали нормали к борту в центре зоны контакта,

— длина эпюры ледовой нагрузки l_z определяется по формуле:

$$l_z = \frac{4}{3} \sqrt{2Rb \sin \beta'}. \quad (8)$$

Рекомендации по выбору нормативных значений параметров МДРЛ, входящих в зависимости (1) — (8), приведены в работе [10].

Расчет параметров ледовой нагрузки на основании МДРЛ осуществляется по следующему алгоритму. На первом этапе определяются приведенные к направлению удара массы судна и льдины. Здесь применяются те же расчетные зависимости, что и при использовании ГДМ удара судна о лед. На втором этапе выполняется численное решение дифференциального уравнения движения судна в направлении удара:

$$\frac{M}{C} v \frac{dv}{d\zeta} + \int_F p dF = 0, \quad (9)$$

где C — коэффициент приведения массы судна;
 v — скорость внедрения борта судна в лед;
 ζ — глубина внедрения;
 M — масса судна;
 p — контактное давление;
 F — площадь зоны контакта.

Начальные условия решения дифференциального уравнения следующие:

$$t = 0; x = 0; P = 0; v = v_0 = V_0 l,$$

где v_0 — скорость движения судна, приведенная к направлению удара;
 V_0 — скорость поступательного движения судна в момент удара;
 l — коэффициент приведения скорости к направлению удара.

При этом на каждом шаге численного интегрирования проверяется условие разрушения льда изгибом:

$$P = \frac{1,33 \sigma_u H^2}{\sin \beta'}, \quad (10)$$

где σ_u — предел прочности льда на изгиб;
 H — толщина льда;
 β' — угол наклона борта судна к вертикали.

Как только усилие взаимодействия со льдом достигает величины (10), расчет прекращается. Если этого не происходит, то расчет продолжается до тех пор, пока скорость судна в направлении удара не упадет до нуля.

При этом в процессе расчета необходимо фиксировать промежуточные параметры ледовой нагрузки: давление — p ; высоту зоны контакта — b_z ; погонную нагрузку — q ; длину зоны контакта — l_z ; суммарную силу — P_S для определения их максимальных значений.

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ МАССОВЫХ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ НОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

На основании анализа особенностей формы корпуса судов ледового плавания, приведенного в разделе 2, были сформированы сетки традиционных и современных судов ледового плавания — таблицы, определяющие главные размерения судов, коэффициенты полноты и их водоизмещение, представленные в таблицах 3 и 4. В указанных таблицах L — длина между перпендикулярами; B — ширина судна; d — расчетная осадка; D — высота борта на миделе; α_c — коэффициент полноты ватерлинии; β_c — коэффициент полноты мидель-шпангоута; Δ — расчетное водоизмещение.

Таблица 3

Сетка традиционных судов (группа 1)

№ судна	L , м	B , м	d , м	D , м	α_c	β_c	Δ , т	Относительная длина носового заострения
1	85,8	13,7	5,6	7,9	0,846	0,970	5000	0,4
2	121,2	18,7	7,3	10,6	0,853	0,971	12500	0,4
3	144,7	21,9	8,3	12,3	0,859	0,972	20000	0,4
4	163,2	24,4	9,1	13,7	0,866	0,973	27500	0,4
5	178,7	26,5	9,8	14,8	0,873	0,974	35000	0,4

Таблица 4

Сетка современных судов (группа 2)

№ судна	L , м	B , м	d , м	D , м	α_c	β_c	Δ , т	Относительная длина носового заострения
1	85,8	13,7	5,6	7,9	0,846	0,970	5000	0,2
2	121,2	18,7	7,3	10,6	0,853	0,971	12500	0,2
3	144,7	21,9	8,3	12,3	0,859	0,972	20000	0,2
4	163,2	24,4	9,1	13,7	0,866	0,973	27500	0,2
5	164,0	25,7	9,3	14,3	0,860	0,977	30000	0,2
6	178,7	26,5	9,8	14,8	0,873	0,974	35000	0,2
7	215,3	32,9	11,7	17,9	0,878	0,983	65000	0,2
8	250,6	37,8	13,3	20,4	0,896	0,987	100000	0,2
9	278,6	41,6	14,5	22,3	0,915	0,989	135000	0,2
10	302,2	44,8	15,5	23,8	0,933	0,991	170000	0,2

Для каждой группы судов установлены диапазоны изменения углов наклона ватерлинии и шпангоутов в пределах носового и кормового заострения (см. 5.1).

5. МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК

5.1. Исходные положения методики.

5.1.1. Нагрузки на носовой и кормовой районы ледового пояса.

Методика построения зависимостей для определения параметров расчетных ледовых нагрузок для конструкций судов ледового плавания, предназначенных для использования в нормативных документах Регистра, отличается от принятой при разработке аналогичных зависимостей для ледоколов [11]. Это связано с большим количеством ледовых классов и со значительно более широким диапазоном варьирования характеристик судов по массе (водоизмещению) и параметрам формы корпуса.

Для того чтобы получить достаточно точные зависимости параметров ледовых нагрузок от водоизмещения, расчеты ледовых нагрузок проводились для выделенных групп судов при пяти значениях водоизмещения:

- в диапазоне 5,0 — 35,0 тыс. т:
5,0 12,5 20,0 27,5 35,0 тыс. т,
среднее значение: 20,0 тыс. т;
- в диапазоне 5,0 — 170,0 тыс. т:
5,0 12,5 20,0 27,5 35,0 тыс. т,
среднее значение: 20,0 тыс. т;
30,0 65,0 100,0 135,0 170,0 тыс. т,
среднее значение: 100,0 тыс. т.

Для построения расчетных зависимостей, позволяющих определить параметры ледовых нагрузок, принято решение использовать аппарат планирования эксперимента. Под экспериментом понимается расчет параметров ледовой нагрузки на основе новой модели динамического разрушения льда с использованием специального программного обеспечения. Для выполнения расчетов (численных экспериментов) необходимо определить состав варьируемых параметров и диапазон их варьирования.

В качестве варьируемых параметров приняты те характеристики формы корпуса, которые определяют значения ледовых нагрузок для судна заданного водоизмещения: абсцисса точки контакта со льдом x/L относительно носового перпендикуляра, угол наклона ватерлинии α и борта β в точке контакта. Другие исходные данные: расчетные характеристики ледяного покрова, скорость движения судна, масса судна, приведенная к направлению удара, и прочее — определялись по рекомендациям, принятым в МДРЛ (см. раздел 1).

На основе анализа статистики по существующим судам ледового плавания приняты следующие диапазоны варьирования параметров:

для судов 1-й группы:

район носового заострения:

x/L : 0,0 — 0,3; $(x/L)_{\text{ср}} = 0,15$;

α : 5° — 45° ; $\alpha_{\text{ср}} = 25,0^\circ$;

β : 5° — 55° ; $\beta_{\text{ср}} = 30^\circ$;

район кормового заострения:

x/L : 0,0 — 0,2; $(x/L)_{\text{ср}} = 0,10$;

α : 5° — 65° ; $\alpha_{\text{ср}} = 35,0^\circ$;

β : 5° — 75° ; $\beta_{\text{ср}} = 40,0^\circ$;

для судов 2-й группы:

район носового заострения:

x/L : 0,0 — 0,25; $(x/L)_{\text{ср}} = 0,125$;

α : 5° — 75° ; $\alpha_{\text{ср}} = 49,0^\circ$;

β : 5° — 85° ; $\beta_{\text{ср}} = 45,0^\circ$;

район кормового заострения:

x/L : 0,0 — 0,2; $(x/L)_{\text{ср}} = 0,10$;

α : 5° — 75° ; $\alpha_{\text{ср}} = 40,0^\circ$;

β : 5° — 75° ; $\beta_{\text{ср}} = 40,0^\circ$.

Количество экспериментов и, соответственно, комбинации значений варьируемых параметров в каждом эксперименте определялись матрицей центрального композиционного планирования (ЦКП), методика формирования которой рассмотрена в работе [13]. При трех варьируемых параметрах для построения квадратичных моделей достаточно выполнить 15 экспериментов. Ниже в качестве примера показаны матрицы планирования эксперимента для расчета нагрузок на носовой район традиционного и современного судна ледового плавания (табл. 5.1, 5.2 и 6.1, 6.2). Параметр «ALFA» — это так называемое звездное плечо, которое необходимо задать согласно методике ЦКП для построения квадратичных моделей. Матрица строится с использованием кодированных значений варьируемых параметров (факторов): -1 , $+1$, $-ALFA$, $+ALFA$. Переход к натуральному значению варьируемого параметра осуществляется по формуле $\tilde{x}_i = \tilde{x}_{0i} + \Delta x_i x_i$.

Таблица 5.1

Традиционные суда ледового плавания

Варьируемые параметры (факторы)		$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
Номер фактора		1	2	3
Уровни фактора	+ ALFA	0,3000	45,000	55,000
	— ALFA	0,0000	5,000	5,000
	+ 1	0,2734	41,455	50,569
	— 1	0,0266	8,545	9,431
	0	0,1500	25,000	30,000
ALFA = 1,2154	Δx	0,1234	16,4553	20,5692

Таблица 5.2

Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Кодированные значения			Натуральные значения		
	x_1	x_2	x_3	$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
1	—1	—1	—1	0,0266	8,545	9,431
2	1	—1	—1	0,2734	8,545	9,431
3	—1	1	—1	0,0266	41,455	9,431
4	1	1	—1	0,2734	41,455	9,431
5	—1	—1	1	0,0266	8,545	50,569
6	1	—1	1	0,2734	8,545	50,569
7	—1	1	1	0,0266	41,455	50,569
8	1	1	1	0,2734	41,455	50,569
9	—1,2154	0	0	0,0000	25,000	30,000
10	1,2154	0	0	0,3000	25,000	30,000
11	0	—1,2154	0	0,1500	5,000	30,000
12	0	1,2154	0	0,1500	45,000	30,000
13	0	0	—1,2154	0,1500	25,000	5,000
14	0	0	1,2154	0,1500	25,000	55,000
15	0	0	0	0,1500	25,000	30,000

Таблица 6.1

Современные суда ледового плавания

Варьируемые параметры (факторы)		$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
Номер фактора		1	2	3
Уровни фактора	+ ALFA	0,2500	75,000	85,000
	– ALFA	0,0000	5,000	5,000
	+ 1	0,2278	68,797	77,911
	– 1	0,0222	11,203	12,089
	0	0,1250	40,000	45,000
ALFA = 1,2154	Δx	0,1028	28,7968	32,9107

Таблица 6.2

Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Кодированные значения			Натуральные значения		
	x_1	x_2	x_3	$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
1	– 1	– 1	– 1	0,0222	11,203	12,089
2	1	– 1	– 1	0,2278	11,203	12,089
3	– 1	1	– 1	0,0222	68,797	12,089
4	1	1	– 1	0,2278	68,797	12,089
5	– 1	– 1	1	0,0222	11,203	77,911
6	1	– 1	1	0,2278	11,203	77,911
7	– 1	1	1	0,0222	68,797	77,911
8	1	1	1	0,2278	68,797	77,911
9	– 1,2154	0	0	0,0000	40,000	45,000
10	1,2154	0	0	0,2500	40,000	45,000
11	0	– 1,2154	0	0,1250	5,000	45,000
12	0	1,2154	0	0,1250	75,000	45,000
13	0	0	– 1,2154	0,1250	40,000	5,000
14	0	0	1,2154	0,1250	40,000	85,000
15	0	0	0	0,1250	40,000	45,000

При построении расчетных зависимостей принято решение учесть практически все допустимые расчетные режимы эксплуатации судов, определяемые кривыми базовых опасных режимов движения (БОРД). Принятые расчетные точки режимов движения показаны на рис. 11. Расчеты параметров ледовых нагрузок на район носового заострения выполнялись для режимов, регламентируемых 1, 6 и 10 точками кривых БОРД. Точка 1 определяет режим движения с наибольшей допустимой скоростью во льдах наименьшей для класса толщины. Точка 10 определяет режим движения с наименьшей допустимой скоростью во льдах наибольшей для класса толщины. Точка 6 определяет некоторый средний режим, который был принят в качестве нормативного при разработке требований к ледовым усилениям в действующих Правилах Регистра. Были выполнены специальные исследования, показавшие, что при этом режиме расчетные значения параметров ледовой нагрузки, определяемых по новой МДРЛ, достаточно хорошо согласуются с соответствующими величинами действующих Правил, определяемыми по гидродинамической модели (ГДМ) взаимодействия корпуса судна со льдом.

Дополнительная особенность предложенной методики связана с принципом учета разрушения льда от изгиба. Принято допущение, учитывающее определенную условность модели разрушения льда от изгиба [14, 15]: при толщине более ≈ 3 м лед считается не разрушаемым от изгиба; при меньших толщинах льда разрушение от изгиба учитывается. В соответствии с таким подходом учет разрушения льда определяется следующей матрицей признаков («+» — учитывается, «–» — не учитывается).

При построении расчетных зависимостей должно обеспечиваться соответствие расчетных значений погонной нагрузки, контактного давления и суммарной силы, определяемых по новой МДРЛ, и их значений, определяемых с использованием предлагаемых приближенных зависимостей для p , b_z , l_z .

Кроме того, параметры расчетных ледовых нагрузок для класса и района ледовых усиления должны коррелировать с соответствующими характеристиками, регламентируемыми действующими Правилами Регистра. Это удастся обеспечить за счет редуцирования значений (подбора соответствующих значений) высоты зоны контакта, а также средних базовых значений контактного давления, погонной нагрузки, суммарной силы с учетом результатов расчета параметров ледовой нагрузки для конкретных судов ледового плавания.

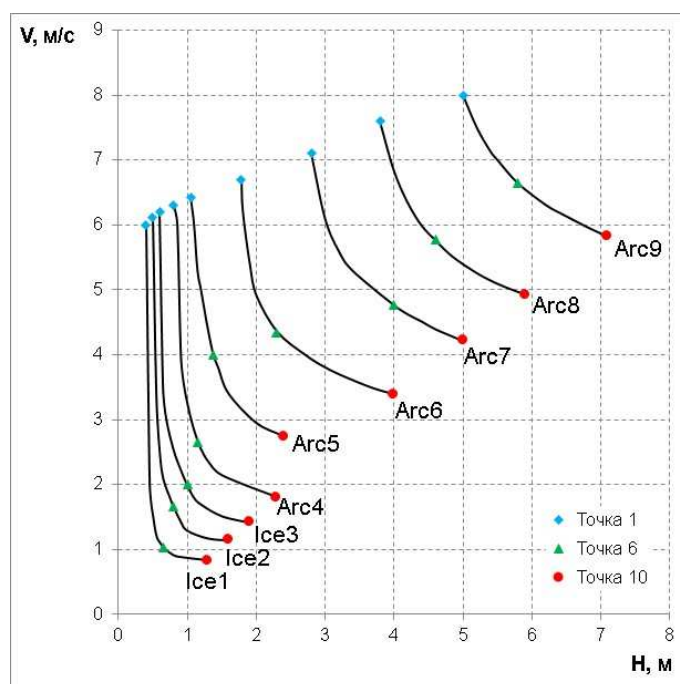


Рис. 11. Кривые базовых опасных режимов движения (БОРД)

Таблица 7

Матрица признаков учета разрушения льда от изгиба

Категория ледовых усилений	Номер точки кривой БОРД		
	1	6	10
Ice1	+	+	+
Ice2	+	+	+
Ice3	+	+	+
Arc4	+	+	+
Arc5	+	+	+
Arc6	+	—	—
Arc7	—	—	—
Arc8	—	—	—
Arc9	—	—	—

5.1.2. Нагрузки на средний район ледового пояса.

Структура расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений в среднем районе ледовых усилений, используемых в действующих Правилах Регистра [1], позволяет сделать вывод, что они основаны на гидродинамической модели ударного взаимодействия корпуса судна со льдом.

При разработке этих рекомендаций предполагалось, что ударное взаимодействие со льдом возможно при маневрировании и циркуляции судов во льдах. При этом рассматривался удар бортом в среднем районе ледовых усилений о льдину конечной массы при наличии дополнительных составляющих скорости от дрейфа и вращения судна. Крен судна, возникающий при этом, также учитывается при определении контактных усилий. При нормальных условиях эксплуатации циркуляция и маневрирование обычно выполняется при толщине льда порядка 50 — 75 % от максимальной по условиям ледовой ходкости. Скорость судна на циркуляции не превосходит 65 — 80% достижимой технической скорости на чистой воде, которая принимается (0,85 — 0,90) от спецификационной скорости судна [16]. Расчетные оценки с использованием программного комплекса IceStar¹ показывают, что расчетные нагрузки на конструкции ледового пояса в средней части судна составляют 0,5 — 0,6 от расчетных предельных нагрузок на обшивку и набор в среднем районе ледового пояса, принятых в действующих Правилах Регистра. Это соответствует соотношению между предельными нагрузками и нагрузками фибровой текучести.

¹Программный комплекс IceStar разработан специалистами СП6ГМТУ и «Бюро Веритас» и прошел достаточно обстоятельное тестирование применительно к реальным существующим и перспективным судам ледового плавания.

В рассматриваемой методике определения нагрузок на средний район ледового пояса предлагается сохранить уровень расчетных нагрузок с небольшими изменениями в плане учета влияния массы судна на ударные нагрузки при маневрировании и циркуляции судна. Степень влияния массы судна на величину расчетного давления может быть несколько снижена и предварительно принята на основе анализа результатов расчета нагрузок на носовой район ледового пояса с использованием новой модели:

$$p_{BI} = 1200a_3(\Delta/(1000))^{n_p},$$

где a_3 — коэффициент, принимаемый согласно п. 3.10.3.2.3 требований Правил Регистра [1],

n_p — показатель степенной зависимости от водоизмещения, соответствует значению для носового района.

Высоту распределения в среднем районе предлагается назначать с учетом особенностей эксплуатации судна при циркуляции и маневрировании и назначать как 0,75 от допускаемой для ледового класса, регламентируемой Правилами Регистра (Ч. I «Классификация» [17]).

5.2. Алгоритм построения расчетных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок на носовой и кормовой районы ледового пояса.

Алгоритм построения расчетных зависимостей сводится к следующей последовательности действий.

1. Выполнение расчетов параметров ледовой нагрузки с использованием новой МДРЛ и разработанного программного обеспечения: контактного давления — p , погонной нагрузки — q ; высоты зоны контакта — b_z ; длины зоны контакта — l_z ; суммарной контактного усилия — P_S .

Расчеты выполняются для всех ледовых классов в соответствии с матрицей планирования, определяющей значения варьируемых параметров формы корпуса, для пяти значений водоизмещения и трех расчетных режимов (1, 6, 10), определяемых кривой БОРД (рис. 11).

2. Выполнение с использованием новой МДРЛ и разработанного программного обеспечения расчетов максимальных значений параметров ледовой нагрузки для каждого эксперимента и построение огибающих с учетом результатов расчета для каждого из трех режимов.

Ниже в табл. 8 в качестве примера приведены результаты расчета контактного давления для судна водоизмещением 20 тыс. т с традиционной формой корпуса и категорией усиления Arc7. Расчеты показывают, что в разных экспериментах максимальное давление может соответствовать как точке 10, так и точкам 1 и 6. Это подтверждает правильность принятого методического подхода. Огибающая $p_{\max}$ показана на рис. 12.

Таблица 8

№ эксперимента	Номер точки кривой БОРД			$p_{\max}$
	1	6	10	
1	2,872	4,470	4,928	4,928
2	3,202	4,429	4,888	4,888
3	5,876	4,801	4,687	5,876
4	5,909	4,915	4,910	5,909
5	4,951	4,030	4,015	4,951
6	4,737	4,629	4,519	4,737
7	6,181	6,636	7,143	7,143
8	5,937	6,355	6,861	6,861
9	5,724	6,177	6,671	6,671
10	3,954	5,588	6,065	6,065
11	3,933	4,395	4,240	4,395
12	5,503	3,493	6,425	6,425
13	4,909	4,241	4,233	4,909
14	5,656	6,092	6,558	6,558
15	3,587	5,834	6,319	6,319
Среднее	4,862	5,072	5,498	5,776

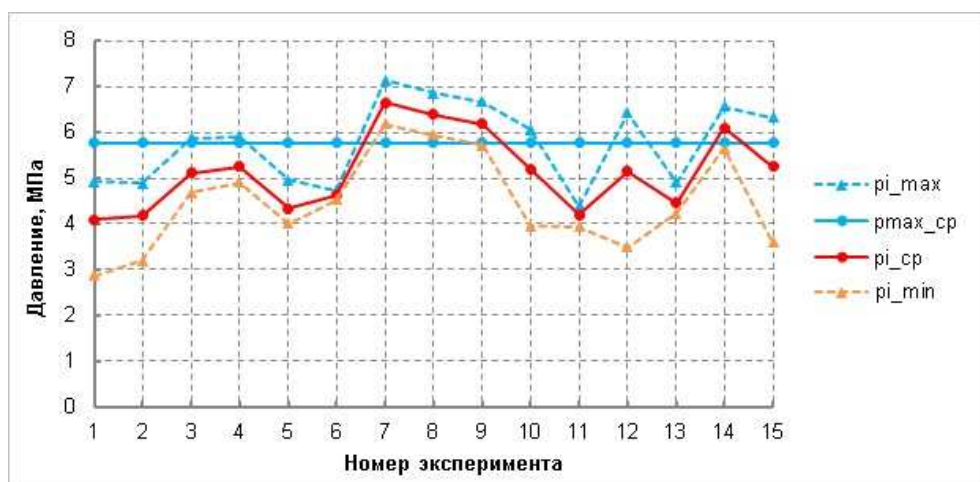


Рис. 12. Результаты расчетов контактного давления для судна водоизмещением 20 тыс. т с традиционной формой корпуса и категорией усилений Arc7:

p_{i_max} — максимальное давление для i -го эксперимента по результатам расчета для трех точек БОРД (огibaющая);

p_{max_cp} — среднее максимальное давление по всем экспериментам (среднее давление для носового заострения);

p_{i_cp} — среднее давление для i -го эксперимента по результатам расчета для трех точек БОРД;

p_{i_min} — минимальное давление для i -го эксперимента по результатам расчета для трех точек БОРД

Аналогичные расчеты выполняются для каждой группы судов, для каждого ледового класса в пределах группы, для пяти значений водоизмещения, для всех параметров ледовой нагрузки: контактного давления — p , погонной нагрузки — q ; высоты зоны контакта — b_z ; длины зоны контакта — l_z ; суммарной контактного усилия — P_S .

3. Обработка результатов расчетов (предварительная).

3.1. Согласование значений погонной нагрузки, контактного давления и высоты зоны контакта.

Для каждого i -го эксперимента определяются значения высоты зоны контакта из условия $b_i = q_{i_max}/p_{i_max}$. Таким образом обеспечивается согласование максимальных значений погонной нагрузки и давлений, определенных по трем точкам кривой БОРД (огibaющих) для каждого эксперимента. Эти значения несколько отличаются от максимальных значений $b_{i_max} = \max\{b_{ij}\}$; $j = 1, \dots, 3$, определенных по результатам расчетов для трех точек БОРД.

3.2. Корректировка расчетных значений высоты зоны контакта.

Корректировка значений расчетной высоты зоны контакта осуществляется для исключения влияния несовершенства упрощенной эмпирической модели «кривая давление — площадь» (pressure — area curve) $p = f(A)$, используемой в алгоритме МДРЛ. В рамках корректировки зависимость $b_{z_i}(\Delta)$ «поворачивается» относительно среднего (базового) значения водоизмещения Δ_0 для заданной группы судов. В качестве примера в табл. 9 и на рис. 13, 14 представлены результаты корректировки расчетных значений высоты зоны контакта и контактных давлений применительно к средним значениям по всем экспериментам для судна водоизмещением 20 тыс. т с традиционной формой корпуса и категорией усилений Arc7.

Таблица 9

Исходные и скорректированные значения высоты зоны контакта и контактных давлений

Δ	5000	12500	20000	27500	35000
$b_{z_i} = q/p$	0,867	1,210	1,376	1,493	1,601
$b_{z_corr} = 0,5(b_{z_i}(\Delta)/b_{z_i}(20))$	1,122	1,293	1,376	1,435	1,489
p_{max} (сред)	6,516	5,962	5,776	5,697	5,602
$p_{max_corr} = q/b_{z_corr}$	4,759	5,443	5,776	5,997	6,129

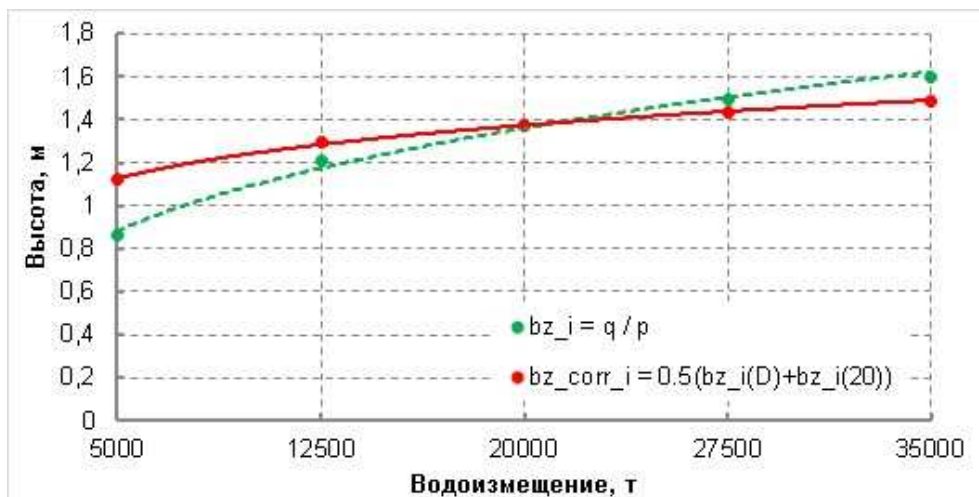


Рис. 13. Исходные и скорректированные значения высоты зоны контакта

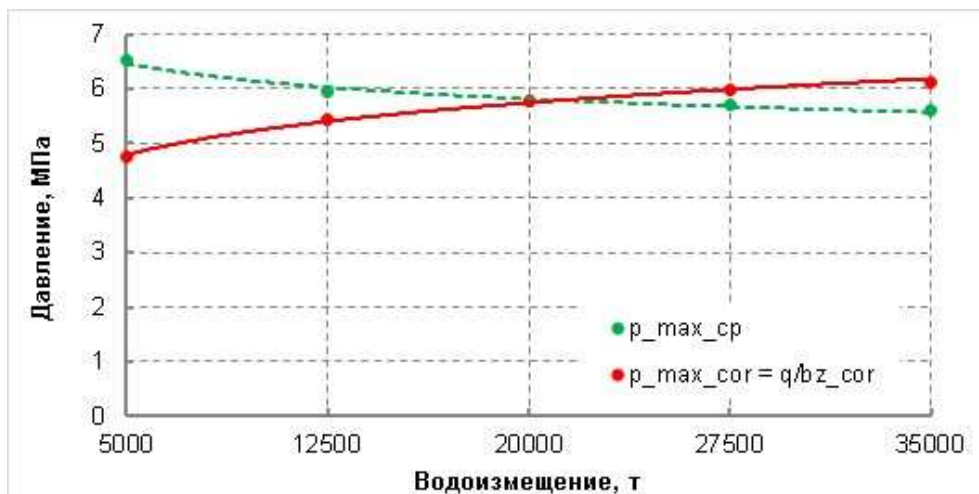


Рис. 14. Исходные и скорректированные значения контактного давления

3.3. Построение регрессионных зависимостей, определяющих среднестатистическую связь параметров ледовых нагрузок с параметрами формы корпуса судна.

Для построения регрессионных зависимостей используется аппарат аппроксимации метода планирования эксперимента (см. выше). Для решения этой задачи используется программный комплекс «Полином», разработанный на кафедре конструкции судов СПбГМТУ [18].

В качестве анализируемых величин, для которых строятся регрессионные формулы, приняты относительные значения:

погонной нагрузки $\bar{q}_i(\Delta) = q_i(\Delta)/q_{cp}(\Delta)$;

давления $\bar{p}_{corr_i}(\Delta) = p_{corr_i}(\Delta)/p_{corr_cp}(\Delta)$;

высоты зоны контакта $\bar{b}_{z_corr_i}(\Delta) = b_{z_corr_i}(\Delta)/b_{z_corr_cp}(\Delta)$.

В результате обработки этих величин при помощи ПК «Полином» строятся регрессионные зависимости вида:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{j>i=1}^k b_{ij} x_i x_j,$$

где x_i — варьируемые переменные;

$i = 1, \dots, k$;

b_0, b_i — коэффициенты регрессии.

Анализ показывает, что коэффициенты регрессии для разных значений водоизмещения несколько различаются, но с достаточной точностью можно принимать их значения для среднего базового значения водоизмещения. Кроме того, для дальнейшего построения расчетных зависимостей можно усреднять значения коэффициентов регрессии в пределах выделенных групп классов: Ice1 — Ice3; Arc4 — Arc5; Arc6; Arc7 — Arc9.

3.4. Построение среднестатистических зависимостей для референсного (базового) значения параметров ледовой нагрузки.

Пример построения таких зависимостей показан ниже в табл. 10 и на рис. 15 для судов с категорией ледовых усилений Arc6 — Arc9.

Таблица 10

Определение коэффициентов аппроксимирующих функций (Arc6 — Arc9)

Δ тыс. т	$c(\Delta)$				$c(\Delta)$ среднее
	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9	
5	0,815	0,824	0,840	0,843	0,830
12,5	0,935	0,942	0,939	0,943	0,940
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
27,5	1,054	1,038	1,041	1,036	1,042
35	1,091	1,061	1,066	1,071	1,072
Коэффициенты аппроксимирующей функции		$a = 0,672$ $n = 0,132$			

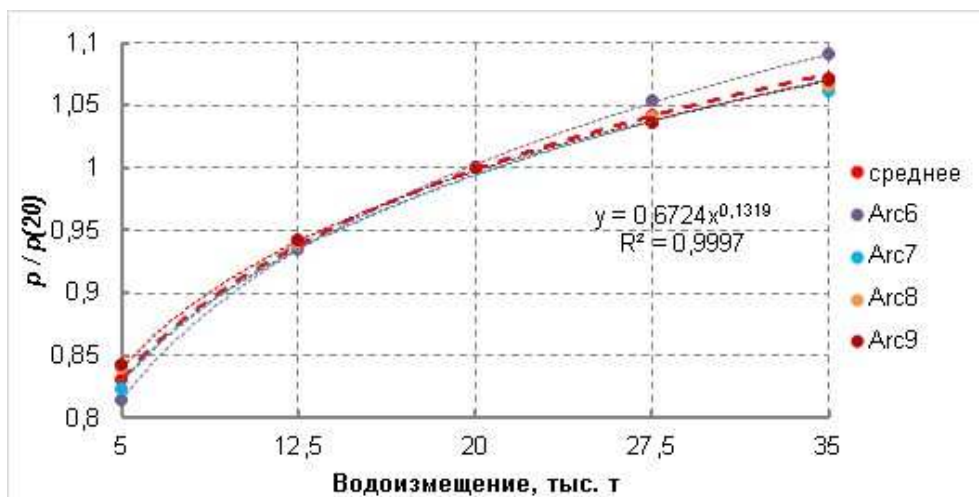


Рис. 15. Построение среднестатистических зависимостей для референсного (базового) значения параметров ледовой нагрузки (к табл. 10)

3.5. Построение расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок.

Расчетные зависимости для определения параметров ледовых нагрузок представляются в следующей общей форме:

$$Y = Y_{ref}(IC) C_Y(\Delta) f_Y(x/L, \alpha, \beta), \quad (11)$$

где: $Y_{ref}(IC)$ — референсное (базовое) значение соответствующего параметра нагрузки, зависящее от ледового класса судна;
 $C_Y(\Delta) = a_Y (\Delta/1000)^{n_Y}$ — функция, определяющая влияние водоизмещения; коэффициенты аппроксимирующей функции a_Y и n_Y для разных групп судов;
 $f_Y(x/L, \alpha, \beta)$ — функции, определяющие влияние формы корпуса в расчетном сечении по длине судна (функции формы), представленные в виде квадратичных регрессий.

3.6. Настройка расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов.

Расчетные зависимости (формулы) для определения параметров ледовых нагрузок включают составляющие, определяемые с той или иной степенью точности. Это может приводить к некоторым отклонениям величин, определяемых по формуле и прямым расчетом с использованием разработанного программного обеспечения.

Результаты исследования показывают, что аппроксимация функций формы квадратичными регрессиями в диапазонах изменения параметров существующих и перспективных судов обеспечивает достаточную точность предсказания истинного значения параметра ледовой нагрузки, определяемого с использованием программного комплекса.

В связи с этим оценка адекватности построенных расчетных зависимостей выполняется на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов.

Настройка расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов выполнялась в соответствии со следующим алгоритмом:

- расчет параметров ледовых нагрузок по требованиям действующих Правил и с использованием расчетных зависимостей, построенных на основе новой МДРЛ. При этом рассматривается несколько реальных проектов судов ледового плавания, попадающих в рассматриваемую группу по классу и по водоизмещению;
- построение и сглаживание кривых, характеризующих изменение базисных значений погонной нагрузки и расчетного давления. Для этого осуществляется диалоговый подбор базисных значений в общем случае для каждого класса.

Для упрощения согласования полезно построить кривую относительных значений базовых величин, которые могут рассматриваться как классификационные кривые. На рис. 16 показаны примеры соответствующих классификационных кривых — кривых относительных значений базовых величин погонной нагрузки (синие диаграммы) и кривых относительных значений базовых величин контактного давления (красные диаграммы) для судов арктических классов.

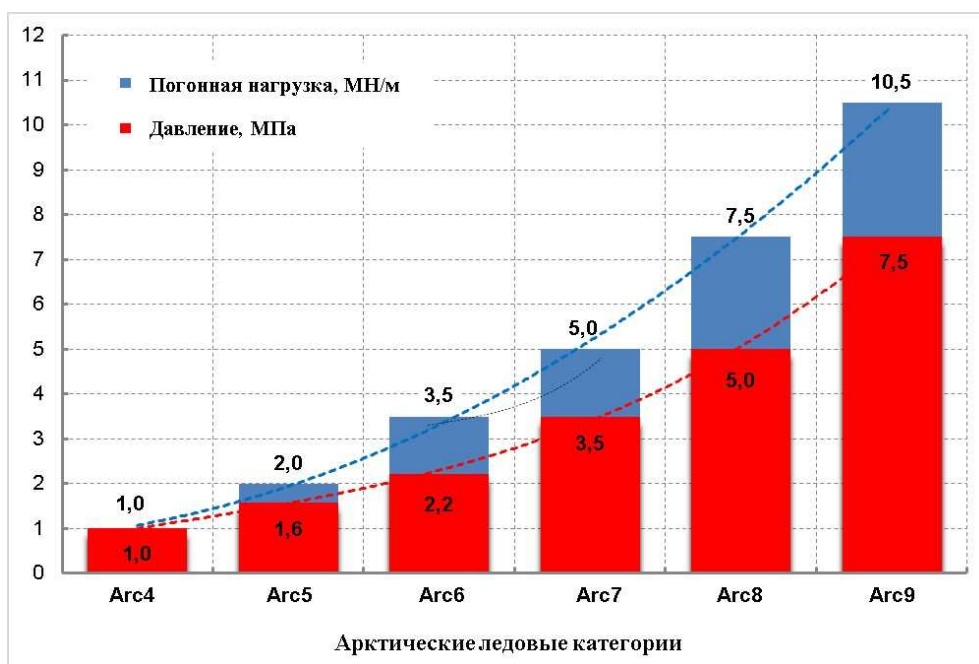


Рис. 16. Классификационные кривые погонной нагрузки и контактного давления

Классификационная кривая контактного давления характеризует соотношение прочности конструкций ледовых усилениях наружной обшивки, а классификационная кривая погонной нагрузки характеризует соотношение прочности конструкций ледовых усилениях набора ледового пояса. За базовые классификационные значения приняты относительные базовые величины погонной нагрузки и давления для класса Arc4.

6. ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК

Практическая апробация построенных зависимостей для определения ледовых нагрузок выполнена на примере танкера ледового класса проекта 125. Судно проекта 125 является челночным танкером дедвейтом 120 тыс. т, предназначенным для самостоятельной эксплуатации в арктических условиях. Корпус судна имеет категорию ледовых усиления Arc7.

На рис. 17 — 20 приведено сопоставление ледового давления, погонной нагрузки, высоты и длины распределения для танкера проекта 125 на основании требований действующих Правил Регистра и разработанных предложений. Графики, представленные на указанных рисунках, показывают, что разработанные предложения приводят к снижению расчетного ледового давления в носовом районе на 28 %, в промежуточном на 2 %, в среднем на 19 %, а в кормовом районе на 30 % относительно требований действующих Правил. Значения расчетной высоты распределения в носовом и среднем районах снизятся на 7 % и 11 % соответственно, а в промежуточном и кормовом увеличатся на 9 % и 5 % соответственно. Такие изменения давления и высоты распределения приведут к тому, что погонная нагрузка в носовом, среднем и кормовом районах снизится на 38 %, 32 % и 24 % соответственно, а в промежуточном районе увеличится на 7 %.

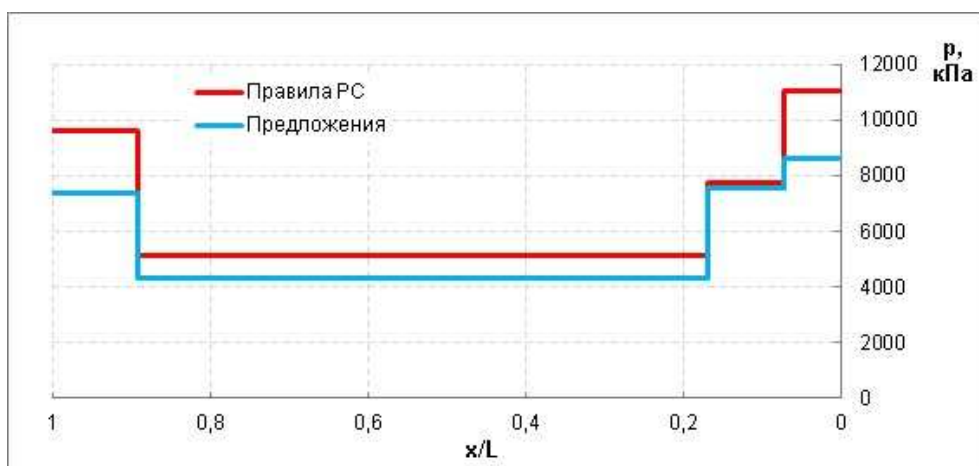


Рис. 17. Сопоставление ледового давления, кПа, по действующим Правилам и разработанным предложениям

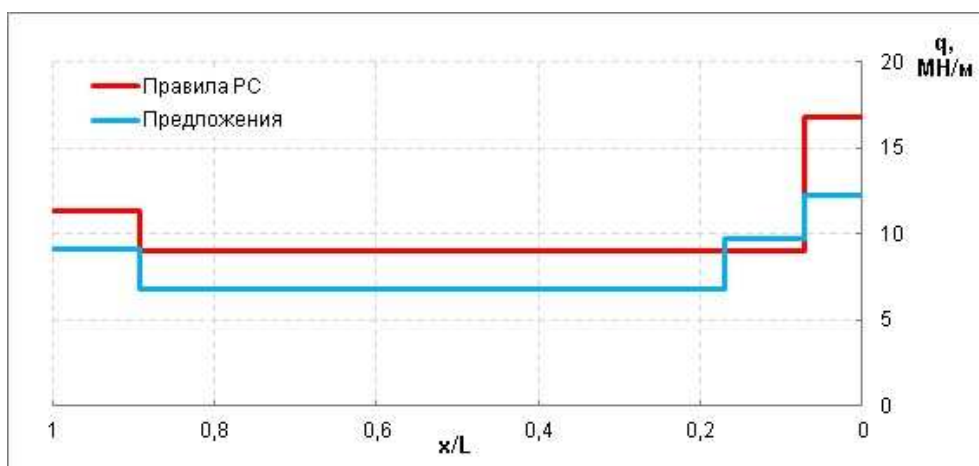


Рис. 18. Сопоставление погонной нагрузки, МН/м, по действующим Правилам и разработанным предложениям

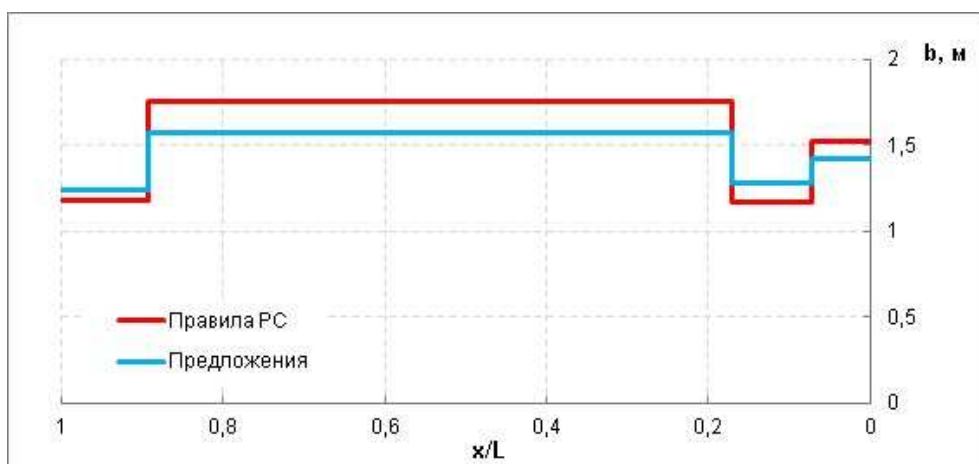


Рис. 19. Сопоставление высоты распределения, м, по действующим Правилам и разработанным предложениям

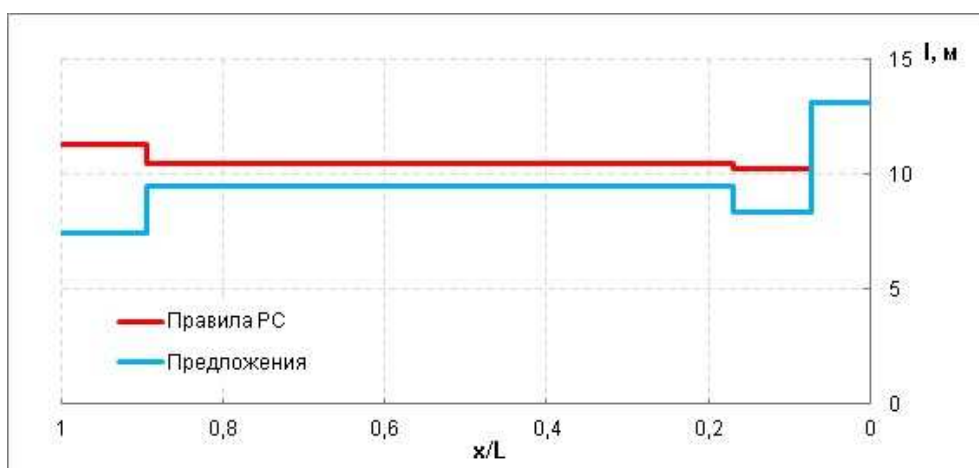


Рис. 20. Сопоставление длины распределения, м, по действующим Правилам и разработанным предложениям

В табл. 11 и 12 соответственно приведено сравнение толщины наружной обшивки и профилей балок основного набора для трех зон района А ледовых усиления танкера проекта 125 для ледовых нагрузок по действующим Правилам Регистра и разработанным предложениям.

Таблица 11

Толщина наружной обшивки, мм, в районе А ледовых усиления

	Нос — шп. 230, Z=14,16 м	Нос — шп. 230, Z=12,14 м	Нос — шп. 230, Z=10,12 м
Правила РС	42	44	40
Предложения	38	39	36

Таблица 12

Балки основного набора в районе А ледовых усиления

		Нос — шп. 230, Z=14,16 м	Нос — шп. 230, Z=12,14 м	Нос — шп. 230, Z=10,12 м
Правила РС	№ профиля Прис. пояска	350 × 38 42/580	350 × 38 44/612	320 × 36 40/52
Предложения	№ профиля Прис. пояска	320 × 28 38/580	320 × 30 39/612	300 × 28 36/520

Полученные оценки для танкера проекта 125 и судов других проектов, рассмотренных при разработке новых зависимостей, позволяют сделать вывод, что переход на новую МДРЛ для определения расчетных ледовых нагрузок обеспечивает снижение металлоемкости конструкций ледовых усилений до 10 — 15 % для перспективных крупнотоннажных транспортных судов и судов высших ледовых категорий.

На основе результатов исследований, которые представлены в настоящей статье, разработаны предложения по корректировке требований 3.10.3.2 Правил Регистра [1]. Предложения сводятся к изменению расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок. Предлагается их определять по формулам типа (11), в которых функции, определяющие влияние формы корпуса в расчетном сечении по длине судна (функции формы), представляются в виде квадратичных регрессий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методика и алгоритм построения расчетных зависимостей для определения параметров расчетной ледовой нагрузки на конструкции корпуса судов ледового плавания, основанные на результатах массовых расчетов в рамках представительной совокупности (сетки) судов с использованием новой модели динамического разрушения льда.

Выполнены сопоставительные расчеты параметров ледовой нагрузки, полученных с использованием разработанной системы зависимостей и требований п. 3.10.3.2 действующих Правил Регистра.

Разработаны предложения по корректировке требований Правил Регистра в части определения параметров ледовой нагрузки для судов ледового плавания (п. 3.10.3.2) на основании построенных зависимостей с использованием разработанного алгоритма и результатов прямых расчетов для реальных проектов судов на основании новой модели динамического разрушения льда.

При переходе к новой системе расчетных зависимостей при сохранении общего уровня требований к ледовой прочности транспортных судов достигается снижение ледовых нагрузок и соответственно металлоемкости ледовых усилений для перспективных крупнотоннажных судов и судов высших ледовых категорий.

В процессе выполнения работы также подготовлено специализированное программное обеспечение, которое может быть использовано в практике Регистра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II «Корпус» / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
2. Курдюмов В.А. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед / В.А. Курдюмов, Д.Е. Хейсин // Прикладная механика. — 1976. — Т. 12. — № 10. — С. 103 — 109.
3. Timco G.W. Drop impact tests on freshwater ice: spherical head / G.W. Timco, R.M.W. Frederking // Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium. Vol. 11. Espoo, Finland, Aug. 20 — 23, 1990. — P. 776 — 787.
4. Timco G.W. Laboratory impact tests on freshwater ice / G.W. Timco, R.M.W. Frederking // Cold Region Science and Technology. — 1993. — Vol. 22. — P. 77 — 97.
5. Frederking R.M.W. Field tests of ice indentation of medium scale Hobson's choice ice island / R.M.W. Frederking, I.J. Jordaen, J.S. McCallum // Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium. Vol. 11. Espoo, Finland, Aug. 20 — 23, 1990. — P. 931 — 944.
6. Ritch R. Ice load impact measurements on the CCGS Louis S. St. Laurent during the 1994 Arctic Ocean crossing / R. Ritch, J. St. John, R. Browne, R. Sheinberg // Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. July 11 — 16, 1999, St. John's Newfoundland. — Paper OMAE99/P&A-1141.
7. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации / Е.М. Апполонов. СПб.: СПбГМТУ, 2016. — 288 с.
8. Апполонов Е.М. Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок / Е.М. Апполонов, А.В. Дидковский, М.А. Кутейников, А.Б. Нестеров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 25. — С. 83 — 100.
9. Апполонов Е.М. Совершенствование требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Т. 3, № 385. — С. 18 — 28.
10. Апполонов Е.М. Новая модель динамического разрушения льда как основа для совершенствования требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — Т. 4, № 390. — С. 99 — 116.
11. Платонов В.В. Методические основы разработки расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений ледоколов, основанных на новой модели динамического разрушения льда / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62/63. — С. 78 — 88.

12. Платонов В.В. Методика расчета допустимых скоростей движения судна во льдах на основе новой модели динамического разрушения льда / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин, В.С. Мороз // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 52 — 62.
13. Платонов В.В. Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус современных судов ледового плавания в носовом и кормовом районах / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 83 — 98.
14. Каштелян В.И. Приближенное определение усилий, разрушающих ледяной покров / В.И. Каштелян // Проблемы Арктики и Антарктики: сб. ст. — Л.: Морской транспорт, 1960. — Вып. 5. — С. 31 — 38.
15. Хейсин Д.Е. Прочность ледяного поля под действием нагрузки, приложенной к его кромке / Д.Е. Хейсин // Современные вопросы ледоколостроения: сб. ст. Л.: Морской транспорт, 1960. — С. 133 — 152. (Труды ААНИИ. Т. 237.)
16. Рылин А.Я. Испытание судов во льдах / А.Я. Рылин, Д.Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
17. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. I «Классификация» / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
18. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: дис. ... д-ра техн. наук. Разд. 3.2. Применение аппарата планирования эксперимента при автоматизированном проектировании конструкций корпуса судна / В.Н. Тряскин. — 2007. — С. 143 — 179.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. 2024.
2. Kurdyumov V.A., Kheisin D.E. Hydrodynamic model of the impact of a solid on ice. *Soviet Applied Mechanics*. 1976. Vol. 12. № 10. P. 1063 — 1068.
3. Timco G.W., Frederking R.M.W. Drop impact tests on freshwater ice: spherical head. *Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium*. Vol. 11. Espoo, Finland, Aug. 20 — 23, 1990. P. 776 — 787.
4. Timco G.W., Frederking R.M.W. Laboratory impact tests on freshwater ice. *Cold Region Science and Technology*. 1993. Vol. 22. P. 77 — 97.
5. Frederking R.M.W., Jordaan I.J., McCallum J.S. Field tests of ice indentation of medium scale Hobson's choice ice island. *Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium*. Vol. 11. Espoo, Finland, Aug. 20 — 23, 1990. P. 931 — 944.
6. Ritch R, St. John J., Browne R., Sheinberg R. Ice load impact measurements on the CCGS Louis S. St. Laurent during the 1994 Arctic Ocean crossing. *Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. July 11 — 16, 1999, St. John's Newfoundland. Paper OMAE99/P&A-1141.
7. Appolonov E.M. Ledovaya prochnost' sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoi arkticheskoi navigatsii [Ice strength of ships designed for year-round Arctic navigation]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2016. 288 p.
8. Appolonov E.M., Didkovskii A.V., Kuteinikov M.A., Nesterov A.B. Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya ledovykh nagruzok [Improving the methodology for determining ice loads]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2002. No. 25. P. 83 — 100.
9. Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Improvement of RMRS ice strengthening requirements for ice class vessels and icebreakers. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018. Vol. 3. No. 385. — P. 18 — 28. (In Russ.)
10. Appolonov E.M., Platonov V.V. New model of dynamic ice failure as basis for improvement of RS requirements to ice belts of ice-going ships and icebreakers. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Vol. 4. No. 390. P. 99 — 116. (In Russ.)
11. Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodological basis for the calculation of ice loads acting on the icebreaker hull based on a new model of ice dynamic fracture. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 62/63. P. 78 — 88. (In Russ.)
12. Platonov V.V., Tryaskin V.N., Moroz V.S. The method for determination of permissible speeds of ice-going ships based on a new model of dynamic ice destruction. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 52 — 62. (In Russ.)
13. Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodological basis for determining the design ice loads on the hull of modern ice vessels in the bow and stern areas. *The Arctic: Ecology and Economics*. 2019. No. 4 (36). P. 83 — 98. (In Russ.)
14. Kashatelyan V.I. Priblizhennoe opredelenie usilii, razrushayushchikh ledyanoi pokrov [An approximate definition of the forces that destroy the ice sheet]. *Problemy Arktiki i Antarkiki [Problems of the Arctic and Antarctic: collection of articles]*. Leningrad: Morskoi transport, 1960. Issue 5. P. 31 — 38.
15. Kheisin D.E. Prochnost' ledyanogo polya pod deistviem nagruzki, prilozhennoi k ego kromke [The strength of the ice field under the action of a load applied at the edge]. *Modern Issues of Icebreaking*. Leningrad: Morskoi transport, 1960. P. 133 — 152. (Transactions of the Arctic Research Institute. T. 237.)
16. Rylin A.Ya., Kheisin D.E. Ispytanie sudov vo l'dah [Ice trials of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1980. 208 p.
17. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification. / Russian Maritime Register of Shipping. 2025.
18. Tryaskin V.N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruktsiy korpusa sudna. Razdel 3.2 [Methodology of computer-aided design of ship hull structures. Part 3.2.: DSc thesis]. St. Petersburg, 2007.

УДК: 629.123
EDN QIERWU

РАЗРАБОТКА ДИАГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБОРА БОРТОВЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ СУДОВ С ШИРОКИМ РАСКРЫТИЕМ ПАЛУБЫ

Т.А. Макарова, ассистент, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: makarova_tanya_2000@mail.ru

Суда с широким раскрытием палубы, в частности контейнеровозы, играют существенную роль в современной морской логистике и транспортировке грузов. Однако разработка и эксплуатация этих судов сопряжены с рядом технических сложностей, таких как проблемы прочности и жесткости корпусов. Традиционные системы набора перекрытий формируют каркас из брусев, пересекающихся под прямыми или близкими к ним углами, что создает систему прямоугольных рамок. Такие рамки обладают относительно низкой жесткостью при сдвиговых деформациях, возникающих при кручении корпуса судна.

В этом контексте актуальность работы обусловлена предложением увеличить сдвиговую жесткость перекрытий корпуса введением в набор перекрытий диагональных элементов. Такую систему набора можно назвать диагональной. Она превращает прямоугольные рамки в треугольные, значительно увеличивая их сопротивление сдвигу.

Работа направлена на разработку диагональной системы набора бортового перекрытия на судах с широким раскрытием палубы для обеспечения жесткости и прочности корпуса в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: диагональные элементы набора, кручение корпуса судна, конструкция бортового перекрытия, вес элементов набора, прочность и жесткость перекрытия при кручении, узел соединения рамных балок, метод конечных элементов.

Для цитирования: Макарова Т.А. Разработка диагональной системы набора бортовых перекрытий судов с широким раскрытием палубы / Т.А. Макарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 96 — 110. — EDN QIERWU.

DEVELOPMENT OF A DIAGONAL FRAMING SYSTEM FOR THE SIDE PLATING ON SHIPS WITH A WIDE DECK OPENING

T.A. Makarova, Assistant, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: makarova_tanya_2000@mail.ru

Ships with wide deck openings play a crucial role in modern maritime logistics and cargo transportation. However, the design and operation of such vessels are associated with several technical challenges, including issues related to the strength and rigidity of their hulls. Traditional deck framing systems form a structure consisting of beams intersecting at right or nearly right angles, creating a system of rectangular frames. These frames exhibit relatively low stiffness under shear deformations that occur during hull torsion.

In this context, the relevance of the work is determined by the proposal to increase the shear stiffness of the hull plating by introducing diagonal elements into the framing system. Such a framing system can be referred to as diagonal. It transforms rectangular frames into triangular ones, significantly enhancing their resistance to shear.

The work is aimed at developing a diagonal framing system for the side plating on ships with wide deck openings, ensuring stiffness and strength in accordance with the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: ship hull torsion, diagonal framing elements, side plating structure, framing element weight, plating strength and stiffness under torsion, frame beam connection node, finite element method.

For citation: Makarova T.A. Development of a diagonal framing system for the side plating on ships with a wide deck opening. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 96 — 110. EDN QIERWU. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Суда с широким раскрытием палубы, такие как контейнеровозы, занимают важное место в современной морской логистике. Однако их проектирование и эксплуатация сопряжены с рядом технических сложностей, особенно в части обеспечения прочности и жесткости корпуса.

С точки зрения строительной механики, корпус судна с широким раскрытием палубы 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, каким является, например, корпус танкера.

Анализ данных о повреждениях конструкций судов с широким раскрытием палубы позволяет констатировать, что основной причиной их возникновения является низкая сдвиговая жесткость перекрытий и корпуса в целом при кручении. В результате наблюдаются повреждения узлов корпусных конструкций, разрушение замков люковых закрытий и, как следствие, разгерметизация трюмов.

Существующие системы набора перекрытий предопределяют каркас корпуса, состоящий из брусев, пересекающихся под прямыми или близкими к ним углами. Этот каркас, представляющий собой систему прямоугольных рам, имеет относительно низкую жесткость при сдвиговых деформациях перекрытий корпуса судна, возникающих при его кручении. Это связано с тем, что при сдвиге брусья каркаса работают на изгиб. При этом их изгиб происходит в плоскости перекрытия, в которой их сечения обладают минимальной изгибной жесткостью.

В этом контексте актуальность работы обусловлена предложением увеличить сдвиговую жесткость перекрытий корпуса введением в их набор диагональных элементов. Такую систему набора можно назвать диагональной (ДСН). Она трансформирует прямоугольные рамы в треугольные, значительно увеличивая их сопротивление сдвигу. В отличие от прямоугольных рам, где брусья работают в основном на изгиб, в треугольных рамах брусья при сдвиге подвергаются в основном растяжению-сжатию, что существенно повышает сдвиговую жесткость перекрытий.

Вопросы конструирования и исследования прочностных и технологических аспектов диагональной системы набора более 5 лет являются одним из направлений научной деятельности сотрудников Департамента морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ.

Некоторые вопросы, посвященные диагональной системе бортового набора, рассмотрены в работах [1 — 3, 5, 6].

Целью исследования является обоснование эффективности диагональной системы набора бортовых перекрытий судов с широким раскрытием палубы (контейнеровозов) при обеспечении их жесткости и прочности в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства [7] (далее Правила).

Для достижения поставленной цели были рассмотрены следующие задачи:

- разработаны расчетные схемы бортовых перекрытий без диагональных элементов и при их установке;
- определены характеристики набора бортовых перекрытий с поперечной и продольной системами набора по Правилам [7] с диагональными элементами и без них;
- исследована местная прочность и весовые характеристики бортовых перекрытий с диагональными элементами и без них;
- с использованием упрощенной методики и МКЭ исследована прочность и жесткость бортовых перекрытий при кручении с диагональными элементами и без них;
- разработан узел соединения разновысоких балок с диагональным элементом набора и исследована его прочность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполненный анализ конструктивных особенностей корпусов контейнеровозов в составе мирового флота лег в основу выбора конструкции бортовых перекрытий исследуемого гипотетического судна.

Основой контейнерного флота являются экономически более эффективные крупные суда. Для решения поставленных задач в рамках данной работы в качестве модели выбрано сравнительно небольшое гипотетическое судно длиной 120 м.

Необходимые в рамках исследования размеры и характеристики гипотетического расчетного судна с широким раскрытием палубы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики расчетного судна с широким раскрытием палубы

Наименование	Обозначение	Величина	Размерность
Длина между перпендикулярами	$L_{пп}$	120	м
Ширина	B	18	м
Высота борта	H	10	м
Осадка	T	7,5	м
Водоизмещение	D	11624	т
	V	11340	м ³
Коэффициент общей полноты	δ	0,7	—
Скорость	V_s	16	уз.

Такой выбор сделан из следующих соображений. Длина судна 120 м является условной границей рациональности использования поперечной или продольной систем набора. Это связано с эффективностью той или иной системы набора при обеспечении общей продольной прочности.

Поскольку в некоторых аспектах предполагается сравнительный анализ результатов исследования при кручении аналогичных корпусов, но набранных один по продольной, а другой по поперечной системам набора, была выбрана именно эта «пограничная» длина, и на основе осредненных статистических данных — все прочие размерения.

РАЗРАБОТКА ДИАГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБОРА БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ

Для указанного судна разработаны схемы бортовых перекрытий при продольной и поперечной системах набора с диагональными элементами набора и без них.

Бортовые перекрытия набраны в соответствии с требованиями Правил [7]. Расчетная схема набора базового бортового перекрытия с поперечной системой набора приведена на рис. 1, а схема набора бортового перекрытия с продольной системой набора — на рис. 2.

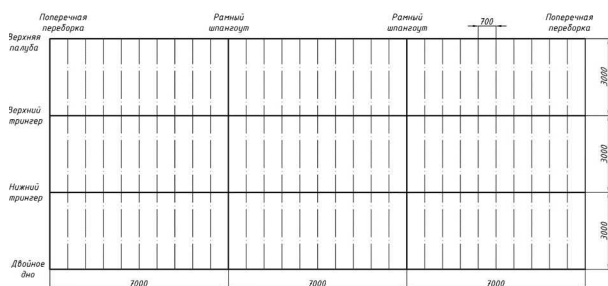


Рис. 1. Расчетная схема набора базового бортового перекрытия, набранного по поперечной системе набора

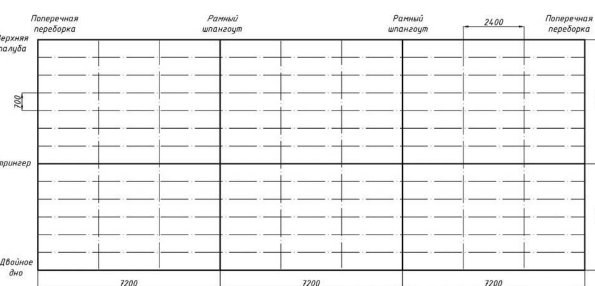


Рис. 2. Расчетная схема набора бортового перекрытия, набранного по продольной системе набора с диагональными элементами

Для сопоставления результатов расчета рассмотрены два варианта профилей основного набора: полосу по ГОСТ 21937-76 и неравнополочный уголок по ГОСТ 8510-86. Полученные размеры элементов перекрытия, набранного по продольной системе набора, приведены в табл. 2. Аналогичные данные для поперечной системы набора приведены в [2].

Таблица 2

Элементы перекрытия при продольной системе набора без ДЭ

Часть борта	Элементы набора перекрытия	
Верхняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 12
		Шпангоуты № 206
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора $L\ 125 \times 80 \times 12$
		Шпангоуты $L\ 180 \times 60 \times 10$
Нижняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 146
		Шпангоуты № 246
		Бортовой стрингер $\frac{115 \times 12}{730 \times 12}$
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора $L\ 140 \times 65 \times 7$
		Шпангоуты $L\ 200 \times 100 \times 9$
		Бортовой стрингер $\frac{125 \times 12}{740 \times 12}$

Процедура расчета размеров балок основного набора и рамных связей для перекрытия с диагональными элементами аналогична расчету для перекрытия без диагональных элементов, но с учетом того, что расчетные пролеты балок основного набора, пересекаемых диагональными элементами, изменяются вдоль длины панели перекрытия при поперечной системе набора и вдоль высоты панели — при продольной системе.

Для поперечной системы набора [2] длина пролетов балок основного набора меняется в соответствии с рис. 3, так как диагональный элемент является промежуточной опорой для балок основного набора.

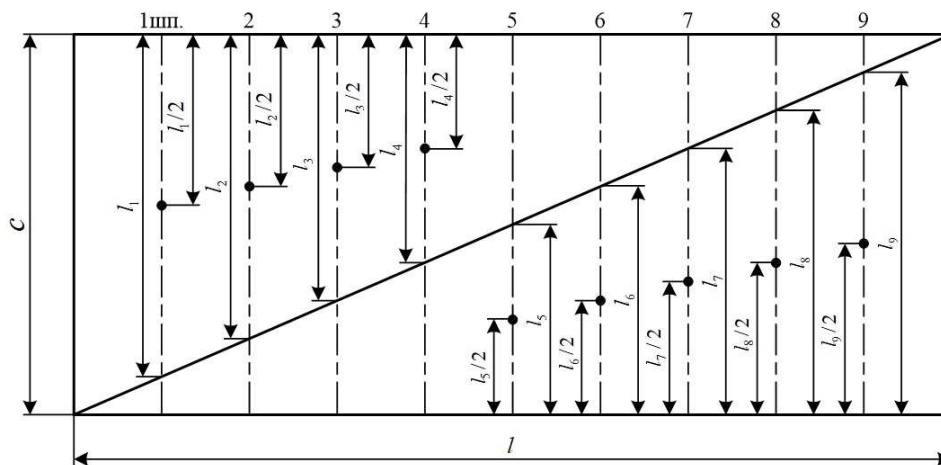


Рис. 3. К определению пролетов балок основного набора и точки, на уровне которых определяется расчетное давление [2]

Балки основного набора делятся диагональным элементом на две неравные по длине части. Требуемый Правилами момент сопротивления их сечений определяется по большей для данной балки величине пролета между бортовыми стрингерами и диагональным элементом. Вследствие изменения длины пролета в соответствии с Правилами меняется расчетная ширина присоединенного пояса обшивки.

В работе [2] приведены данные о размерах балок основного набора с учетом установки диагональных элементов при расчетной схеме набора бортового перекрытия при поперечной системе набора, приведенной на рис. 4 [2].

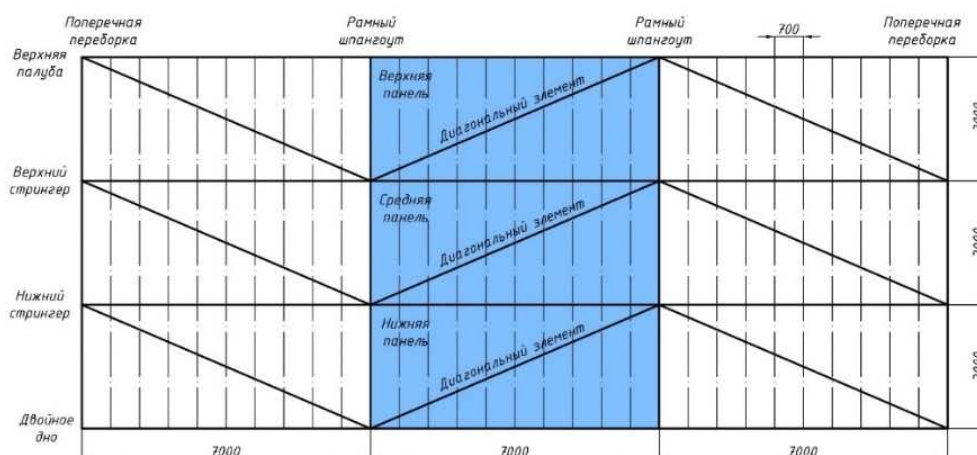


Рис. 4. Расчетная схема бортового перекрытия набранного по поперечной системе набора с диагональными элементами [2]

Расчеты были выполнены для средней панели перекрытия (выделена цветом).

При продольной системе набора длина балок основного набора меняется в соответствии с рис. 5.

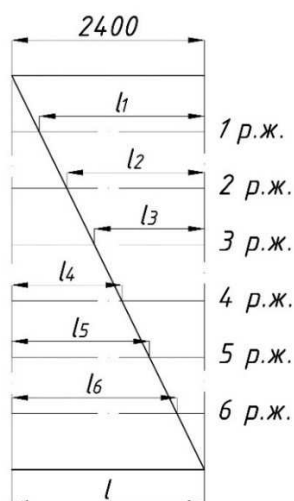


Рис. 5. К определению пролетов балок основного набора и точки, на уровне которых определяется расчетное давление

Процедура определения размеров балок основного набора и рамных связей для перекрытия с диагональными элементами, схема которого приведена на рис. 5, аналогична процедуре для перекрытия с поперечной системой набора.

В табл. 3 приведены размеры балок основного набора двух профилей, а также бортовых стрингеров и диагональных элементов для бортового перекрытия с диагональными элементами, расчетная схема которого приведена на рис. 6.

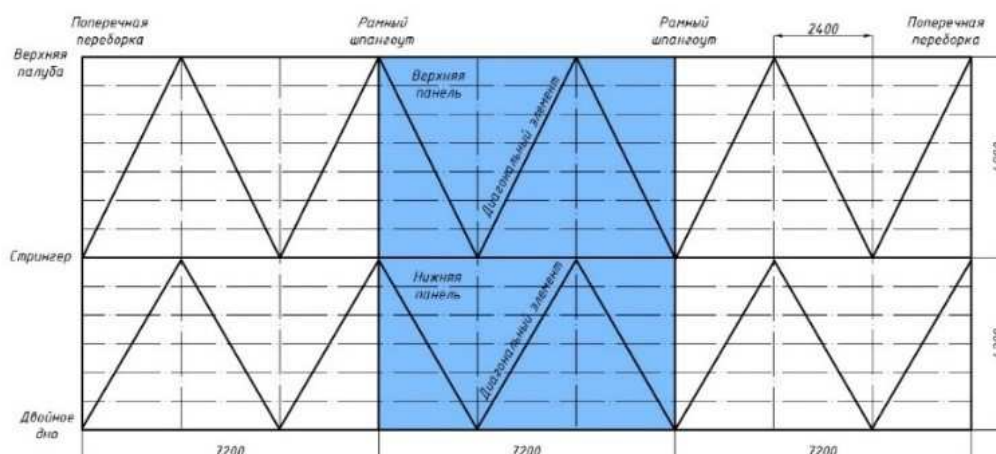


Рис. 6. Расчетная схема бортового перекрытия, набранного по продольной системе набора с диагональными элементами

Таблица 3

Элементы перекрытия при продольной системе набора с диагональными элементами

Часть борта	Элементы набора перекрытия	
Верхняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 10
		Шпангоуты № 206
		Диагональная рамная связь $\frac{110 \times 10}{300 \times 8}$
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора L 125 × 80 × 10
		Шпангоуты L 180 × 50 × 10
		Диагональная рамная связь $\frac{100 \times 10}{324 \times 8}$
Нижняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 14а
		Шпангоуты № 246
		Бортовой стрингер $\frac{105 \times 10}{580 \times 10}$
		Диагональная рамная связь $\frac{148 \times 10}{425 \times 8}$
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора L 120 × 50 × 8
		Шпангоуты L 200 × 90 × 10
		Бортовой стрингер $\frac{112 \times 10}{592 \times 12}$
		Диагональная рамная связь $\frac{154 \times 10}{412 \times 10}$

Дополнительные исследования местной прочности бортового перекрытия не требуются, так как подобранные балки перекрытия уже удовлетворяют требованиям Правил [7].

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ МЕСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Расчет массы элементов набора перекрытия выполнялся для балок из прокатных профилей как произведение массы погонного метра на длину балки, а для сварных — как сумма масс стенки и полки в виде полос требуемой толщины, ширины и длины при принятой плотности стали 7800 кг/м^3 .

Для расчетов методом конечных элементов применялся программный продукт SolidWorks Simulation.

И при поперечной, и при продольной системах набора расчет производится для средней по длине части перекрытия, ограниченной двумя рамными шпангоутами.

Выполнены расчеты по оценке влияния унификации балок основного набора на массу всего перекрытия при местной прочности, обеспеченной в соответствии с требованиями Правил. Рассчитано несколько конструктивных вариантов перекрытия.

Подробный анализ для бортового перекрытия с диагональными элементами, набранного по поперечной системе набора, приведен в работе [2].

На рис. 7 для сравнения с результатами аналогичного анализа для перекрытия, набранного по продольной системе набора, приведена диаграмма результатов исследования по расчету масс элементов набора бортового перекрытия с поперечной системой набора [2]. Расчеты выполнены при различных вариантах унификации размеров балок основного набора.

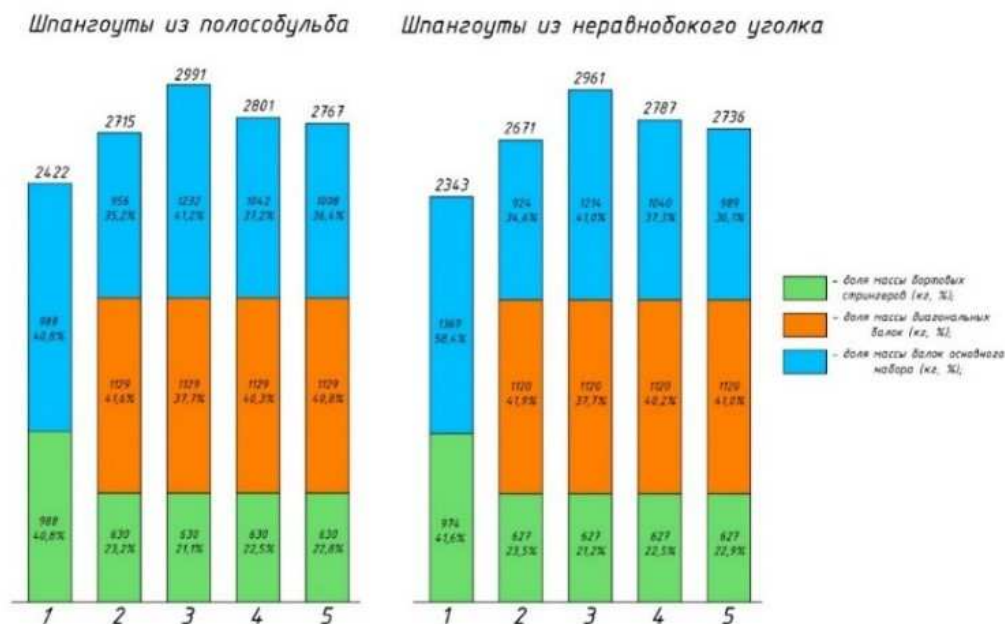


Рис. 7. Соотношение масс элементов набора бортового перекрытия, содержащего диагональные рамные связи, при различных вариантах унификации размеров балок основного набора [2]:

1 — перекрытие без диагональных связей; 2 — 5 — перекрытия с диагональными связями без унификации набора (2), при одном (3), двух (4) и трех (5) типоразмерах балок основного набора

В табл. 4 приведена графическая интерпретация вариантов комбинаций набора бортового перекрытия с диагональными рамными связями, набранного по продольной системе набора, при различных уровнях унификации профилей балок, а на рис. 8 — соответствующая диаграмма результатов исследования масс элементов набора.

Таблица 4

Графическая интерпретация вариантов комбинаций основного набора бортового перекрытия при продольной системе набора для различных уровней унификации профилей балок

Варианты основного набора	БДЭ	При наличии диагональных элементов			
		По расчету при минимальном весе	Унифицированные		
			3 типоразмера	2 типоразмера	1 типоразмер
Основной набор из полособульба по ГОСТ21937-76					
Основной набор из неравнополочного уголка по ГОСТ 8510-86					

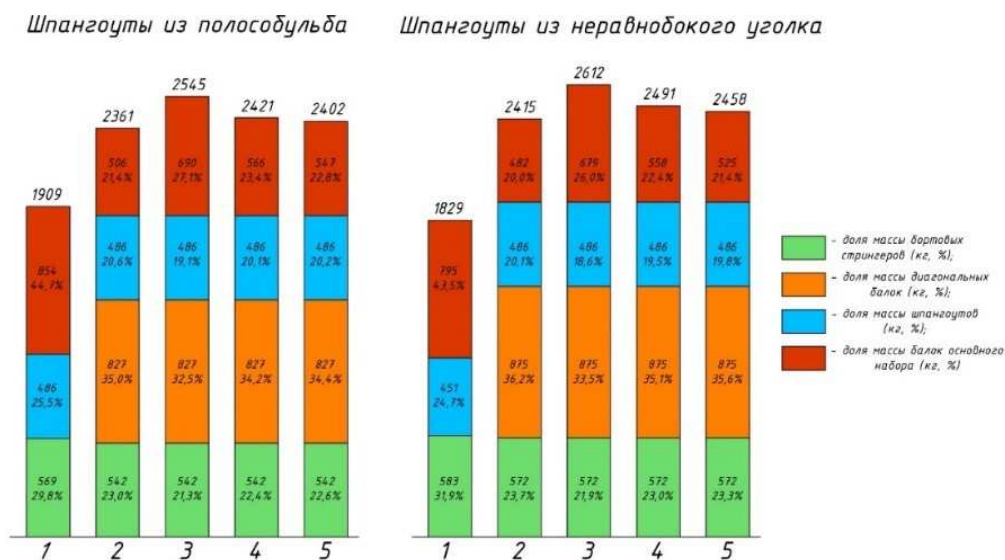


Рис. 8. Соотношение масс элементов набора бортового перекрытия, содержащего диагональные рамные связи, при различных вариантах унификации размеров балок основного набора:
 1 — перекрытие без диагональных связей; 2 — 5 — перекрытия с диагональными связями без унификации набора (2), при одном (3), двух (4) и трех (5) типоразмерах балок основного набора

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с поперечной системой набора наблюдается снижение массы основного набора при увеличении числа групп унифицированных размеров балок. За базу сравнения принята масса неунифицированного набора, являющаяся минимально возможной (все балки изготовлены из одинакового профиля разного размера из условия их минимального веса). Если все балки имеют одинаковое сечение — один типоразмер, то их масса на 28,9 % и 31,4 % больше массы

минимального весового 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 полосульба, а второе — из неравнополочного уголка. При этом общая масса перекрытия при трех типоразмерах балок основного набора за счет значительного веса диагональных элементов увеличивается на 14,2 % и 16,7%.

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с продольной системой набора также наблюдается снижение массы основного набора с увеличением числа групп унифицированных размеров балок (табл. 4). Аналогичные показатели: при одном типоразмере, масса на 36,5 % и 40,9 % больше массы минимального весового варианта. При двух типоразмерах превышение массы составляет 11,9 % и 15,7 %, а при трех — 8,1 % и 9,0 %. При этом общая масса перекрытия увеличивается на 25,8 % и 34 %.

Видно, что при продольной системе набора увеличение массы основного набора при установке диагональных элементов несколько больше, чем при поперечной системе набора, и почти в два раза больше увеличение массы всего перекрытия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ

В рамках предварительного исследования расчеты выполнялись по упрощенной методике [8] расчета на кручение брусев открытого профиля. Затем полученные результаты уточнялись расчетами по МКЭ. Используемая упрощенная, но общепризнанная методика расчетов на кручение тонкостенных открытых профилей основана на теории В.З. Власова [4].

Результаты расчетов по приближенной методике опубликованы в [1, 3], некоторые из них в минимально необходимом для сопоставления с результатами расчетов МКЭ приведены ниже.

Для анализа был использован отсек условного судна с полным раскрытием палубы в конструктивных вариантах «одинарные или двойные борта и двойное дно». Все перекрытия — днище и второе дно, наружный и внутренний борта — приняты конструктивно одинаковыми и рассматриваются как пластины, эквивалентные перекрытиям с точки зрения сдвига. В сравнительных расчетах угла закручивания отсека за базу принят исходный вариант его конструкции, то есть с бортовыми перекрытиями, не подкрепленными диагональными балками. Схема деформации отсека приведена на рис. 9.

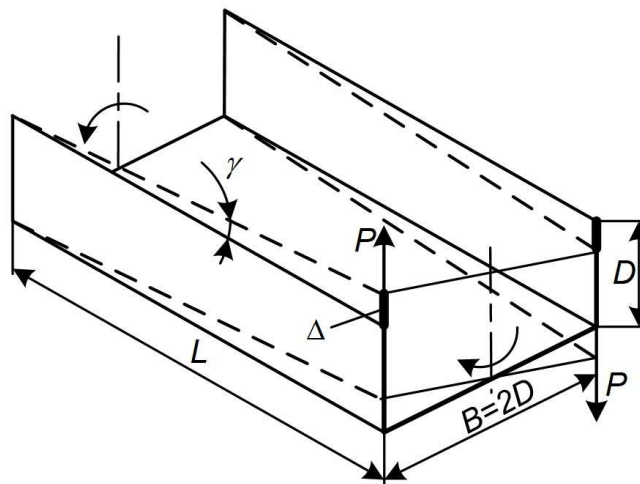


Рис. 9. Схема деформации отсека

В работе [1] показано, что при установке диагональных элементов сдвиговая деформация исследуемого перекрытия условного судна (см. выше) уменьшается в 4,82 раза, то есть $\lambda = \Delta_o \Delta_d = 4,82$, где Δ_o — сдвиговая деформация перекрытия без диагональных элементов, а Δ_d — то же после их установки. Моменты инерции при кручении каждого перекрытия составного открытого профиля с учетом λ_i

$$I_{Ki} = \frac{A_i \delta_i^2 \lambda_i}{3}, \quad (1)$$

тогда для составного профиля момент инерции при кручении (α — коэффициент, зависящий от формы составного профиля) —

$$I_K = \alpha \frac{\sum_1^n A_i \delta_i^2 \lambda_i}{3}, \quad (2)$$

Отношение угла закручивания профиля без диагональных элементов к углу закручивания такого же профиля с диагональными элементами в перекрытиях пропорционально отношению соответствующих моментов инерции при кручении, то есть

$$\psi = \varphi / \varphi_d = I_K / I_{Kd}. \quad (3)$$

Для различных вариантов количества и соединения перекрытий в отсеке получены следующие соотношения углов закручивания:

1) $\psi_1 = 2,27$ — одинарные борта и двойное дно; днище и второе дно не связаны между собой междудонным набором;

2) $\psi_2 = 1,43$ — одинарные борта и двойное дно; днище и второе дно жестко связаны междудонным набором; при реальном в той или иной мере податливым междудонным набором величина отношения лежит в диапазоне 1,43 — 2,27;

3) $\psi_3 = 3,35$ — двойные борта и двойное дно; наружный и внутренний борта, а также днище и второе дно не связаны друг с другом внутренним набором;

4) $\psi_4 = 3,35$ — двойные борта и двойное дно; наружный и внутренний борта, а также днище и второе дно жестко связаны друг с другом внутренним набором;

5) $\psi_5 = 2,98$ — двойные борта и двойное дно представляют собой тонкостенные замкнутые профили.

Таким образом, при использовании приближенной методики для рассмотренного отсека установка диагональных элементов в перекрытиях двойного борта увеличивает его жесткость при кручении приблизительно в три раза, а при одинарном борте — в два раза.

Расчеты МКЭ производились в среде SolidWorks. Использование МКЭ дало возможность более детально и точно исследовать распределение напряжений и деформаций в конструкции с учетом всех факторов, которые невозможно учесть при использовании приближенной методики. Для расчета влияния диагональных элементов на прочность корпуса судна при кручении были использованы четыре модели грузового отсека с одинарными бортами (рис. 10 — 13).

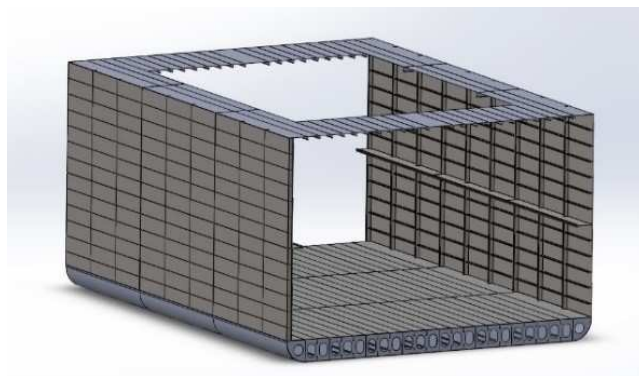


Рис. 10. Сборка блока с бортовым набором по продольной системе без диагональных элементов

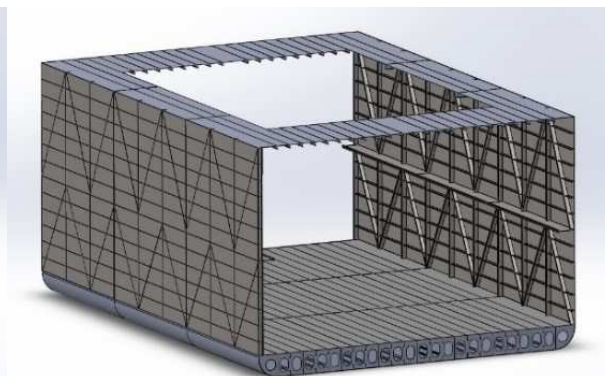


Рис. 11. Сборка блока с бортовым набором по продольной системе с диагональными элементами

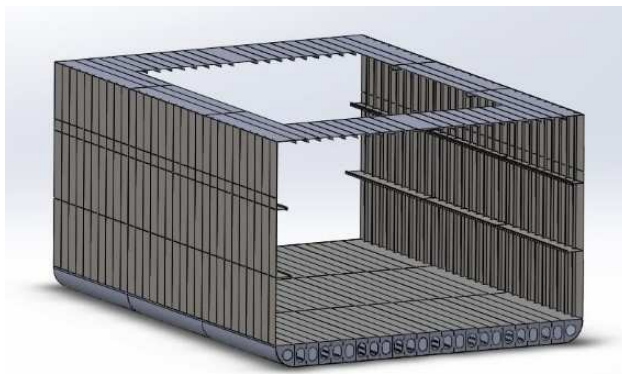


Рис. 12. Сборка блока с бортовым набором по поперечной системе без диагональных элементов

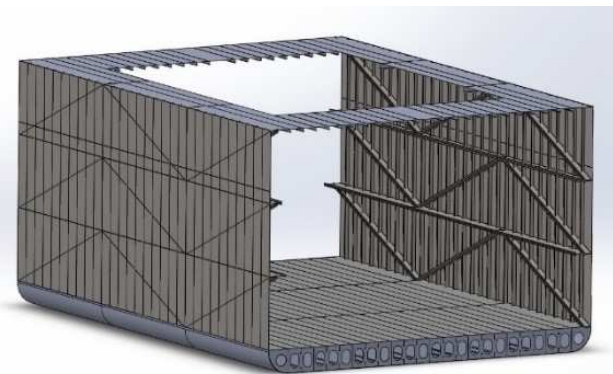


Рис. 13. Сборка блока с бортовым набором по поперечной системе с диагональными элементами

При расчете по упрощенной методике установка диагональных балок рамного набора в перекрытиях бортов увеличивает жесткость корпуса при кручении в 2,27 раза.

По результатам расчета МКЭ, при установке диагональных элементов в бортовое перекрытие, набранное по продольной системе набора, жесткость корпуса увеличивается в 2,48 и 2,37 раза при основном наборе из полособульба и уголка соответственно.

По результатам расчета МКЭ бортового перекрытия с диагональными элементами, набранного по поперечной системе набора, жесткость корпуса увеличивается в 2,36 и 2,28 раза при основном наборе из полособульба и уголка соответственно.

Погрешность вычисления по упрощенной методике в сравнении с расчетом МКЭ составляет 5,1 % и 4 % для перекрытия с поперечной системой набора при основном наборе из полособульба и уголка соответственно и 9,3 % и 4,4 % для перекрытия с продольной системой набора при тех же профилях. При этом погрешность идет в запас прочности. Это означает, что приближенная методика вполне применима в оценочных расчетах общей прочности при кручении.

Использование балок, изготовленных из полособульба, в качестве основного набора дает большее увеличение прочности перекрытия, в сравнении с балками из уголка. Увеличение жесткости при использовании балок из полособульба на 4,44 % и 3,39 % больше, чем при использовании уголка, при продольной и поперечной системах набора соответственно.

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК ДИАГОНАЛЬНОГО НАБОРА

Для обеспечения передачи усилий в узле соединения традиционных и диагональных балок рамного набора и решения технологических проблем была разработана конструкция узла, защищенная патентом на изобретение [6]. Приведенное на рис. 14 конструктивное решение позволяет ввести в узел пересечения двух взаимно перпендикулярных балок диагональный набор одинаковой с ними высоты. На рис. 15 показано конструктивное решение для узла соединения разновысоких рамных балок с диагональным элементом. На конструкцию последнего узла подана заявка на патентование.

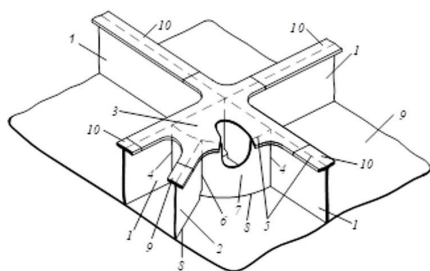


Рис. 14. Узел соединения рамных балок под произвольными углами [6]

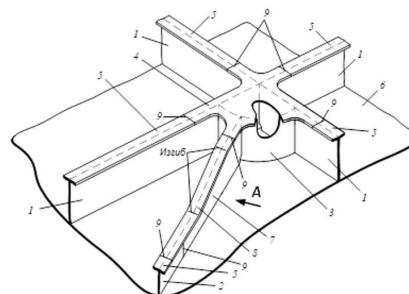


Рис. 15. Узел соединения разновысоких рамных балок с диагональным элементом

Результаты исследования местной прочности узла, показанного на рис. 14, опубликованы в работе [5]. Для иллюстрации цветовая визуализация напряженного состояния конструктивных элементов этого узла при действии силы вдоль оси диагональной балки приведена на рис. 16.

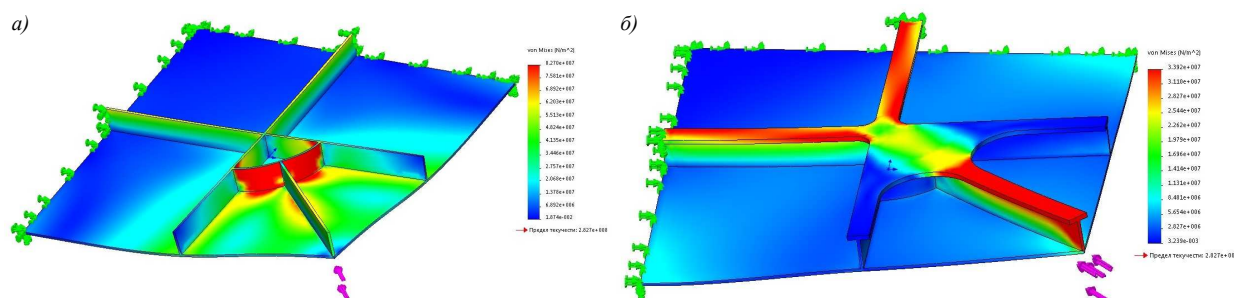


Рис. 16. Напряженное состояние конструктивных элементов узла пересечения набора, включающего диагональную балку: а — балки без свободного пояса (полосы); б — балки таврового сечения [5]

Видно, что при отсутствии свободных поясков цилиндрическая вставка, передающая осевую силу с диагональной балки на смежный набор, испытывает высокие напряжения и сильно деформирована. Именно свободные пояски передают основную часть нагрузки, а крестовина в значительной степени разгружает узел пересечения балок, оставаясь малонапряженной, что свидетельствует об эффективности разработанной конструкции.

При оптимизации весовых параметров конструкции с диагональными элементами возможна ситуация, когда напряженное состояние отдельных балок будет заметно отличаться от остальных. В этом случае встает вопрос об уменьшении или увеличении их сечения, то есть о соединении в одном узле разновысоких балок.

Исследование напряженного состояния этого узла выполнялось с использованием программного комплекса SolidWorks во вкладке Simulation.

Во всех представленных далее вариантах модели по аналогии с [5] приняты одинаковые размеры конструктивных элементов:

- лист наружной обшивки — $s = 10$ мм, 1400×1400 мм;
- стенка продольной неразрезной балки — $s = 10$ мм, $h = 100$ мм;
- стенки поперечных разрезных балок — $s = 10$ мм, $h = 100$ мм;
- цилиндрическая вставка — $s = 10$, $h = 100$ мм, $r = 240$ мм;
- стенка диагональной балки — $s = 10$ мм, $h = 70$ мм;
- полки балок — $s = 15$ мм, $b = 70$ мм.

Здесь s — толщина конструктивного элемента; h — высота сечения; r — радиус цилиндрической вставки; b — ширина сечения.

Такие же варианты приняты для случая, когда стенка диагональной балки имеет большую высоту, чем остальные стенки балок в узле. В этом случае диагональная балка имеет следующие размеры:

- стенка диагональной балки — $s = 10$ мм, $h = 130$ мм.

Предел текучести малоуглеродистой стали — 235 МПа, модуль Юнга — 2×10^5 МПа.

На рис. 17 приведены варианты нагружения исследуемой конструкции.

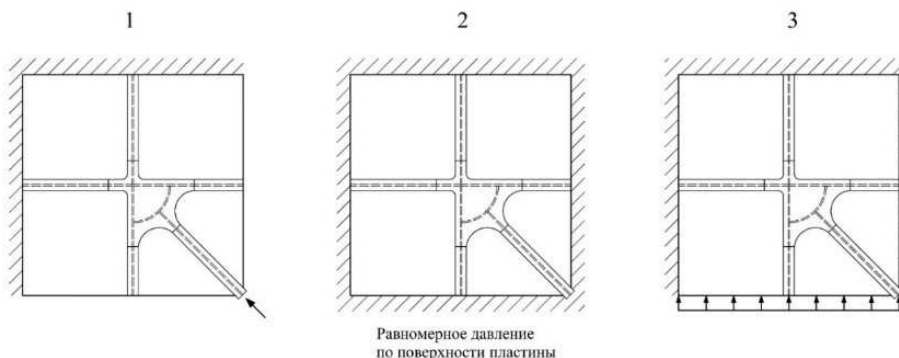


Рис. 17. Варианты нагружения исследуемой конструкции

Схема 1. Конструкция жестко заделана на двух смежных кромках и свободна на двух других. Вдоль диагональной балки действует осевая сила в плоскости конструкции. Подобная схема имеет место в бортовом перекрытии судна при скручивании корпуса.

Схема 2. Конструкция жестко заделана по периметру. На поверхность обшивки действует равномерно распределенное давление. Схема характерна для конструкций, находящихся ниже ватерлинии.

Схема 3. Конструкция жестко заделана на трех кромках. К свободной кромке в плоскости конструкции приложена равномерно распределенная нагрузка. Такое нагружение возникает в конструкциях, участвующих в общем изгибе корпуса судна.

Анализ результатов исследования приведен в табл. 5. В первом столбце приведены соответствующие выдержки из опубликованного ранее исследования [5] для конструкции с балками одной высоты. В столбцах 2 и 3 приведены результаты, полученные в данной работе.

Таблица 5

Сводные данные по результатам расчетов напряженного состояния узлов

Схема нагружения	Узел балок с одинаковой высотой стенок основных рамных и диагональных элементов [5]	Узел балок с разной высотой стенки (высота стенки диагонального элемента меньше прочих)	Узел балок с разной высотой стенки (высота стенки диагонального элемента больше прочих)
Схема 1	Нагрузка передается главным образом полками балок и цилиндрической вставки. Наибольшие напряжения возникают в диагональной балке, цилиндрической вставке и наружной обшивке в месте присоединения к цилиндрической вставке.	Наибольшие напряжения возникают в месте изменения сечения переходной brackets с большей высоты на меньшую. Основная нагрузка приходится на стенку и полку переходной brackets и передается через крестовину на полки смежных балок.	Наибольшие напряжения действуют в полке переходной brackets; пик находится в месте изменения высоты brackets с меньшей на большую. Отмечено, что при равных нагрузках меньшие напряжения наблюдаются в узле, где высота стенки диагонального элемента больше, чем высота стенок прочих балок.
Схема 2	В секторе, где установлена диагональная балка, наблюдается заметное снижение напряжений в обшивке. Наибольшие напряжения имеют место в локальных областях сжатой зоны в районе опорных сечений при изгибе основных балок.	Наблюдается снижение напряжений в секторе с диагональной балкой. Серьезных перепадов напряжений в стенке или полке переходной brackets не наблюдается: значения напряжений на порядок ниже, чем в обшивке.	Наблюдается снижение напряжений в секторе с диагональной балкой. Пика напряжений в стенке или полке переходной brackets не зафиксировано. Наблюдается незначительное повышение напряжения на переходной brackets в месте перехода от меньшей к большей высоте стенки.
Схема 3	Наиболее напряженной является балка, вдоль которой действует нагрузка, от места приложения нагрузки до района пересечения с перпендикулярной к ней балкой. Особенно высокие напряжения имеют место в полке и примыкающей к ней части стенки (рис. 16б).	Наибольшие напряжения зафиксированы в балке, вдоль которой приложена нагрузка. Пик напряжений наблюдается в месте присоединения полки балки к стенке. В переходной brackets диагонального элемента высокие напряжения не зафиксированы.	В узле, где высота стенки диагонального элемента больше прочих, также не зафиксированы перепады напряжения в переходной brackets диагональной балки. Наибольшие напряжения действуют по линии присоединения полки к стенке балки, вдоль которой прикладывается нагрузка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Исследованием весовых характеристик бортовых перекрытий с диагональными элементами набора при обеспечении местной прочности по Правилам РС установлено следующее.

При поперечной системе набора.

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

При продольной системе набора.

Суммарные расчетные массы набора панели исходного перекрытия без диагональных элементов составили при основном наборе из полособульба и уголка соответственно 1909 кг и 1829 кг, а для такого же перекрытия с диагональными элементами — 2361 кг и 2415 кг, то есть увеличились на 23,7 % и 32,0 %

при том, что масса добавляемых диагональных элементов составляет 43,3 % и 47,8 % от масс набора исходного перекрытия.

Балки основного набора из неравнополочного уголка и соответствующие им рамные связи имеют меньшие массы, чем массы тех же элементов при использовании в качестве балок основного набора полособульбов в обоих вариантах системы набора.

2. При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с поперечной системой набора наблюдается снижение массы с увеличением числа групп унифицированных размеров балок. За базу сравнения принята масса неунифицированного набора, являющаяся минимально возможной (все балки изготовлены из одинакового профиля разных размеров, выбранных из условия их минимального веса). Если все балки одинакового сечения — один типоразмер, то их масса на 28,9 % и 31,4 % больше массы варианта конструкции с минимальной массой. 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.

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с продольной системой набора также наблюдается снижение массы с увеличением числа групп унифицированных размеров балок при таком же базовом варианте. Если все балки одинакового сечения — один типоразмер, то их масса на 36,5 % и 40,9 % больше массы варианта конструкции с минимальной массой. При двух типоразмерах превышение массы составляет 11,9 % и 15,7 %, а при трех — 8,1 % и 9,0 %.

3. Исследование прочности и жесткости бортового перекрытия при кручении дали следующие результаты.

При расчетах по упрощенной методике для рассмотренного отсека при одинарных бортах установка диагональных балок рамного набора приблизительно в два раза увеличивает жесткость корпуса при кручении, а при двойных бортах — почти в три раза.

При расчете методом конечных элементов получены следующие результаты.

При продольной системе набора.

При введении диагональных элементов в бортовое перекрытие, набранное по продольной системе набора, жесткость и прочность корпуса увеличиваются в 2,48 и 2,37 раза при балках основного набора, изготовленных из полособульба и неравнополочного уголка соответственно.

При поперечной системе набора.

При введении диагональных элементов в бортовое перекрытие, набранное по поперечной системе набора, жесткость и прочность корпуса увеличиваются в 2,36 и 2,28 раза для балок основного набора перекрытия из полособульба и уголка соответственно.

Погрешности вычисления по упрощенной методике в сравнении с расчетом МКЭ составляют 5,1 % и 4 % для перекрытия с поперечной системой набора при основном наборе из полособульба и уголка соответственно и 9,3 % и 4,4 % для перекрытия с продольной системой набора при тех же профилях. При этом погрешности идут в запас прочности и составляют менее 10 %. Это означает, что приближенная методика вполне применима в оценочных расчетах общей прочности при кручении.

При продольной системе набора увеличение крутильной жесткости корпуса с введением в бортовые перекрытия диагональных элементов больше, чем при поперечной системе набора, на 4,53 %.

Использование полособульба в качестве балок основного набора дает большее увеличение прочности перекрытия в сравнении с балками из неравнополочного уголка. Увеличение жесткости при использовании балок из полособульба больше на 4,44 % и 3,39 % при продольной и поперечной системах набора соответственно.

4. Исследование напряженного состояния узла пересечения рамных балок с диагональным элементом подтвердило эффективность конструктивного решения. Обеспечена передача усилий при допустимой концентрации напряжений в переходной brackets разноразмерных балок. В случае, когда пик напряжений приходится на место изменения высоты, его значение не выходит за пределы других напряжений в узле. С практической точки зрения узел обеспечивает эффективную передачу усилий между рамными балками набора, нормальные условия для проведения технологических операций и разнесение сварных швов на необходимое расстояние, исключающее наложение друг на друга полей их напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аносов А.П. Влияние бортовых перекрытий, подкрепленных диагональными балками рамного набора, на жесткость корпуса судна при кручении / А.П. Аносов, Т.А. Макарова // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 3, ч. 2. — С. 49—53.
2. Аносов А.П. Влияние диагональных элементов набора бортового перекрытия на его местную прочность и весовые характеристики / А.П. Аносов, Т.А. Макарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 67 — 80.
3. Аносов А.П. Влияние диагональных элементов рамного набора на жесткость бортового перекрытия при сдвиге / А.П. Аносов, Т.А. Макарова // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 3, ч. 2. — С. 44 — 48.
4. Власов В.З. Теория упругости тонкостенных пространственных конструкций / В.З. Власов. — М.: Госстройиздат, 1959. — 384 с.
5. Климов С.О. Исследование напряженного состояния узла соединения рамных балок набора, включающего диагональный элемент / С.О. Климов, А.П. Аносов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Специальный выпуск 2. — С. 41 — 46.
6. Пантюшин Д.И., Козырев Д.В., Восковщук Н.И., Аносов А.П. Узел соединения балок. Патент на изобретение № 2667203 / БИ № 15, 27.05.2015.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II «Корпус» / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2025.
8. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов / С.П. Фесик. — Киев: Будівельник, 1970. — 308 с.

REFERENCES

1. Anosov A.P., Makarova T.A. The influence of side grillages, supported with diagonal framing members, on the hull rigidity under torsion. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 3, p. 2. P. 49 — 53. (In Russ.)
2. Anosov A.P., Makarova T.A. Influence of diagonal framing members of side grillage on its weight characteristics. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 67 — 80. (In Russ.)
3. Anosov A.P., Makarova T.A. Influence of diagonal framing members on the rigidity of the side grillage under shear. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 3, p. 2. P. 44 — 48.
4. Vlasov V.Z. *Teoriya uprugosti tonkostennykh prostranstvennykh konstruksii*. Moscow: Gosstroizdat, 1959. 384 p.
5. Klimov S., Anosov A. Stressed state of webbed framing joints with diagonal element. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Edition 2. P. 41 — 46. (In Russ.)
6. Pantyushin D.I., Kozyrev D.V., Voskovshchuk N.I., Anosov A.P. Uzel soedineniya balok. Patent na izobretenie № 2667203 / BI №15, 27.05.2015 [Beam connection unit. Patent for invention No. 2667203].
7. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II: Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
8. Fesik S.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference book on resistance of materials]. Kiev: Budivel'nik, 1970. 308 p.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.833
EDN KHOJKR

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ МАССЫ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КОНИЧЕСКО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА

Л.П. Сенчурин, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: senchurin@live.ru

М.А. Иванова, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: wosea@mail.ru

С.В. Черенкова, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: svchpar@list.ru

Статья посвящена вопросам оптимизации двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора по условию минимизации массы зубчатых колес. Минимальные массо-габаритные характеристики редуктора являются его важным конкурентным преимуществом. При конструировании многоступенчатых редукторов необходимо выбирать такие передаточные числа по ступеням, которые обеспечивали бы минимальные размеры механизма. Таким образом, оптимальный выбор передаточных чисел ступеней отражается на объеме, а значит, и массе колес в каждой ступени. Обзор имеющейся литературы на эту тему указывает на различную глубину анализа взаимосвязей эксплуатационных и конструктивных параметров механизма. Проведенные авторами теоретические исследования показали, что на результаты разбивки передаточного отношения редуктора по ступеням влияют прежде всего величины момента на выходном валу и общего передаточного отношения, вид термообработки колес и ряд конструктивных ограничений. Составлена целевая функция, учитывающая перечисленные факторы и представляющая собой минимизируемый объем зубчатых колес. Поиск минимума целевой функции осуществлялся в заданных диапазонах геометрических и прочностных параметров деталей и узлов редуктора, а также его эксплуатационных показателей. Результаты минимизации представлены в виде зависимости передаточного числа цилиндрической ступени от передаточного отношения редуктора, вида термообработки колес и момента на выходном валу. Также даны результаты расчета минимального допустимого передаточного числа цилиндрической ступени в зависимости от передаточного отношения двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора, при котором отсутствуют, в частности, подсекание тихоходного вала и внедрение фрезы в опорную шейку конической вал-шестерни; показано сравнение с существующими рекомендациями.

Ключевые слова: коническо-цилиндрический редуктор, целевая функция, передаточное число, передаточное отношение, разбивка передаточного отношения, минимизация массы.

Для цитирования: Сенчурин Л.П. К вопросу об оптимизации массы двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора / Л.П. Сенчурин, М.А. Иванова, С.В. Черенкова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 111 — 118. — EDN KHOJKR.

ON THE ISSUE OF OPTIMIZING THE MASS OF A TWO-STAGE BEVEL SPUR GEARBOX

L.P. Senchurin, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: senchurin@live.ru

M.A. Ivanova, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: wosea@mail.ru

S.V. Cherenkova, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: svchpar@list.ru

The article is devoted to the optimization of a two-stage bevel spur gearbox to minimizing the mass of gears. The minimum weight and overall characteristics of the gearbox are its important competitive advantage. In designing multi-stage gearboxes, gear ratios should be selected in stages that ensure the mechanism has a minimum dimension. The optimal choice of gear ratios of the stages effect on the volume and the weight of the gears in each stage. A review of the available publications on this topic indicates a different intensity of analysis of the interrelationships of the operational and design parameters of the mechanism. The theoretical studies conducted by the authors showed that the results of dividing the gear ratio of the gearbox into stages are influenced primarily by the amounts of torque on the output shaft and of overall gear ratio, the type of heat treatment of the gears and a number of structural limitations. Objective function has been created taking into account the listed factors and represents minimized volume of gears. The search for the minimum objective function was carried out within the specified ranges of geometric and strength parameters of the parts and units of the gearbox, as well as its performance. The minimization results are presented as a function of the gear ratio of the spur stage and the overall gear ratio, the heat treatment of the gears and the torque on the output shaft. The results of calculation of the minimum allowable gear ratio of the spur stage depending on the gear ratio of the two-stage bevel spur gearbox are also given, in which there is no, in particular, cutting of the low-speed shaft and introduction of the milling cutter into the support neck of the bevel shaft; shows comparison with existing guidelines.

Keywords: *bevel spur gearbox, objective function, gear ratio, gear ratio partitioning, mass minimization.*

For citation: Senchurin L.P., Ivanova M.A., Cherenkova S.V. On the issue of optimizing the mass of a two-stage bevel spur gearbox. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 111 — 118. EDN KHOJKR. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

С развитием судостроения появляются новые требования к разрабатываемой технике. Основной задачей при разработке конкурентоспособных изделий судового машиностроения является уменьшение массогабаритных характеристик. Для производства на морских судах грузоподъемных, швартовых работ и грузообработки применяют грузовые лебедки, якорно-швартовые шпили, траловые и буксирные лебедки, конвейеры [1]. Важной составляющей этого судового оборудования являются редукторы. Применяемые в судовых механизмах редукторы должны обеспечивать заданные характеристики при минимальных габаритах и массе.

Проблема оптимизации конструкции многоступенчатых редукторов различных типов актуальна и постоянно рассматривается в технической литературе. В работе [2] дан краткий обзор существующих методов и критериев оптимизации различных типов передач.

Разбивка общего передаточного отношения редуктора по ступеням уже на начальном этапе проектирования позволяет оптимизировать конструкцию.

Решением задачи распределения передаточного отношения по ступеням многоступенчатого редуктора для уменьшения его массы, габаритных размеров, использованных материалов занимались многие исследователи. Их работы различаются глубиной анализа взаимосвязей различных параметров передачи, учетом конструктивных особенностей механизма, также расчетными критериями для оценки нагрузочной способности передач, входящих в редуктор.

На начальном этапе расчета для разбивки передаточного отношения коническо-цилиндрического редуктора используют типовые рекомендации, приводимые в справочной и учебной литературе [3 — 7]. Анализ этих рекомендаций, удовлетворяющих условию минимизации массы, выявил необходимость проверять их на предмет исключения интерференции зубьев.

Расчеты передаточных чисел ступеней коническо-цилиндрического редуктора по предложенным формулам показали, что в некоторых диапазонах передаточных отношений редуктора, видов термообработки колес, моментов на выходном валу возможно подсекание коническим колесом выходного вала (рис. 1).

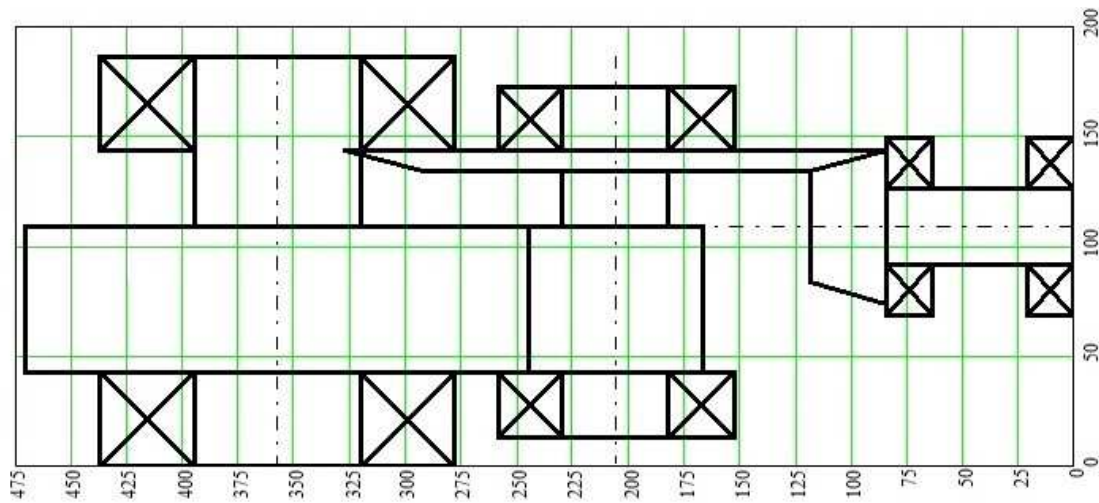


Рис. 1. Подсекание вала коническим колесом

Существуют рекомендации оптимизации редуктора по минимальной длине без учета конструктивных ограничений [8 — 10].

Может отсутствовать возможность установки крепежного болта между подшипниками цилиндрической ступени или возникает необходимость выполнять на цилиндрической ступени врезную вал-шестерню, что не всегда допустимо [11].

Не исключена возможность зареза фрезой, при ее выходе, опорной шейки под подшипник конической вал-шестерни [12].

В работе [13] предлагается методика выбора оптимальных параметров двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора без числовых результатов.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Целью предлагаемого исследования является максимальное уменьшение собственной массы зубчатых колес, так как размеры корпуса редуктора можно уменьшить благодаря оптимизации его монтажного объема, который определяется в основном объемом (массой) зубчатых колес.

В данной статье рассмотрена оптимизация коническо-цилиндрического редуктора по массе, исключая подсекаание вала колесом (рис. 1), зарез фрезой опорной шейки под подшипник конической вал-шестерни и необходимость установки врезной вал-шестерни цилиндрической ступени, обеспечивающая, когда требуется, установку крепежного болта.

В качестве критерия оптимизации принята масса колес.

Целевая функция (минимизируемый объем колес):

$$V_k(u_T, a, d_{e2}, d_2, a_{\min}, \psi_{ba}, a_{пб}, D_{пп}, D_{пт}, d_{пп}, d_{пт}, d_{болт}) = \frac{\pi(1,5d_{пп})^2}{4} (1,3d_{пп} - \psi_{bRe}0,5d_{e2}) + \frac{\pi \cdot d_{e2}^3 [1 - (1 - \psi_{bRe})^3] (i_{ред} + u_T) u_T}{24i_{ред}^2} + \frac{\pi \cdot a^3 \cdot \psi_{ba} (1 + u_T^2)}{(1 + u_T)^2}, \quad (1)$$

где u_T — передаточное число тихоходной ступени;

a — межосевое расстояние тихоходной ступени, получаемое из условия контактной прочности;

d_{e2}, d_2 — соответственно внешний делительный диаметр конического колеса и делительный диаметр колеса тихоходной ступени;

$a_{\min}$ — минимальное межосевое расстояние, обеспечивающее отсутствие подсекаания коническим колесом тихоходного вала;

$\psi_{ba} = b/a$ — относительная ширина венца тихоходной ступени;

$a_{пб}$ — межосевое расстояние, обеспечивающее размещение подшипников и крепежного болта между ними;

$D_{пп}, D_{пт}$ — соответственно наружные диаметры подшипника промежуточного и тихоходного валов;

$d_{пп}, d_{пт}$ — соответственно диаметры промежуточного и тихоходного валов под подшипники;

$d_{болт}$ — диаметр болта, устанавливаемого между подшипниками;

$i_{ред}$ — передаточное отношение редуктора;

$\psi_{bRe} = b/R_e$ — относительная ширина венца конической пары.

В выражении (1) первое слагаемое правой части — объем цилиндрической части конического колеса, второе — конической; третье слагаемое — объем цилиндрического колеса с коэффициентом заполнения, равным единице.

Для минимизации целевой функции (1) заданы условия и ограничения:

- межосевого расстояния цилиндрической ступени a ,
- внешнего делительного диаметра конического прямозубого колеса d_{e2} ,
- делительного диаметра цилиндрического колеса d_2 ,
- диаметров промежуточного и тихоходного валов под подшипники $d_{пп}$ и $d_{пт}$,
- аппроксимационные формулы для наружных диаметров роликовых конических подшипников $D_{пп}$ и $D_{пт}$,
- требуемого межосевого расстояния для исключения подсекаания тихоходного вала,
- требуемого межосевого расстояния по условию размещения подшипников и болта между ними $a_{пб}$,
- диаметра болтов в зоне подшипников $d_{болт}$,
- относительная ширина венца тихоходной цилиндрической ступени и диапазон ее ограничения

$$0,2 \leq \psi_{ba} \leq 0,6,$$

— условия по межосевому расстоянию, позволяющие избежать его возможной корректировки в дальнейших расчетах ступени и сразу получить окончательное значение u_T ,

- ограничения по передаточному числу тихоходной и конической ступеней $1 \leq u_T \leq 8$, $i_{ред}/u_T \leq 6,0$.

Принят следующий диапазон варьирования переменными:

- передаточное отношение редуктора $i_{ред} = 6 — 30$,
- момент сопротивления на выходном валу $T_T = 500 — 4000$ Н·м,
- диапазон допускаемых контактных напряжений $[\sigma] = 430 — 1000$ МПа,
- допускаемое напряжение кручения при расчете диаметров валов МПа,
- относительная ширина цилиндрической шестерни принята $\psi_{bd} = b/d_1 = 1,2$ при $HV < 350$

и $\psi_{bd} = 1,0$ при $HV > 350$.

Поиск минимума целевой функции выполнялся с помощью встроенных функций Mathcad.

Результаты оптимизации представлены в таблице и на рис. 2 — 4.

Т а б л и ц а

Результаты расчета передаточного числа тихоходной ступени при некоторых значениях параметров

T_T , Н·м	$[\sigma_H]$, МПа	Передаточное отношение редуктора, $i_{ред}$						
		6	10	14	18	22	26	30
500	430	2,757	3,217	3,55	3,82	4,04	4,24	4,41
	600	2,97	3,44	3,78	4,05	4,28	4,48	4,66
	800	3,22	3,70	4,04	4,32	4,56	4,75	4,93
	1000	4,21	4,21	4,30	4,58	4,81	5,02	5,20
2000	430	2,64	3,09	3,42	3,69	3,91	4,10	4,27
	600	2,82	3,28	3,61	3,88	4,11	4,30	4,48
	800	3,01	3,49	3,83	4,10	4,33	4,53	4,70
	1000	3,44	3,69	4,03	4,31	4,54	4,74	4,92
4000	Улучшение	2,60	3,05	3,38	3,64	3,86	4,05	4,22
	Цементация	3,22	3,60	3,94	4,22	4,45	4,65	4,82

В примере на рис. 2 выполняется условие минимизации массы при всех перечисленных выше ограничениях (ср. с рис. 1).

Результаты решения функции (1) в графическом виде показаны на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3 зависимость влияния передаточного отношения редуктора $i_{ред}$, вида термообработки и момента на выходном валу T_T на величину оптимального передаточного числа тихоходной ступени представлена в виде двух поверхностей, которые отражают значения u_T при $T_T = 500$ и 2000 Н·м.

Для момента на тихоходном валу $T_T = 500$ Н·м получены аппроксимирующие формулы передаточного числа цилиндрической ступени u_T :

- при цементации колес

$$u_{та} = 3,083 \cdot 10^{-3} \cdot i_{ред}^{1,744} + 4,081, \quad (2)$$

- при улучшении

$$u_{та} = 2,427 \cdot i_{ред}^{0,231} - 0,915. \quad (3)$$

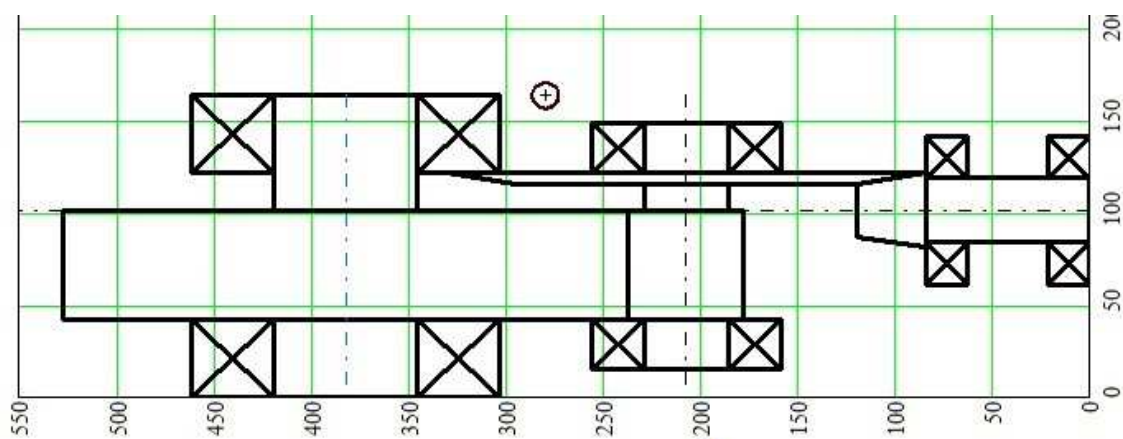


Рис. 2. Результат оптимальной разбивки передаточного отношения

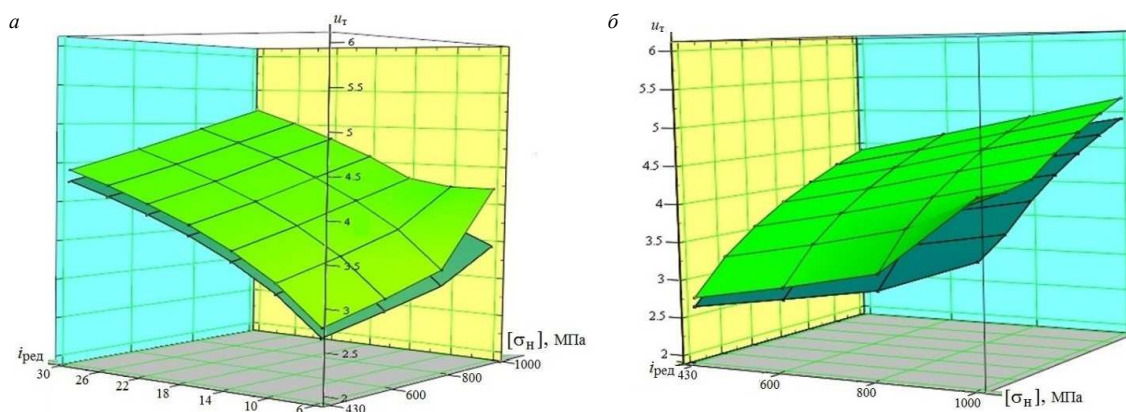


Рис. 3. Передаточное число цилиндрической ступени u_t в зависимости от передаточного отношения редуктора, вида термообработки колес и момента на выходном валу:
 при $T_t = 500 \text{ Н·м}$ — верхняя поверхность, при $T_t = 2000 \text{ Н·м}$ — нижняя поверхность

Результаты расчетов по формулам (2), (3) приведены на рис. 4 дополнительно к графикам решения функции (1):

- кривая 1 соответствует расчету по формуле (2);
- кривая 6 соответствует расчету по формуле (3).

Формулы (2) и (3) получены в диапазоне момента на выходном валу $T_t = 500 \dots 4000 \text{ Н·м}$. Дальнейший рост момента не оказывает влияния на величину оптимального значения передаточного числа цилиндрической ступени.

В указанном диапазоне расчет по формуле (2) $u_{та}$, применительно к редуктору с цементованными колесами, дает превышение массы по сравнению с рассчитанным по формуле (1): от 12 % при $i_{ред} = 6$ и до 4 % при $i_{ред} = 30$. В случае колес с улучшением превышение массы — от 20 % до 12 %.

Применение формулы (3) при проектировании редуктора с улучшенными колесами дает относительный избыток массы колес (по сравнению с расчетом по формуле (1)) не более 2,5 % для рассматриваемых диапазонов передаточного отношения редуктора $i_{ред} = 6 \dots 30$ и момента на выходном валу $T_t = 500 \dots 4000 \text{ Н·м}$.

В первом приближении аппроксимационная формула (2) может быть предложена при разбивке общего передаточного отношения коническо-цилиндрического редуктора по ступеням, для минимизации массы колес, как при цементации, так и при улучшении.

Полученные значения u_t являются минимально допустимыми, при которых выполняются перечисленные выше условия: исключается подсекание вала колесом (рис. 1), зарез фрезой опорной шейки под подшипник конической вал-шестерни и необходимость установки врезной вал-шестерни цилиндрической ступени, обеспечивающая, когда требуется, установку крепежного болта.

На рис. 5 дано сравнение расчетов по целевой функции (1), аппроксимационным формулам (2) и (3) и по формулам авторов [3 — 6].

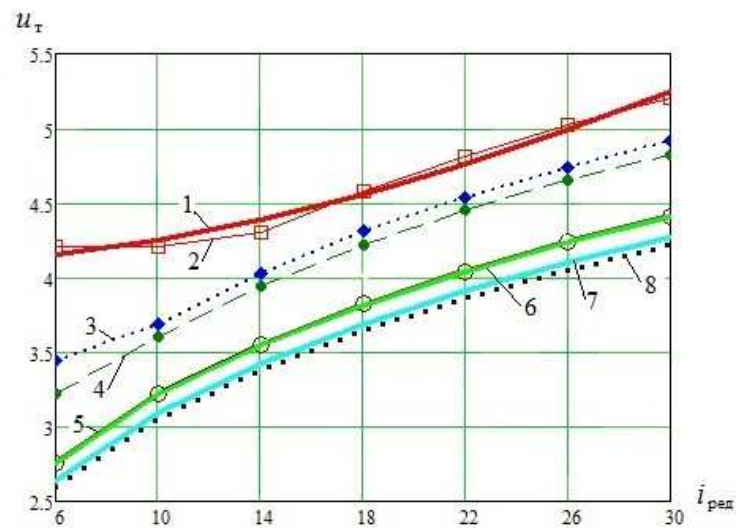


Рис. 4. Передаточное число тихой ступени в зависимости от передаточного отношения редуктора, момента на выходном валу T_T (Н·м) и вида термообработки колес:

- цементация: 1 — по формуле аппроксимации (2) ($T_T = 500$ Н·м), 2 — при $T_T = 500$ Н·м, 3 — при $T_T = 2000$ Н·м, 4 — при $T_T = 4000$ Н·м,
- улучшение: 5 — при $T_T = 500$ Н·м, 6 — по формуле аппроксимации (3) ($T_T = 500$ Н·м), 7 — при $T_T = 2000$ Н·м, 8 — при $T_T = 4000$ Н·м

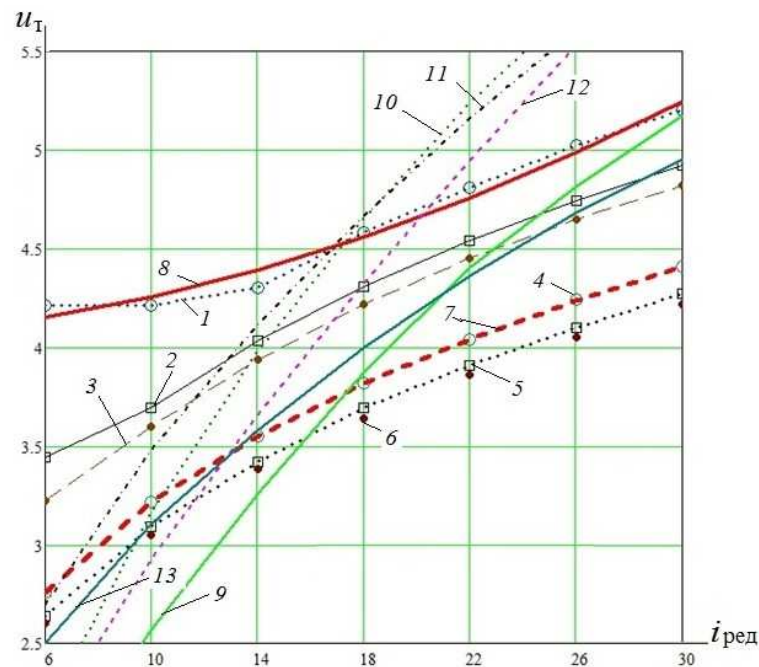


Рис. 5. Передаточное число тихой ступени в зависимости от передаточного отношения редуктора, момента на выходном валу T_T и вида термообработки колес:

- по формуле (1), цементация: 1 — при $T_T = 500$ Н·м, 2 — при $T_T = 2000$ Н·м, 3 — при $T_T = 4000$ Н·м;
- улучшение: 4 — при $T_T = 500$ Н·м, 5 — при $T_T = 2000$ Н·м, 6 — $T_T = 4000$ Н·м,
- аппроксимации: 7 — по формуле (3), 8 — по формуле (2),
- по формулам из [3 — 6]: 9 — из [3] при $HV > 350$, 10 — из [3] при $HV < 350$, 11 — из [4], 12 — из [5], 13 — из [6]

Формула (2) определяет граничные значения u_T для цементованных колес (рис. 5.8), выше которых передача по габариту избыточна. Формула (3) определяет верхнюю границу передаточного числа u_T в редукторе с улучшенными колесами (рис. 5.7), выше которого масса колес избыточна.

Была выполнена разбивка передаточного отношения коническо-цилиндрического редуктора по условию минимизации диаметральной площади колес передачи.

Установлено, что при отношении ширины зубчатого венца конического колеса к внешнему конусному расстоянию $\psi_{bRe}=0,285$ и относительной ширине цилиндрической шестерни $\psi_{bd}=1,0 \dots 1,2$ габариты передачи в диаметральной плоскости получаются такими же, как и при минимизации по объему колес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере оптимальной разбивки передаточного отношения двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора по ступеням рассмотрены результаты решения задачи минимизации целевой функции многих переменных с их ограничениями.

Результаты минимизации представлены в виде графической зависимости передаточного числа цилиндрической ступени от передаточного отношения редуктора, вида термообработки колес и момента на выходном валу.

Даны результаты расчета минимального допустимого передаточного числа цилиндрической ступени в зависимости от передаточного отношения двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора, при котором отсутствуют, в частности, подсекание вала и внедрение фрезы в опорную шейку конической шестерни.

Применение полученной целевой функции может быть использовано для решения задач проектирования и конструирования редуктора.

Показана возможность применения расчетного пакета при разработке оптимальной конструкции редуктора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивановская А.В. Математические основы разработки системы управления судового грузоподъемного оборудования / А.В. Ивановская, В.А. Жуков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 66 — 74. — EDN PSBVCR.
2. Старжинский В.Е. Корректировка параметров компоновки двухступенчатого цилиндрического редуктора / В.Е. Старжинский, В.Л. Басинюк, Е.И. Мардусевич // Актуальные вопросы машиноведения. — 2017. — Вып. 6. — С. 96 — 98.
3. Кудрявцев В.Н., Державец Ю.А., Глухарев Е.В. Конструирование и расчет зубчатых редукторов. — Л.: Машиностроение, 1971. — 328 с.
4. Чернавский С.А. Проектирование механических передач: уч.-справ. пос. 5-е изд. / С.А. Чернавский, Г.А. Снесарев, Б.С. Козинцов, К.Н. Боков и др. — М.: Машиностроение, 1984. — 560 с.
5. Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: уч. пос. 8-е изд., доп. / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. — М.: Академия, 2003. — 564 с.
6. Снесарев Г.А. Оптимизация зубчатых редукторов // Вестник машиностроения. — 1985. — № 10. — С. 53 — 56.
7. Курмаз Л.Ф. Детали машин. Проектирование: справ. уч.-метод. пос. / Л.В. Курмаз, А.Т. Скойбеда. — М.: Высшая школа, 2005. — 309 с.
8. Иванов К.Я. Оптимизация основных параметров коническо-цилиндрического редуктора / К.Я. Иванов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. — 2009. — № 2(23). — С. 251 — 253.
9. Меретуков М.А. К вопросу о распределении общего передаточного отношения цилиндрического редуктора между ступенями / М.А. Меретуков // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. — 2018. — № 2(221). — С. 160 — 163.
10. Шевченко С.В. Особенности конструирования двухступенчатого конического редуктора / С.В. Шевченко, А.А. Муховатый, О.С. Кроль // Автоматизированное проектирование в машиностроении. — 2019. — № 7. — С. 26 — 30. — DOI 10.26160/2309-8864-2019-7-26-30.
11. Барышников С.О. Особенности распределения передаточного отношения рядовых редукторов с высокой твердостью зубьев для привода судовых и крановых механизмов / С.О. Барышников, А.К. Афанасьев, А.Н. Иванов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2021. — Т. 13, № 5. — С. 694 — 709. — DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-5-694-709.
12. Ершов Р.С. Оптимизация способов обработки зубьев на вал-шестерне / Р.С. Ершов // Образование. Наука. Производство: м-лы X Междунар. молодежного форума, Белгород, 1 — 15 октября 2018 г. — Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. — С. 918 — 922.
13. Печенев А.В. Многокритериальная оптимизация двухступенчатого коническо-цилиндрического редуктора / А.В. Печенев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: м-лы XIV Междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, 24 — 25 апреля 2014 г. — Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого. С. 59 — 62.

REFERENCES

1. Ivanovskaya A.V., Zhukov V.A. Mathematical foundations of the development of a control system for marine lifting equipment. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. № 75. P. 66 — 74. — EDN PSBVCR.
2. Starzhinsky V.E., Basinyuk V.L., Mardosevich E.I. Korrektirovka parametrov komponovki dvukhstupenchatogo tsilindricheskogo reduktora [Correcting configuration parameters of a two-stage cylindrical reduction gearbox]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya [Actual Problems of Machine Science]*. 2017. Issue 6. P. 96 — 98.
3. Kudryavtsev V.N., Derzhavets Yu.A., Glukharev E.V. Konstruirovaniye i raschyot zubchatykh reduktorov [Design and calculation of gearboxes]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1971. 328 s.
4. Chernavskii S.A., Snesarev G.A., Kozintsov B.S., Bokov K.N. et al. Proektirovaniye mekhanicheskikh peredach [Design of mechanical gears: textbook. 5th ed.]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984. 560 p.
5. Dunaev P.F. Konstruirovaniye uzlov i detalei mashin [Design of machine assemblies and components: textbook]. Moscow: Akademiya, 2003. 564 p.
6. Snesarev G.A. Optimizatsiya zubchatykh reduktorov [Optimisation of gearboxes]. *Vestnik mashinostroyeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]*. 1985. No. 10. P. 53 — 56.
7. Kurmaz L.V., Skoibeda A.T. Detali mashin. Proektirovaniye [Machine components. Design: textbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 309 p.
8. Ivanov K.Ya. Optimization of the basic parameters of a conical-cylindrical reducer. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after M. F. Reshetnev]*. 2009. No. 2 (23). P. 251 — 253. (In Russ.)
9. Meretukov M.A. K voprosu o raspredelenii obshchego peredatochnogo otnosheniya tsilindricheskogo reduktora mezhdu stupenyami [To the question of distribution of the general transfer ratio of the spur gearbox between stages]. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [Bulletin of Adygeya State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences]*. 2018. No. 2(221). P. 160 — 163.
10. Schevchenko S.V., Mukhovaty A.A., Krol O.S. Osobennosti konstruirovaniya dvukhstupenchatogo konicheskogo reduktora [Features of two-stage conical reducer construction]. *Avtomatizirovannoe proektirovaniye v mashinostroyenii [Automated design in mechanical engineering]*. 2019. No. 7. P. 26 — 30.
11. Baryshnikov S.O., Afanasyev A.K., Ivanov A.N. Features of the distribution of ordinary gearboxes gear ratio with high tooth hardness for the drive of ship and crane mechanisms. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2021. Vol. 13, No. 5. P. 694 — 709. (In Russ.) DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-5-694-709.
12. Ershov R.S. Optimizatsiya sposobov obrabotki zub'ev na val-shesterne [Optimization method for tooth modifications on pinions]. *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Materialy X Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma, Belgorod, 01 — 15 Oct. 2018 [Education. Science. Production: Proc. of X Intern. Youth Forum]*. Belgorod: BG TU im. V.G. Shuhova, 2018. P. 918 — 922.
13. Pechenev A.V. Mnogokriterial'naya optimizatsiya dvukhstupenchatogo konicheskogo-tsilindricheskogo reduktora [Multi-criteria optimisation of a two-stage bevel spur gearbox]. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroyeniya, energetiki i upravleniya: Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Research and Development in the Field of Mechanical Engineering, Power Engineering and Management: Proc. of XIV Intern. Scientific and Technical Conf. of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]*. Gomel, 24 — 25 Apr. 2014. Gomel: GGTU im. P.O. Suhogo. P. 59 — 62.

УДК 629.5.01 + 629.5.011 + 629.5.016
EDN LOTFGJ

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНЫ СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СВОБОДНОПОРШНЕВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

А.М. Абакумов, инженер ООО «Криогаз моторное топливо», 199106 Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 80А, комн. 137, e-mail: a.abakumov@cryogasmt.ru

В статье проанализировано текущее состояние рынка малооборотных судовых двигателей (МОД). Приведены основные требования к судовым двигателям, выдвигаемые Международной морской организацией (ИМО) в части энергоэффективности и эмиссии вредных веществ. Кратко рассмотрены дальнейшие пути совершенствования МОД в части снижения выбросов CO₂ путем перехода на безуглеродное судовое топливо — аммиак. Показано, что в условиях отсутствия возможности приобрести лицензию на производство таких двигателей организация в России собственного производства МОД в разумные сроки маловероятна.

Приведен краткий обзор конструкции и истории развития свободнопоршневых двигателей (СПД) и их применения на судах в качестве МОД. Показана возможность замены МОД классической конструкции на СПД с учетом современных требований по экологичности и экономичности судовых двигателей. Дана информация о ходе работ по проекту-демонстратору возможностей СПД в качестве МОД. Задача автора статьи привлечь внимание к альтернативному традиционным МОД пути развития отечественного судового двигателестроения на базе свободнопоршневой технологии.

Ключевые слова: газодизель, свободнопоршневой двигатель, двухтактный двигатель, малооборотный двигатель, эмиссия NO_x, эмиссия SO_x, эмиссия CO₂, ИМО, перспективное судовое топливо, энергоэффективность, импортозамещение.

Для цитирования: Абакумов А.М. О возможности замены судовых малооборотных двигателей свободнопоршневыми двигателями / А.М. Абакумов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 119 — 133. — EDN LOTFGJ.

ON THE POSSIBILITY OF REPLACING MARINE LOW-SPEED ENGINES WITH FREE-PISTON ENGINES

A.M. Abakumov, Engineer, ООО «Kriogaz motornoe toplivo», 199106 Russia, St. Petersburg, Bol'shoi pr. V.O., 80A, komn. 137, e-mail: a.abakumov@cryogasmt.ru

The article analyzes the current state of the low-speed marine engines (LSME) market. The main requirements for marine engines put forward by the International Maritime Organization (IMO) in terms of energy efficiency and emissions of harmful substances are given. Further ways of improving LSMEs in terms of reducing CO₂ emissions by switching to carbon-free marine fuel — ammonia — are briefly considered. It is shown that in the absence of the possibility of acquiring a license for the production of such engines, the organization of our own LSME production in Russia within a reasonable time frame is unlikely.

A brief overview of the design and history of development of free-piston engines and their use on ships as LSMEs is given. The possibility of replacing LSMEs of a classical design with free-piston engines is shown, taking into account modern requirements for environmental friendliness and efficiency of marine engines. Information is given on the progress of work on a project demonstrating the capabilities of free-piston engines as LSMEs.

The author's task is to draw attention to a way of developing domestic marine engine-building based on free-piston technology as an alternative to traditional LSME.

Keywords: gas-diesel, free-piston engine, two-stroke engine, low-speed engine, NO_x emission, SO_x emission, CO₂ emission, IMO, advanced marine fuel, energy efficiency, import substitution.

For citation: Abakumov A.M. On the possibility of replacing marine low-speed engines with free-piston engines. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 119 — 133. EDN LOTFGJ. (In Russ.)

1. КРАТКИЙ ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА МАЛООБОРОТНЫХ СУДОВЫХ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Постоянное ужесточение экологических требований к судовым главным малооборотным двигателям, повышение требований к их экономичности, размеру и стоимости развернули небывалую конкурентную гонку среди ведущих мировых двигателестроительных компаний.

Темпы и затраты на разработку низкооборотных двигателей таковы, что на международном рынке остались всего три компании, ведущие самостоятельные разработки МОД [1]:

1) MAN Energy Solutions — 70 % рынка, основной задел получен путем поглощения датской компании Burmeister & Wain, которая имеет опыт производства ДВС с 1890 года. Основной объем двигателей производится в компаниях-лицензиатах (15 компаний);

2) WinGD (г. Винтертур, Швейцария) — 20 % рынка, технологический задел получен при поглощении в 1997 году финской компанией Wärtsilä швейцарской Sulzer, которая выпустила первый дизельный двигатель в 1898 году. В 2016-м владельцем 100 % акций WinGD становится China State Shipbuilding Corporation (CSSC). Основной объем двигателей производится компаниями-лицензиатами (9 компаний);

3) J-eng (Japan engine) — 10 % рынка, компания создана в 2017 году путем слияния компаний Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery и ее основного лицензиата Kobe Diesel, технологический задел получен от компании Mitsubishi, которая выпустила первый морской дизель в 1928 году по лицензии B&W. Компания не имеет лицензиатов собственной технологии и, напротив, сама является лицензиатом технологий компании WinGD.

Новые МОД должны соответствовать правилам Международной морской организации (ИМО) в части экологических требований и требований к энергоэффективности и безопасности [2]. Рассмотрим наиболее важные из этих правил.

- Правила, ограничивающие содержание серы в судовых топливах для судов, указаны в Правиле 14 (Оксиды серы (SO_x) и твердые частицы (PM)) Приложения VI к МАРПОЛ 73/78, в котором требования к предельному содержанию серы постепенно ужесточаются. Ограничение для района открытого моря было усилено с 3,50 % до 0,50 % с 1 января 2020 года. В зонах контроля выбросов (ECA) с 1 января 2015 года 0,1 %. Зона ECA постоянно расширяется: с 1 мая 2024 года в ECA входит все Средиземное море.

- Предельные значения выбросов оксидов азота (NO_x) определены в Правиле 13 Приложения VI МАРПОЛ: с 2011 года вне пределов зоны ECA выбросы оксидов азота МОД не должны превышать 14,4 г/кВтч (Tier 2), а в зоне ECA 3,4 г/кВтч (Tier 3).

- ИМО не выдвигает прямых требований к уровню эмиссии CO_2 . Они определяются через Конструктивный коэффициент энергоэффективности (Energy Efficiency Design Index, EEDI) [3], который определен в Правиле 22 Приложения VI МАРПОЛ. EEDI представляет собой соотношение эмиссии CO_2 к полезной транспортной работе. С течением времени требования по EEDI ужесточаются. Эмиссия CO_2 находится в прямой зависимости от количества использованного топлива и от количества содержащегося в нем углерода, поэтому удельный расход топлива важен для EEDI. На EEDI влияет не только экономичность двигателя, но и правильно выбранная скорость, обводы корпуса и т.д. [4].

Обеспечение требований по эмиссии SO_x

Есть всего три способа снизить эмиссию оксидов серы [1, 5, 6].

1. Использование жидких топлив с низким содержанием серы. MGO с содержанием серы <0,5 % для районов открытого моря, VLFSO с содержанием серы <0,1 % для районов ECA. Эти два вида топлива дороже традиционного тяжелого топлива IFO380 примерно на 40 % и 20 % соответственно.

2. Использование скрубберов (устройств для отмывки выхлопных газов заборной или специально подготовленной водой) удорожает проект судна, требует много места, снижает мореходность, приводит к снижению топливной экономичности примерно на 0,5 г/кВтч из-за увеличения сопротивления для выхлопных газов, требует дополнительного расхода э/э от бортовых генераторов до 6 кВтч/МВт мощности МОД, требует расхода щелочи до 20 л/МВтч мощности МОД. Также не все порты принимают суда со скрубберами, не везде можно сливать оборотную воду от скрубберов.

3. Использование альтернативных топлив, не содержащих серы, — на сегодняшний день это стандарт «де-факто». По данным английской консалтинговой компании Clarkson Research, в 2022 году 54 % заказанных судов по тоннажу были на альтернативном топливе (СПГ, метанол, СУГ), а в первом полугодии 2024 года — 41 % [7]. Большая часть двигателей на альтернативном топливе использует газодизельный процесс с использованием

впрыска газа под давлением 300 бар непосредственно в цилиндр вблизи ВМТ, что обеспечивает самую лучшую топливную экономичность, не отличающуюся от экономичности при работе на жидком топливе, нетребовательность к качеству газа и минимальную эмиссию метана — порядка 0,2 г/кВтч. Использование запального жидкого топлива минимально, лучшее значение всего 1,5 %. Небольшая часть двигателей, в основном для газозовов СПГ, использует процесс с предварительным смешиванием воздуха и топливного газа. Давление газа небольшое, обычно 12 — 16 бар. Использование запального жидкого топлива хуже, обычно 3 — 5 % [8]. Эмиссия несгоревших углеводородов значительна. Газодизельный процесс низкого давления предъявляет более высокие требования к качеству топливного газа.

Обеспечение требований по эмиссии NO_x

Требования Tier 2 для районов открыто выполняются за счет оптимизации процесса сгорания, уровень эмиссии NO_x на тяжелом судовом топливе составляет обычно 11 — 12 г/кВтч, в газодизельном режиме с использованием СПГ — меньше на 20 — 25 % [1, 5, 6].

Требования Tier 3 для районов с контролируемой эмиссией ЕСА могут быть выполнены тремя способами [9, 6, 10, 11].

1. С помощью системы рециркуляции выхлопных газов (Exhaust Gas Recirculation, EGR) с промежуточным охлаждением, обеспечивающей 2 — 3 различных варианта прохождения выхлопных газов через турбокомпрессор(ы). Выхлопные газы охлаждаются и очищаются от сернистых газов с помощью щелочи. Требуется система очистки оборотной воды. В случае работы на тяжелом судовом топливе размеры и стоимость системы очистки значительна. EGR ухудшает топливную экономичность примерно на 3 — 5 г/кВтч при 100%-й нагрузке, требует расхода от бортовых генераторов э/э примерно 4 — 9 кВтч/МВт, расхода щелочи 0,1 — 10 л/МВтч. Для газодизельного режима операционные затраты на систему EGR существенно меньше, примерно 30 — 50 % от режима работы на тяжелом топливе.

2. С помощью системы каталитической очистки выхлопных газов SCR (Selective Catalytic Reduction) с впрыском мочевины до или после турбокомпрессора. Отдельную сложность представляет собой задача поддержания требуемой температуры реакции при малых нагрузках двигателя и термической стабильности двигателя, решение которой требует включения в состав системы SCR горелок и мощных воздухоподогревателей. Система SCR, работающая до турбокомпрессора, конструктивно проще, но не позволяет работать на сернистом судовом топливе. SCR ухудшает топливную экономичность примерно на 0,5 — 2 г/кВтч, разбег значений соответствует нагрузке на МОД 25 — 100 %.

3. С помощью системы послонного ввода воды и MDO через одну форсунку в камеру сгорания. Вода, испаряясь, сильно снижает температуру в камере сгорания, что приводит к существенно более низкому уровню образования оксидов азота. Нет потерь в топливной экономичности и дополнительных затрат. Применяется только компанией J-eng для двигателей мощностью до 15 МВт. Но есть и существенный недостаток: можно использовать только одно монотопливо — дорогое MDO [1, 9].

Обеспечения требований по эмиссии парниковых газов, топливная эффективность

Как уже говорилось выше, эмиссия CO₂ находится в прямой зависимости от количества использованного топлива и от количества содержащегося в нем углерода, поэтому удельный расход топлива важен. Газодизельные и газовые двигатели дают примерно на 20 % меньшую эмиссию CO₂ при той же работе [8].

Лучший удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 156 — 165 г/кВтч имеют МОД J-eng [9]. МОД WinGD имеют худшие показатели по экономичности, в среднем 170 — 180 г/кВтч [10]. Двигатели MAN B&W по экономичности находятся посередине между J-eng и WinGD с показателями 161 — 176 г/кВтч [11]. Удельный расход на 75 % мощности МОД обычно меньше на 3 — 5 г/кВтч.

Ключевым решением, позволившим МОД достичь столь высоких экологических и эксплуатационных характеристик, стала концепция «электронного двигателя», когда МОД не имеют распредвала, а все системы жизнеобеспечения двигателя управляются гидравлическими актуаторами с электрическим приводом. Полностью электронное управление двигателем стало стандартом «де-факто». В 2024 году в производственной программе MAN B&W остался всего один двигатель с распредвалом [11].

Электронно управляемый гидропривод выпускного клапана позволяет реализовать гибкое управление степенью сжатия, сохраняя высокое значение среднего эффективного давления (MEP) при ограничении максимального давления цикла (Pz). Например, последняя серия 10 двигателей MAN B&W имеет MEP 21 бар

при $P_z = 186$ бар [11]. Также управление клапаном используется для достижения требуемых экологических характеристик и режимов работы турбокомпрессора.

Фактически современные МОД являются двигателями с изменяемой степенью сжатия и расширенным циклом расширения. Выпускной клапан закрывается позже на цикле сжатия, позволяя сохранять высокую геометрическую степень сжатия и расширения при управляемой рабочей степени сжатия. Рабочая степень сжатия меняется в зависимости от нагрузки. При частичной нагрузке она увеличивается, а при полной немного уменьшается (контроль P_z). Можно назвать такую работу реализацией цикла Миллера для двухтактных двигателей [12].

Электронно управляемый гидропривод ТНВД реализует режим «восходящего впрыска», который обеспечивает рост давления по мере осуществления впрыска, в то время как в обычной топливной системе с топливным аккумулятором давление падает по мере осуществления впрыска. На сегодняшний момент это самая передовая топливная система для дизельных двигателей, которая обеспечивает практически мгновенный впрыск после достижения двигателем P_z . Можно сказать, что такая топливная система сочетает в себе преимущества изобарного сгорания по циклу Дизеля и изохорного сгорания по циклу Отто [12].

Электронное управление системой смазки позволяет впрыскивать смазку точно между первым и вторым кольцом, что позволяет добиться низкого коэффициента трения и расхода смазки $0,6$ г/кВтч на бессернистом топливе.

Электронное управление двигателем позволило применить высокоэффективные системы наддува высокого давления со степенью повышения давления в одну ступень $4,7$. КПД одноступенчатого наддува 67% , двухступенчатого 80% (MAN B&W) [13]. На двигателях с большими диаметрами поршня применяется система турбо-компаунд, когда часть избыточных выхлопных газов отводится в силовую турбину, соединенную через редуктор с генератором, позволяющая экономить $3 — 5\%$ от мощности двигателя через уменьшение использования вспомогательных двигателей [14].

Важным элементом повышения общей топливной экономичности судна является использование валогенераторов и паровых котлов-утилизаторов остаточной теплоты выхлопных газов [15].

Котлы на отработавших газах и паровые турбины с одним или двумя уровнями давлений позволяют экономить $4 — 7\%$ или $5 — 8\%$ от мощности двигателя через уменьшение использования вспомогательных двигателей. Использование валогенераторов, когда к задней части коленвала МОД подключается генератор специальной конструкции, позволяет существенно уменьшить использование менее эффективных вспомогательных двигателей [14].

Перспективные требования по эмиссии парниковых газов, аммиачный двигатель

В 2023 году ИМО приняла новую Стратегию по парниковым газам для судоходства [16]. Она направлена на сокращение выбросов парниковых газов в отрасли на 1 млн тонн в год и достижение нулевого уровня выбросов от морских перевозок к 2050 году (рис. 1).

Сокращение выбросов парниковых газов в международном судоходстве, 2008 – 2050 гг.

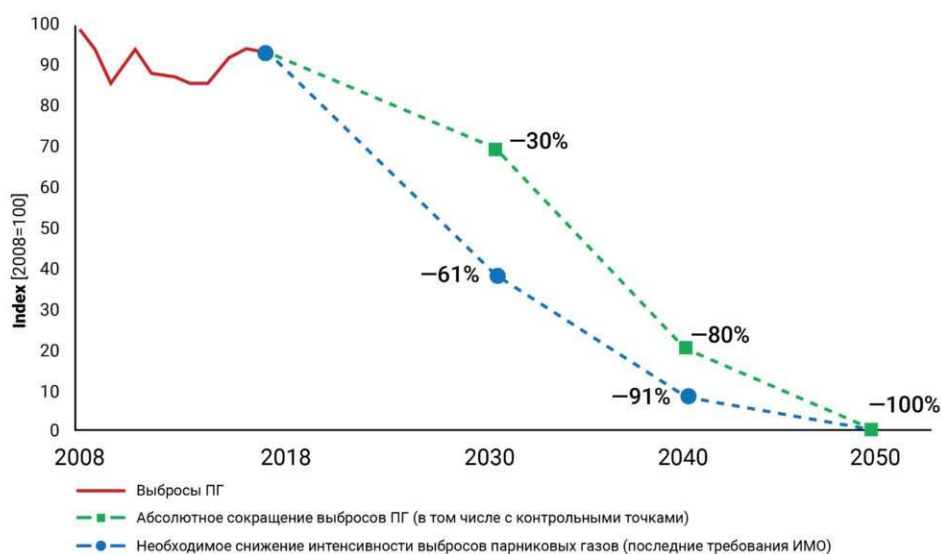
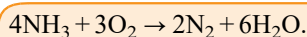


Рис. 1. Дорожная карта снижения выбросов парниковых газов на водном транспорте ИМО 2023 [17]

Документ устанавливает «ориентировочные контрольные точки» общих выбросов от судов. К 2030 году они должны быть сокращены не менее чем на 20 %, стремясь к 30 %, по сравнению с уровнями 2008 года. Также поставлена цель добиться того, чтобы в судоходстве к 2030 году доля топлива и технологий с нулевым или близким к нулю уровнем выбросов парниковых газов составляла 5 — 10 % [16].

Понимание, что перспективные требования ИМО на обычном углеводородном топливе невыполнимы, а «зеленый» водород как энергетический носитель по-прежнему недоступен, заставило большую тройку производителей МОД включиться в гонку по созданию газодизельного МОД, работающего на аммиаке [4]. Как известно, сгорание аммиака идет без образования CO_2 по формуле:



Однако использование аммиака в ДВС сопряжено с рядом проблем из-за его токсичности, коррозионной активности и трудности воспламенения и хорошего сгорания.

Лидером в гонке по производству аммиачных МОД является MAN B&W, которая отгрузила в 2024 году первый коммерческий двигатель на аммиаке. Кроме того, технология впрыска аммиака под давлением 300 бар в жидкой фазе обеспечивает самое лучшее замещение в 95 % и топливную эффективность, аналогичную дизельному режиму работы [18]. WinGD принимает коммерческие заказы и обещает поставить свой первый коммерческий аммиачный МОД во 2-м квартале 2035 года. Аммиак подается в газовой фазе под давлением в 85 бар. J-eng несколько отстала в этой гонке и обещает в течение 2025 года только закончить заводские тесты пилотного образца МОД.

2. ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВЫПУСКА РОССИЙСКОГО МОД

До 2040 года в РФ необходимо построить не менее 270 крупнотоннажных судов, часть из них уже строится, следует из данных Минпромторга. При этом для их строительства потребуется не менее 414 судовых малооборотных двигателей мощностью свыше 10 МВт [19].

Возможность лицензирования производства существующих МОД у большой тройки в силу политических причин полностью исключается, как, впрочем, и продажа. Иллюзии получить лицензию или технологическую помощь от китайской CSSC, контролирующей WinGD, безосновательны. Необходимо помнить, что сама WinGD является швейцарской компанией, находящейся в городе Винтертур. Китайские заводы являются лицензиарами WinGD, которая вне зависимости от позиции собственника должна соблюдать санкционный режим.

В настоящий момент в СМИ появились сообщения о двух независимых проектах создания отечественного МОД, отвечающего действующим и перспективным требованиям ИМО: группа «Синара» на собственных мощностях и ОСК на новой, специально построенной площадке. Оценочные суммы инвестиций 190 и 200 млрд рублей, срок изготовления пилотного образца 5 лет. Предполагается, что отечественный МОД будет получен путем реинжиниринга одного из МОД большой тройки [20].

Насколько реальны эти планы? При существующем технологическом заделе, к сожалению, мало реальны. Существует риск неэффективного расходования государственных средств и срыва программы строительства российских крупнотоннажных судов. Понимаю, что это утверждение весьма печально, но попробую аргументировать свою позицию, перечислив ключевые «бутылочные горлышки», через которые придется пролезть авторам этих проектов.

- Практически все МОД являются электронными без распределителя, со сложной электрогидравлической системой контроля выпускного клапана, топливной аппаратуры, системы подачи смазки и т.д. В России отсутствует производство прецизионной механики и гидравлики такого уровня. Поставка такой гидравлики под жесткими санкционными ограничениями. Без таких систем выполнение требований ИМО крайне проблематично.

- Высокоэффективные системы турбонаддува с высоким КПД и малой инерционностью. За последние 70 лет в СССР и РФ предпринималось много попыток создать турбокомпрессор с высокими характеристиками — все они потерпели поражение. Нет оснований считать, что в условиях ограничений на поставку высокоточных металлообрабатывающих центров, жаропрочных сталей и пр. удастся за несколько лет решить вопросы, которые не были решены за десятилетия.

- Систему управления МОД невозможно просто скопировать, придется создавать ее заново на доступной компонентной базе. Это потребует наличия цифровой модели управления, которая должна быть создана с использованием специальных программных комплексов. В России такие программные комплексы полностью отсутствуют.

- Системы балансировки МОД чрезвычайно сложны, так как должны учитывать взаимодействие с корпусом судна при различных уровнях загрузки и качки на волне. Часто такие системы имеют активный компонент, создающий волны вибраций в противофазе. Конструирование таких систем невозможно без специального программного моделирующего обеспечения, которое в России отсутствует.

- Как говорилось выше, все современные МОД в основном газодизельные. Форсунка для впрыска газа под давлением 300 атмосфер находится за пределами не только российских технологических возможностей: и в мире практически никто не может повторить успех немецких машиностроителей. Будет представлять сложность в проектировании и производстве газификатор высокого давления большой производительности. Он должен обеспечить подачу топливного газа практически без пульсаций. Подача газа осуществляется по специальным трубам системы «труба в трубе», и внутренняя и внешняя трубы должны выдержать давление 300 бар. Такие трубы не выпускаются в России и никогда не выпускались в СССР.

- Стандартные машиностроительные сложности — коленвалы больших размеров, крупноразмерное литье и его последующая обработка. Отсутствие литейного чугуна и стали нужных марок. Отсутствие опыта в выпуске систем SCR и EGR больших размерностей. Это уже «мелочи» на фоне вышеизложенных сложностей.

Напомню, что современные МОД ведут свою генеалогию по большому счету от двух компаний, стоявших у истоков дизельного двигателестроения 130 лет назад: Burmeister & Wain и Sulzer. Даже компания MAN не смогла освоить сама производство конкурентных МОД и была вынуждена купить B&W. К сожалению, пройти путь технического развития в 130 лет невозможно ни за пять, ни за десять лет. Нужен другой путь.

3. РОССИЙСКИЙ СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ, РЕАЛЬНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА МОД

История создания и принципы работы свободнопоршневого двигателя

Идея комбинированной силовой установки, состоящей из генератора газа и отдельной расширительной машины, впервые была предложена в начале XX века профессором МВТУ В.И. Гриневецким, дальнейшее развитие эта разработка получила в трудах его ученика А.Н. Шелеста в 1914 году. В 1923 году советский инженер Е.Е. Лонткевич осуществил один из первых проектов свободнопоршневого генератора газа (СПГГ) путем непосредственного соединения поршней двигателя внутреннего сгорания с поршнями компрессора [21].

Дальнейшее развитие и свой современный вид СПД и СПГГ получили в работах французского инженера аргентинского происхождения барона Рауля Пескары. Р. Пескара основал легендарную компанию SIGMA, которая добилась коммерческого успеха СПГГ с моделью GS34 мощностью 1,25 МВт (рис. 3).

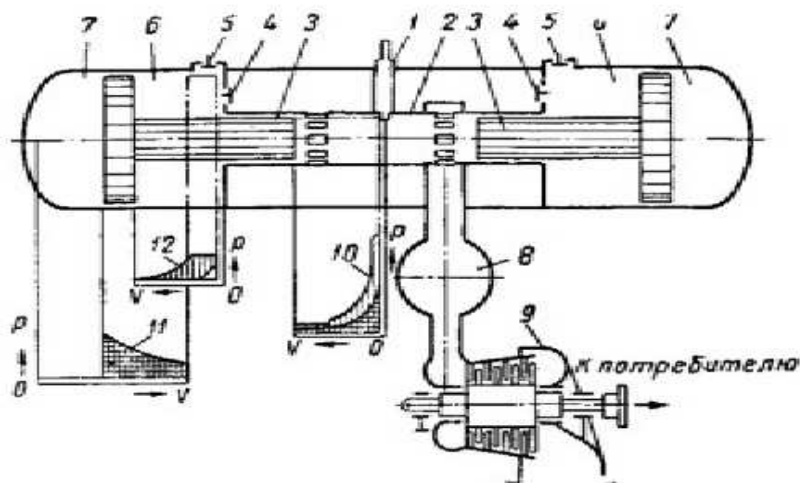


Рис. 2. Свободнопоршневой двигатель = свободнопоршневой генератор газа (СПГГ, схема GS34) + силовая турбина [22]:

- 1 — дизельная форсунка; 2 — гильза (рабочий цилиндр); 3 — комбинированный силовой и компрессорный поршень;
 4 — выпускные клапаны; 5 — впускные клапаны; 6 — компрессорная полость; 7 — воздушная пружина;
 8 — выходной коллектор; 9 — силовая турбина; 10 — индикаторная диаграмма 2-тактного дизельного цикла;
 11 — индикаторная диаграмма воздушной пружины; 12 — индикаторная диаграмма компрессора

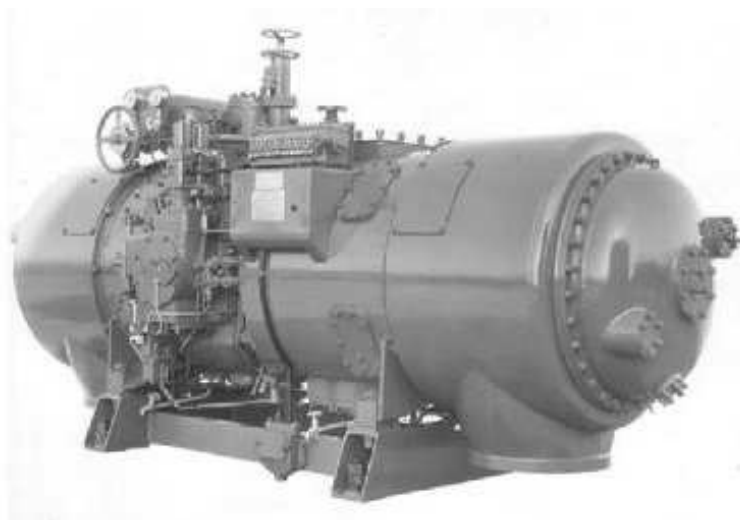


Рис 3. Легендарный СПГТ GS34 компании SIGMA [23]

Свободные поршни (3) под действием сил, полученных от сгорания дизельного топлива в рабочем цилиндре (2), сжимают воздушную пружину (7), которая, разжимаясь, приводит в действие поршневой воздушный компрессор (6). Воздух из атмосферы поступает через входные клапаны (5), сжимается и поступает через выходные клапаны (4) в ресивер, откуда поступает в дизельный цилиндр, где после его сжатия на обратном ходе воздушной пружины (7) происходит впрыск дизельного топлива. Конечным продуктом работы является сжатый воздух, перемешанный с продуктами сгорания, энергия которого срабатывается в расширительной машине (турбине 9) [22]. Принципиальной особенностью СПГТ является свободный ход поршней, не ограниченный кинематикой коленвала и, как следствие, изменяемая «из коробки» степень сжатия.

Изложу коротко историю компании SIGMA. С 1939 года она производила свободнопоршневые дизельные компрессоры (СПДК), когда полезной работой являлся сжатый воздух (любопытный факт: идею украл Юнкерс, и все немецкие подводные лодки оснащались СПДК для продувки балластных цистерн). Удачный работающий прототип СПГТ GS34 был построен в 1945 году с 16-й (!) попытки. Серийное производство GS34 началось с 1951 года. К середине 60-х годов прошлого века выпущено около 500 СПГТ GS34, в компании работает свыше 2000 человек. Успех наконец-то пришел. Но! В 1966 году в возрасте 76 лет Пескара умирает, и в течение пары лет акционеры продают SIGMA компании Bosch. Вместе с SIGMA Bosch получает в свое распоряжение все ключевые патенты в области свободнопоршневого машиностроения, которые продолжают действовать до 90-х годов прошлого века. Bosch закрывает SIGMA, лицензии на использование патентов никому не выдает. Французский конкурент дизельным двигателям классической конструкции устранен, цель достигнута.

За время работы компании SIGMA СПД на базе СПГТ GS34 широко использовались на гражданском и военном флоте в качестве главных двигателей (рис. 4) [22].

Отдельно стоит опыт применения СПД в СССР. В 1961 году был построен пилотный газотурбоход «Павлин Виноградов» [24]. Его силовая установка состояла из четырех свободнопоршневых генераторов газа GS34, вырабатывающих рабочий газ для турбины мощностью 3800 л. с. Водоизмещение судна составляло 9080 т. Скорость хода — 15,6 узла [25]. Всего было построено шесть газотурбоходов с СПГТ. Все они отработали более 25 лет (рис. 5). Одно судно прошло Севморпуть. Сохранились воспоминания главного механика этого судна, в которых он положительно отзывался о надежности и тяговых характеристиках СПД [26, 27]. В связи со списанием кораблей СПГТ были сняты и еще работали в наземной электростанции. Во время перестройки были порезаны на металлолом [28].

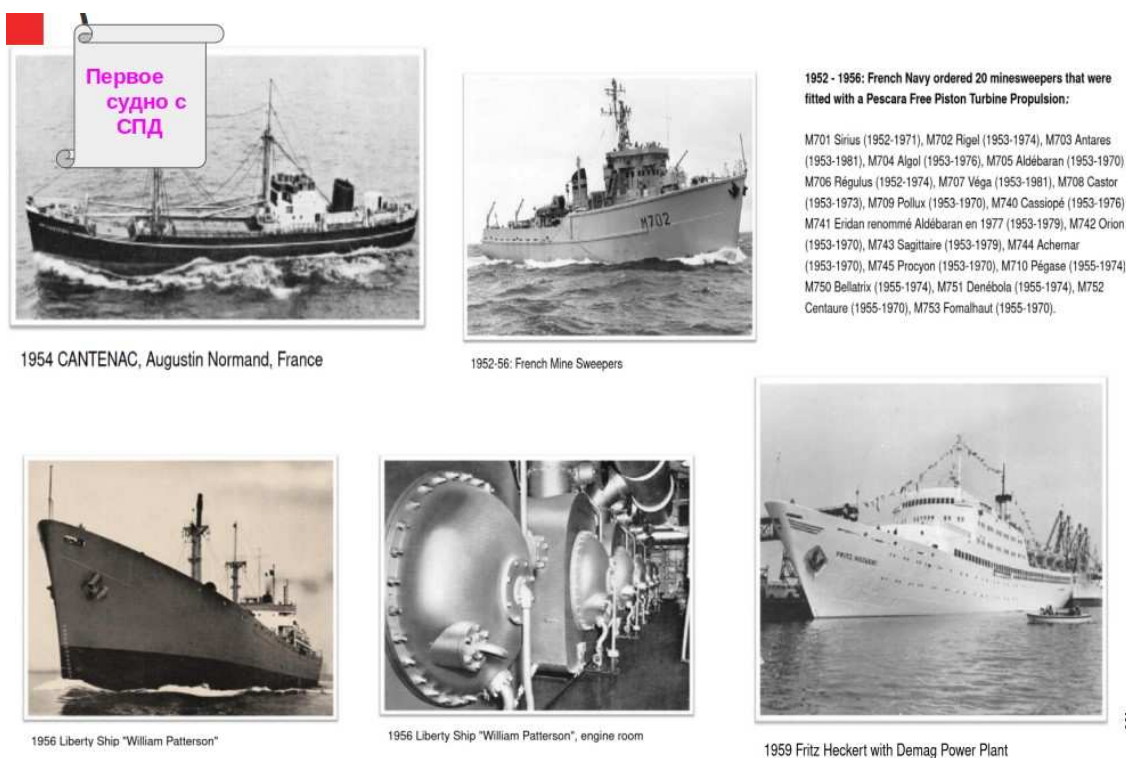


Рис 4. Различные суда, использовавшие СПД на базе СПГТ GS34 в качестве главного двигателя [23]

Стр. №	Построено	Списано	Название	Дата	Приписка
535	11.1960		Лотта	2008	Мурманск
			Павлин Виноградов	1992	Архангельск
536	1961	1985	Мезеньлес		Архангельск
537	1962	1985	Умбалес		Архангельск
538	1963	11.1986	Теодор Нетте		Архангельск
539	1964	21.10.1987	Печоралес		Архангельск
540	1965	20.02.1989	Stal	01.1989	(ФРГ)
			Иоганн Мамасталь	1973	Архангельск



Рис 5. Отечественные суда Проект 580, тип «Павлин Виноградов», использовавшие СПГТ GS34 и отечественную силовую турбину в качестве главного двигателя [29]

Свободнопоршневой двигатель как альтернатива МОД классической конструкции

Разберем основные преимущества СПД как альтернативу МОД классической конструкции.

- Существенно проще по конструкции традиционного ДВС. Может выпускаться серийно на многих машиностроительных предприятиях РФ с учетом имеющегося станочного парка и возможностей по литью. Цилиндрическая камера сгорания позволяет обойтись несколькими дизельными форсунками, освоенными в производстве в России, вместо одной мощной. Импортозамещение 100 % (кроме микросхем в блоке управления).

- Судовая турбина легко реверсируется и обладает идеальной тяговой гиперболической характеристикой, то есть при минимальных оборотах имеет максимальный момент, по мере нарастания оборотов момент падает. Коробка передач или электрическая передача не требуются. Судовые турбины для привода винта — хорошо освоенная, серийно выпускаемая продукция в России. Температура рабочего тела, выработанного СПГТ, не превышает 450 °С, поэтому лопатки турбины могут быть выполнены из дешевой отечественной конструкционной стали.

- Идеально масштабируется вверх просто добавлением нужного количества СПГГ, работающих на одну турбину. Имея один СПГГ, допустим, на 1 МВт, сразу имеем всю линейку МОД от 3 до 25 МВт. Для классического МОД требуется линейка диаметров цилиндров 40 — 900 мм, а внутри каждого диаметра — разное количество цилиндров.

- Высочайшая надежность и ремонтпригодность достигается как за счет конструкционной надежности единичного СПГГ (нет тангенциальных нагрузок на поршень, нет износа гильзы), так и за счет матричного использования нескольких СПГГ на одну силовую турбину. Возможен ремонт любой сложности, включая капитальный непосредственно на борту, в том числе не теряя хода в движении.

- Абсолютная сбалансированность СПГГ. Оппозитная симметричная конструкция полностью уравнивает силы инерции первого и высшего порядка. Описаны случаи, когда монетка, поставленная на работающий СПГГ, оставалась стоять часами неподвижно. Нет необходимости в сложных системах активной и пассивной балансировки. Принципиально другой уровень акустического и вибрационного комфорта для пассажиров и экипажа. В прошлом СПГГ начали применять на роскошных круизных судах прежде всего из этих соображений.

- Изменяемая степень сжатия позволяет работать СПГГ в газодизельном режиме как на СПГ, так и на перспективных экологических видах топлива (аммиак, метанол) с учетом требований МАРПОЛ. Организация подачи в цилиндр топлива возможна при небольшом избыточном давлении.

- В СПГГ может быть реализован перспективный термодинамический цикл НСЦИ¹, недоступный для традиционных ДВС с выдающимися экологическими характеристиками по NO_x менее 0,1 г/кВтч без использования SCR и EGR.

- Отсутствие коленвала и тангенциальных нагрузок в поршневой группе позволяет существенно поднять степень сжатия и выйти на $\text{BMEP} > 30$ МПа и экономичность менее 160 г/кВтч.

- Более простая конструкция системы SCR, что связано с возможностью на режимах частичной нагрузки поддерживать высокую температуру отработавших газов путем отключения части СПГГ.

- Более простая конструкция системы EGR благодаря тому, что температура отработавших газов не превышает 450 °С.

- Возможность использования форсажной камеры, подогревающей рабочее тело между СПГГ и силовой турбиной, позволит кратковременно увеличивать мощность главного СПД на 15 — 20 %.

- Мгновенный запуск из холодного состояния даже при низких температурах. СПГГ заводится с первого цикла или не заводится вообще (неисправен).

Имеются ли у СПД недостатки? Да, безусловно.

- Главный недостаток — необходимость использования редуктора между приводом силовой турбины и винтом. Редуктор существенно ухудшает масса-габаритные характеристики СПД, но не является сложным или дорогим в производстве изделием.

- СПГГ является автоколебательной системой — имеются сложности в регулировании диапазона мощности без снижения общего КПД. Эта проблема решается отключением части СПГГ. Работа остальных СПГГ осуществляется в режиме полной нагрузки.

- Существенно большее количество отработавших газов, смешанных с воздухом, потребуют или SCR большего размера, или специальной конструкции СПГГ с разделением потоков, когда в дизельный цилиндр поступает только необходимое количество воздуха, а остальной воздух сразу поступает на силовую турбину. Возможно, для СПГГ нет смысла вообще использовать SCR. Для режима НСЦИ он не нужен, для обычного режима EGR получается конструкционно проще, чем для стандартного МОД.

¹ Двигатель с воспламенением однородной горючей смеси от сжатия (НСЦИ, от англ. homogeneous charge compression ignition) — двигатель внутреннего сгорания, в котором хорошо смешанное топливо и окислитель (обычно воздух) сжимаются до точки самовоспламенения. Такой двигатель сочетает в себе характеристики обычных бензинового и дизельного двигателей. Также двигатели НСЦИ имеют чрезвычайно низкий выхлоп оксидов азота NO_x даже без применения каталитического нейтрализатора.

4. ПРОЕКТ-ДЕМОНСТРАТОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПД. СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ ГЕНЕРАТОР ГАЗА СПГГ-600

ООО «Криогаз моторное топливо» (cngas.ru, входит в группу компаний «Криогаз») в инициативном порядке реализует проект-демонстратор свободнопоршневого генератора газа мощностью 0,6 МВт (рис. 6).

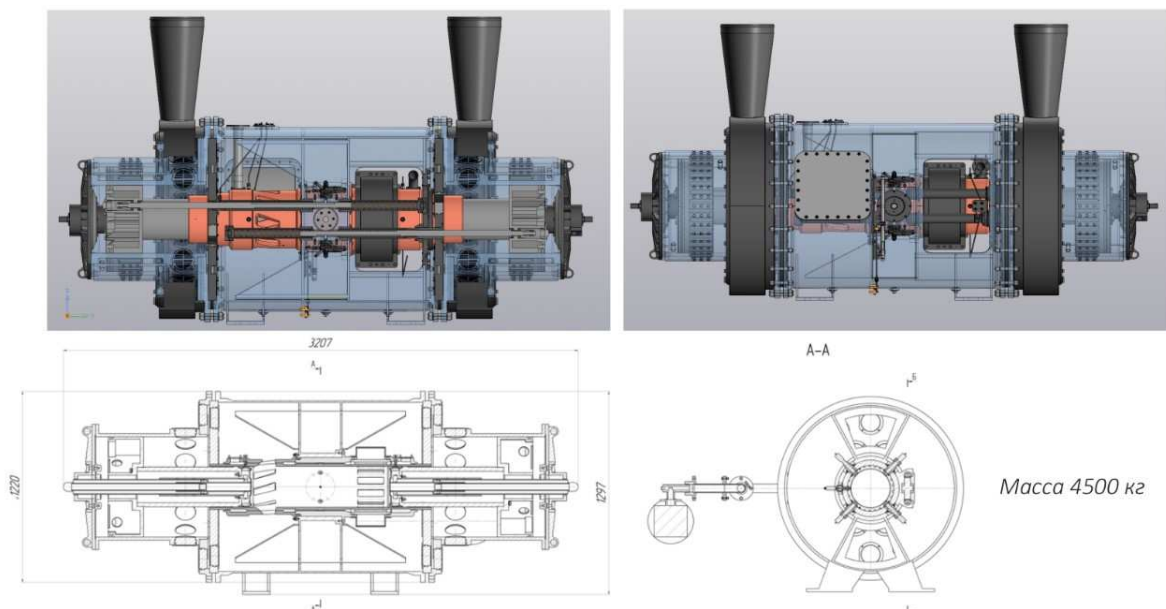


Рис 6. Общий вид с габаритными размерами СПГГ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

Технические характеристики свободнопоршневого генератора газа СПГГ-600:

- степень сжатия — изменяемая (базовая 8) при давлении наддува 5,6 бар. $P_z = 160$ бар;
- количество циклов в минуту 1000, мощность в сжатом газе 600 кВт, средняя скорость поршня 9 м/с, с учетом потеряннного хода 5,3 м/с;
- основной режим работы — на 100 % газовый с воспламенением от сжатия гомогенной топливной смеси (HCCI), выбросы NO_x 0,068 г/кВтч, CO 0,016 г/кВтч. Tier 3 достигается без SCR и EGR. Удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 184 г/кВтч;
- первый вспомогательный режим работы — дизельный, выбросы NO_x 5,24 г/кВтч, CO 1,41 г/кВтч. Tier 2 достигается без SCR и EGR. Удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 202 г/кВтч;
- второй вспомогательный режим работы — газодизельный, выбросы NO_x 4,4 г/кВтч. Tier 2 достигается без SCR и EGR. Удельный расход топлива при 100%-й нагрузке 198 г/кВтч;
- при повышении максимального давления цикла до $P_z = 250$ бар топливная экономичность улучшится примерно на 11 % (HCCI 163 г/кВтч). В связи с отсутствием тангенциальных нагрузок на поршень СПД переносят повышение максимального давления цикла легче;
- масса 4,5 т/МВт, габариты — длина 3,2 м, диаметр 1,3 м.

По состоянию на конец 2024 года конструкторская документация выпущена в полном объеме. Выполнены следующие виды расчетных работ в трехмерной постановке в специализированных программных комплексах:

- расчет рабочего процесса дизельного СПГГ;
- расчет рабочего процесса газодизельного СПГГ;
- расчет рабочего процесса газового СПГГ с искровым зажиганием;
- расчет продувки компрессорной полости. Моделирование перепадов давления на впуске и выпуске;
- моделирование последовательных циклов рабочего процесса дизельного СПГГ (рис. 7);
- оценка влияния угла опережения зажигания и положения свечей зажигания в цилиндре на рабочий процесс;
- оценка параметров рабочего процесса СПГГ при работе в дизельном режиме с разным количеством форсунок.

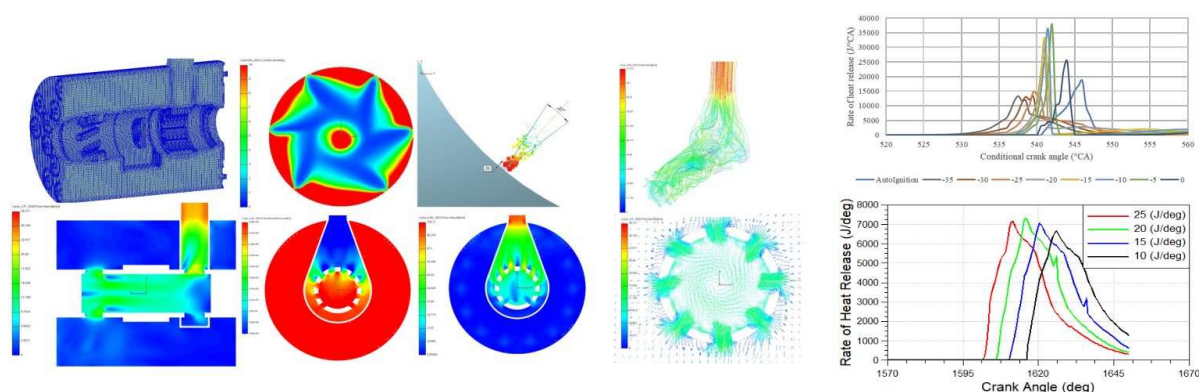


Рис 7. Результаты моделирования последовательных циклов рабочего процесса дизельного СПГТ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

Определены промышленные партнеры для изготовления опытного образца СПГТ.

1. АО «ЧЛМЗ» — Череповецкий литейно-механический завод. Изготовитель заготовки для гильзы втулки рабочего цилиндра по технологии центробежного литья из чугуна ЧНХМД. Заготовка изготовлена (рис. 8).

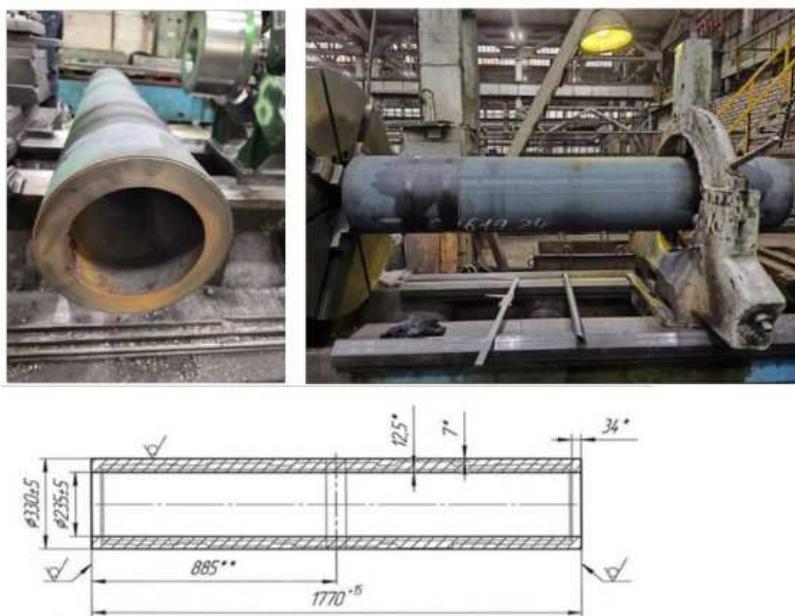


Рис 8. Втулки рабочего цилиндра по технологии центробежного литья из чугуна ЧНХМД для СПГТ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

2. ПАО «Тяжпрессмаш» — Рязанский механический завод. Изготовитель стальных поковок для бандажей втулки рабочего цилиндра. Кузнечное производство. Поковки изготовлены (рис. 9).

3. АО «АЗПИ» — Алтайский завод прецизионных изделий, единственный в РФ производитель топливных форсунок Common Rail. По результатам расчета процесса сгорания разработаны топливные форсунки с углом распыления 20, 30, 40, 60° (рис. 10). Разработана топливная система СПГТ с электроприводом на топливной аппаратуре АЗПИ (топливные рейки, ТНВД).

4. АО «РУМО» — производитель двигателей, электроагрегатов, поршневых компрессоров и газоперекачивающих агрегатов. Сейчас в изготовлении втулка рабочего цилиндра в сборе (рис. 11).

5. ФГУП «Саранский МЗ», ООО «Компрессорные технологии». Быстроходные компрессорные клапаны ПИК 125-1,0 БМ, станция смазочная многоотводная с электроприводом, лубрикатор 41-12, поршневые компрессорные кольца 640 мм из флубона.

В течение 2025 года ожидается выбор промышленных партнеров для производства остальных частей СПГТ, его сборка и испытание.

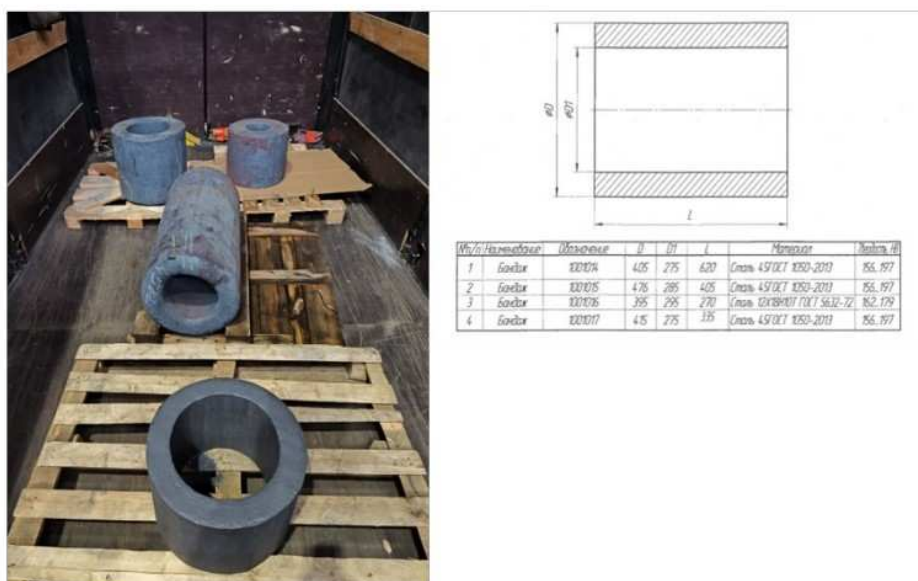


Рис 9. Поковки для бандажей втулки рабочего цилиндра для СПГТ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

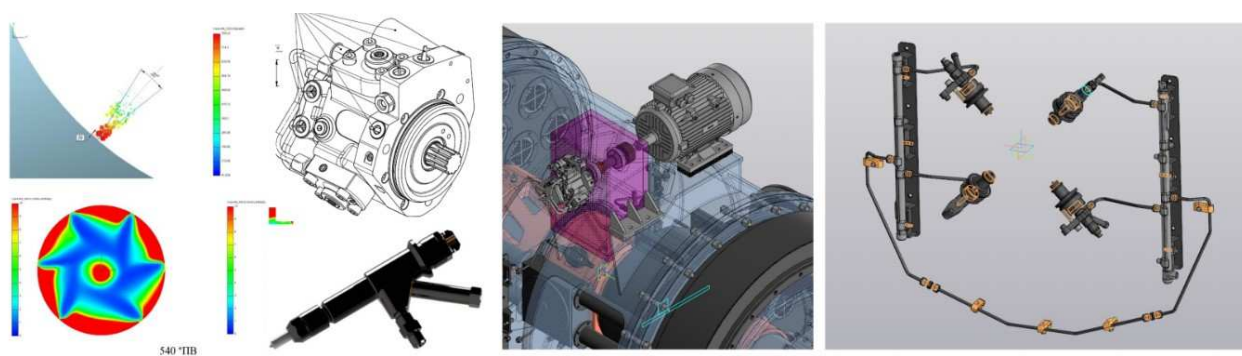


Рис 10. Моделирование процесса распыла дизельного топлива и расположение опытной топливной аппаратуры на СПГТ-600 (собственные материалы ООО «КГМТ»)

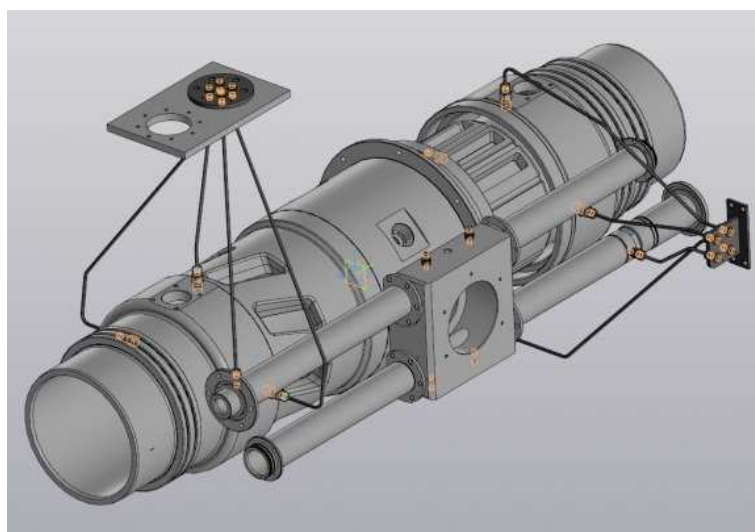


Рис 11. Втулка рабочего цилиндра в сборе (собственные материалы ООО «КГМТ»)

Возможные характеристики свободнопоршневого двигателя для судов класса «Афрамекс» 13 МВт на базе СПГГ-600 вместо WinGD 7X62DF

Танкеры класса «Афрамекс» являются самым универсальным танкером большого размера, который могут принять практически все порты мира, проходя через каналы недоступные для более крупных судов. Потребности России в судах типа «Афрамекс» связаны с необходимостью транспортировки нефти, в том числе через каналы и проливы, а также в условиях Арктики. Особое значение «афрамексы» приобретают в связи со строительством трубопровода «Восточная Сибирь — Тихий океан».

Технические возможности дальневосточного судостроительного комплекса «Звезда» (ССК «Звезда») позволяют строить суда класса «Афрамекс», однако МОД для таких судов отсутствуют.

Рассмотрим характеристики главного двигателя мощностью 13 МВт для танкера класса «Афрамекс» на базе СПД, как замены популярного МОД WinGD 7X62DF:

- количество СПГГ — 24 шт., компоновка блока СПГГ $2 \times 2 \times 6$ шт., размеры блока СПГГ $4 \times 7 \times 10$ м, вес 120 т;
- силовая турбина однокорпусная, реверсивная, КПД 92 %, четырехступенчатая. Размеры и вес ориентировочно $3 \times 2 \times 2$ м, 50 т;
- редуктор планетарный, двухступенчатый, КПД 98 %. Размеры $3 \times 2 \times 2$ м, вес 20 т;
- удельный расход топлива при 100%-й нагрузке в основном топливном режиме (HCCI) 180 г/кВтч при $P_z = 250$ бар (WinGD 7X62DF 178 г/кВтч);
- основной режим работы — на 100 % газовый с воспламенением от сжатия гомогенной топливной смеси (HCCI), выбросы NO_x 0,068 г/кВтч, CO 0,016 г/кВтч. Tier 3 достигается без SCR и EGR;
- вспомогательный режим работы — дизельный, выбросы NO_x 5,24 г/кВтч, CO 1,41 г/кВтч. Tier 2 достигается без SCR и EGR;
- регулирование мощности без потери КПД и с сохранением ресурса СПГГ через отключение неработающих СПГГ;
- общий вес двигателя 190 т при объеме 304 м³ (WinGD 7X62DF 370 т и 585 м³);
- совместимость с валогенераторами (режим РТО) через вал отбора мощности в редукторе или через отдельную силовую турбину.

Анализ выполнимости квалификационных требований СПД и СПГГ

В настоящий момент раздел требований к СПГГ и СПД исключен из Правил Регистра в связи с отсутствием в течение длительного времени случаев постройки судов.

В Правилах классификации и постройки морских судов изданий 1978 — 1995 годов требования к СПГГ и СПД приведены в разделе 9 «ГТУ со свободнопоршневыми генераторами газа» части IX «Механизмы» [30]. Все требования выполняются, как в проекте-демонстраторе СПГГ-600, так и в возможном СПД для судов класса «Афрамекс». Небольшие вопросы вызывает пункт 9.1.4, требующий устройства визуального контроля положения поршней во внешних мертвых точках. Современное развитие средств автоматизации делает такое требование излишним, контроль положения поршней может и должен осуществляться системой управления СПГГ в автоматическом режиме.

ВЫВОДЫ

В условиях беспрецедентного санкционного давления на Россию, сложной международной обстановки, ограниченности внутренних резервов чрезвычайно важно не ошибиться, принять реалистичный план развития российского двигателестроения для крупнотоннажных судов. Ошибка может слишком дорого обойтись для развития флота России, ее обороноспособности и социально-экономического развития.

К сожалению, в настоящий момент национальные технологические, финансовые и производственные возможности ограничены. Развитие свободнопоршневых технологий является разумной альтернативой классическому пути развития судовых МОД. С учетом объема работ по созданию проекта-демонстратора СПГГ-600, уже выполненных ООО «Криогаз моторное топливо», опытный образец СПД мощностью 13 МВт для импортозамещения МОД WinGD 7X62DF для судов класса «Афрамекс» может быть создан в течение двух лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Latache M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 10th ed. / M. Latache. — Oxford: Elsevier, 2021. — 930 p.
2. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4 — 15.
3. Resolution MEPC.364(79) 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. [Электронный ресурс] URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (дата обращения 18.01.2025).
4. Реуцкий А.С., Якимов В.В., Буцанец А.А. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87 — 95.
5. Okubo M. New technologies for emission control in marine diesel engine / M. Okubo, T. Kuwahara. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. — 297 p.
6. Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke Marine Engines. [Электронный ресурс] URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/PG_7020-0145.pdf (дата обращения 18.01.2025).
7. Green Technology & Alternative Fuel Uptake. [Электронный ресурс] URL: <https://www.clarksons.com/home/news-and-insights/2024/green-technology-alternative-fuel-uptake/> (дата обращения 20.01.2025).
8. Karim G.A. Dual-Fuel Diesel Engines / G.A. Karim. — Boca Raton: CRC Press, 2015. — 312 p.
9. UE Engine. [Электронный ресурс] URL: https://www.j-eng.co.jp/news/2022/14le6t0000002eaz-att/UE_catalogue_2022.pdf (дата обращения 18.01.2025).
10. WinGD low-speed engines. [Электронный ресурс] URL: <https://wingd.com/products-solutions/engines/> (дата обращения 20.01.2025).
11. Marine Engine Programme. [Электронный ресурс] URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme> (дата обращения 17.01.2025).
12. Карьянский С.А. Двигатели MAN-B&W типа ME с электронным управлением: уч. пос. / С.А. Карьянский, Е.М. Оженко. — Одесса: НУ «ОМА», 2020. — 92 с. = Karianskyi S., Ozhenko Ye. Electronically controlled MAN-B&W ME type engines: textbook. Odessa, 2020. 92 p. (Рус. и англ. текст.)
13. Fußstetter K. HPT: High Pressure Tuning for MAN Diesel & Turbo two-stroke engines / K. Fußstetter. — 2014. [Электронный ресурс] URL: <https://library.e.abb.com/public/402824f46668b565c1257c94003b6106/HPT-HighPressureTuning.pdf> (дата обращения 12.02.2025).
14. Efficiency of MAN B&W two-stroke engines. [Электронный ресурс] URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/efficiency-of-man-b-w-two-stroke-engines-eng.pdf?sfvrsn=e9d98f29_1 (дата обращения 18.01.2025).
15. Shaft generators for low speed main engines. [Электронный ресурс] URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_14 (дата обращения 18.01.2025).
16. IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. [Электронный ресурс] URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx> (дата обращения 20.01.2025).
17. Сокращение выбросов парниковых газов в международном судоходстве, 2008 — 2050 [Дорожная карта IMO 2023]. [Электронный ресурс] URL: <https://paluba.media/wp-content/uploads/2023/11/14-14-1024x642.jpg> (дата обращения 21.01.2025).
18. MAN B&W ammonia engine development // MAN Energy Solutions. [Электронный ресурс] URL: <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine> (дата обращения 20.01.2025).
19. Дятел Т. Большому кораблю — большой двигатель / Т. Дятел // Коммерсантъ. 13.02.2024. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> (дата обращения 20.01.2025).
20. Дятел Т. ОСК на малых оборотах / Т. Дятел // Коммерсантъ. 10.10.2024. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7215327> (дата обращения 20.01.2025).
21. Асеев Е.Н. Конструирование и расчет безвальных генераторов газа / Е.Н. Асеев, А.С. Эпштейн. — М.: Машгиз, 1962. — 355 с.
22. Шелест П.А. Безвальные генераторы газов / П.А. Шелест. — М.: Машгиз, 1960. — 380 с.
23. www.freikolben.ch/37464/98443.html [Материалы сайта]. [Электронный ресурс] URL: <https://web.archive.org/web/20130824094639/https://www.freikolben.ch/37464/98443.html> (дата обращения 21.01.2025).
24. Гаврилов С.В. Судовые энергетические установки. История развития: уч. пос. / С.В. Гаврилов. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003. — 382 с.
25. Захаров Б.Н. Морские лесовозы / Б.Н. Захаров, В.К. Смирнов. — Л.: Судостроение, 1967. — 227 с.
26. Трубин А.Ф. Анализ технической эксплуатации ГТУ с СПГ судов типа «Павлин Виноградов» и экспериментальное исследование рабочего процесса СПГ при работе на тяжелых топливах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / А.Ф. Трубин, Л., 1968. — 30 с.
27. Филиппов А.П. Эксплуатация судовых двигателей внутреннего сгорания на тяжелом топливе / А.П. Филиппов, Ю.Н. Васильев. — М.: Транспорт, 1965. — 344 с.
28. Теодор Нетте. Имя на борту. [Электронный ресурс] URL: <http://forum.flot.su/showthread.php?t=826&pagenumber=> (дата обращения 22.01.2025).
29. Проект 580, тип Павлин Виноградов. [Электронный ресурс] URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1296/?lang=ru> (дата обращения 22.01.2025).
30. ГТУ со свободнопоршневыми генераторами газа. [Электронный ресурс] URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru#> (дата обращения 21.01.2025).

REFERENCES

1. Latache M. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 10th ed. Oxford: Elsevier, 2021. 930 p.
2. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4 — 15. (In Russ.)
3. Resolution MEPC.364(79) 2022 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364\(79\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf) (accessed 18.01.2025).
4. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 87 — 95. (In Russ.)
5. Okubo M., Kuwahara T. New technologies for emission control in marine diesel engine / M. Okubo, T. Kuwahara. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. 297 p.
6. Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke Marine Engines. URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/PG_7020-0145.pdf (accessed 18.01.2025).
7. Green Technology & Alternative Fuel Uptake. URL: <https://www.clarksons.com/home/news-and-insights/2024/green-technology-alternative-fuel-uptake/> (accessed 20.01.2025).
8. Karim G.A. Dual-Fuel Diesel Engines. Boca Raton: CRC Press, 2015. 312 p.
9. UE Engine. URL: https://www.j-eng.co.jp/news/2022/14e6f0000002eaz-att/UE_catalogue_2022.pdf (accessed 18.01.2025).
10. WinGD low-speed engines. URL: <https://wingd.com/products-solutions/engines/> (accessed 20.01.2025).
11. Marine Engine Programme. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme> (accessed 17.01.2025).
12. Karianskyi S., Ozhenko Ye. Electronically controlled MAN-B&W ME type engines: textbook. Odessa, 2020. 92 p. (In Russ. and Eng.)
13. Fußstetter K. HPT: High Pressure Tuning for MAN Diesel & Turbo two-stroke engines. 2014. URL: <https://library.e.abb.com/public/402824f46668b565c1257c94003b6106/HPT-HighPressureTuning.pdf> (accessed 12.02.2025).
14. Efficiency of MAN B&W two-stroke engines. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/efficiency-of-man-b-w-two-stroke-engines-eng.pdf?sfvrsn=e9d98f29_1 (accessed 18.01.2025).
15. Shaft generators for low speed main engines. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0003-03ppr.pdf?sfvrsn=b570e4e5_14 (accessed 18.01.2025).
16. IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx> (accessed 20.01.2025).
17. Sokrashchenie vybrosov parnikovykh gazov v mezhdunarodnom sudokhodstve [Reduction of greenhouse gas emissions from international shipping], 2008 — 2050 [IMO 2023 Roadmap]. URL: <https://paluba.media/wp-content/uploads/2023/11/14-14-1024x642.jpg> (accessed 21.01.2025).
18. MAN B&W ammonia engine development. *MAN Energy Solutions*. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine> (accessed 20.01.2025).
19. Dyatel T. Bol'shomu korablyu — bol'shoi dvigatel' [A great ship asks for a great engine]. *Kommersant*. 13.02.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6508708> (accessed 20.01.2025).
20. Dyatel T. OSK na malykh oborotakh [United Shipbuilding Corporation on low-speed engine]. *Kommersant*. 10.10.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7215327> (accessed 20.01.2025).
21. Aseev E.N., Epshtein A.S. Konstruirovaniye i raschet bezval'nykh generatorov gaza [Design and calculation of shaftless gas generators]. Moscow: Mashgiz, 1962. 355 p.
22. Shelest P.A. Bezval'nye generatory gazov [Shaftless gas generators]. Moscow: Mashgiz, 1960. 380 p.
23. www.freikolben.ch [Site materials]. URL: <https://web.archive.org/web/20130824094639/https://www.freikolben.ch/37464/98443.html> (accessed 21.01.2025).
24. Gavrilov S.V. Sudovye energeticheskie ustanovki. Istoriya razvitiya [Ship power plants. History of development: textbook]. Petropavlovsk-Kamchatskii: KamchatGTU, 2003. 382 p.
25. Zakharov B.N., Smirnov V.K. Morskie lesovozy [Marine timber carriers]. L.: Sudostroenie, 1967. 227 p.
26. Trubin A.F. Analiz tekhnicheskoi ekspluatatsii GTU s SPGG sudov tipa «Pavlin Vinogradov» i eksperimental'noe issledovanie rabocheho protsessa SPGG pri rabote na tyazhelykh toplivakh [Analysis of technical operation of free-piston gas turbines of "Pavlin Vinogradov" type vessels and experimental study of free-piston gas turbines at operation on heavy fuel: abstract of PhD thesis]. Leningrad, 1968. 30 p.
27. Filippov A.P., Vasil'ev Yu.N. Ekspluatatsiya sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya na tyazhelom toplive [Operation of heavy fuel internal combustion marine engines]. M.: Transport, 1965. 344 p.
28. Teodor Nette. Imya na bortu [Theodor Nette. A name on the board]. URL: <http://forum.flot.su/showthread.php?t=826&pagenumber=> (accessed 22.01.2025).
29. Project 580, Pavlin Vinogradov type. URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1296/?lang=ru> (accessed 22.01.2025).
30. Gas-turbine unit with free-piston gas generators. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules?ln=ru#> (accessed 21.01.2025).

УДК 629.123
EDN LSHMYE

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СУДОВЫХ СИСТЕМ ОБОГРЕВА БАЛЛАСТНЫХ ТАНКОВ

Е.Н. Алексин, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: aleksinevg@yandex.ru
Д.О. Глазырина, ассистент кафедры, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: d_glazyrina@bk.ru
А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 7А; аспирант, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

В статье рассмотрены вопросы расчетного обеспечения проектирования судовых систем обогрева балласта. Балластные цистерны судна, в которые принимается заборная вода, для предотвращения замерзания воды должны быть оборудованы системой обогрева. Обогрев выполняется теплоносителями, циркулирующими по змеевикам, установленным в цистернах. Определение длин змеевиков и расходов теплоносителей является актуальной задачей с учетом недостаточности информации по данному вопросу, содержащейся в отраслевой нормативно-технической документации. В настоящее время для решения указанной расчетной задачи отсутствует соответствующее программное обеспечение, что приводит к необходимости проведения расчетов аналитическим путем. В работе приводятся общие сведения об устройстве и принципе работы судовых систем обогрева балласта и рекомендуемый типовой алгоритм расчета. Также в статье содержится пример расчета для условной цистерны известных размеров.

Ключевые слова: балластные системы, цистерна, обогрев, змеевик, теплоноситель, теплопередача, критериальное уравнение, тепловой поток.

Для цитирования: Алексин Е.Н. Методика расчета судовых систем обогрева балластных танков / Е.Н. Алексин, Д.О. Глазырина, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 134 — 142. — EDN LSHMYE.

METHODS OF CALCULATION OF SHIP'S BALLAST HEATING SYSTEMS

E.N. Aleksin, PhD, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: aleksinevg@yandex.ru
D.O. Glazyrina, Teaching Assistant, St. Petersburg State Maritime Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: d_glazyrina@bk.ru
A.A. Mikheeva, Lead R&D Specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A; PhD student, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

The article discusses the issues of computational support for the design of shipboard ballast heating systems. The ballast tanks of the vessel, which receive seawater, must be equipped with a heating system to prevent freezing of the water. Heating is carried out by heat carriers circulating through coils installed in tanks. Determining the lengths of coils and the flow rates of heat carriers is an urgent task, given the lack of information on this issue contained in the industry regulatory and technical documentation. Currently, there is no appropriate software available to solve this computational problem, which leads to the need for analytical calculations. The paper provides general information about the design and principle of operation of ship's ballast heating systems and a recommended standard calculation algorithm. The article also contains an example of calculation for a conventional tank of known dimensions.

Keywords: Ballast systems, tank, heating, coil, heat carrier, heat transfer, criterion equation, heat flow.

For citation: Aleksin E.N., Glazyrina D.O., Mikheeva A.A. Methods of calculation of ship's ballast heating systems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 134 — 142. EDN LSHMYE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Важной составляющей водоизмещения судов являются различные жидкие среды: вода в балластных цистернах, топливо, смазочное масло, шлам, нефтесодержащие воды, растворы химических реагентов и пр.

При этом в большинстве случаев указанные вещества имеют определенные температурные интервалы хранения, и в зависимости от условий эксплуатации судна требуют или подогрева, или охлаждения. Для судов, эксплуатируемых в арктических и антарктических районах, актуальной задачей является подогрев жидких сред для предотвращения замерзания, снижения вязкости при перекачке, обеспечения корректной работы оборудования и (или) поддержания необходимой реакционной способности.

Целью расчета системы обогрева является определение поверхности теплообмена (фактически — длины змеевика в цистерне) и расхода теплоносителя.

В практике отечественных судостроительных КБ такие расчеты производились в соответствии с отраслевыми руководящими документами [1] и [2], содержащими эмпирические зависимости и номограммы. Однако в указанных РД отсутствуют современные виды теплоносителей и подогреваемых сред, что не позволяет в полной мере применять данные документы в проектировании, увеличивает погрешность вычислений и повышает трудоемкость расчетов.

В данной работе представлены общие сведения о системах обогрева балластных цистерн, методология проведения расчетов, приведен пример расчета на основе вышеупомянутых нормативных документов, практики проектирования и основных положений теплопередачи. Целью работы является разработка упрощенной методики расчета, позволяющей сократить трудозатраты на проектирование систем обогрева.

1. СОСТАВ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ОБОГРЕВА

1.1. В состав типовой системы обогрева входят:

- трубы (включая змеевики обогрева внутри цистерн);
- запорная и регулирующая арматура;
- контрольно-измерительные приборы;
- насосы теплоносителя;
- емкости с теплоносителем (цистерны);
- подогреваемые цистерны;
- теплообменные аппараты;
- судовые котлы.

Подогрев жидкостей производится по двум основным схемам: одноконтурной (рис. 1) и двухконтурной (рис. 2).

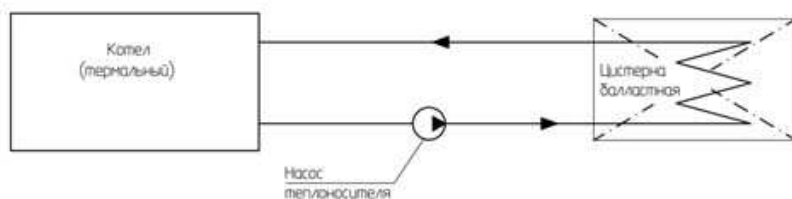


Рис. 1. Одноконтурная система обогрева

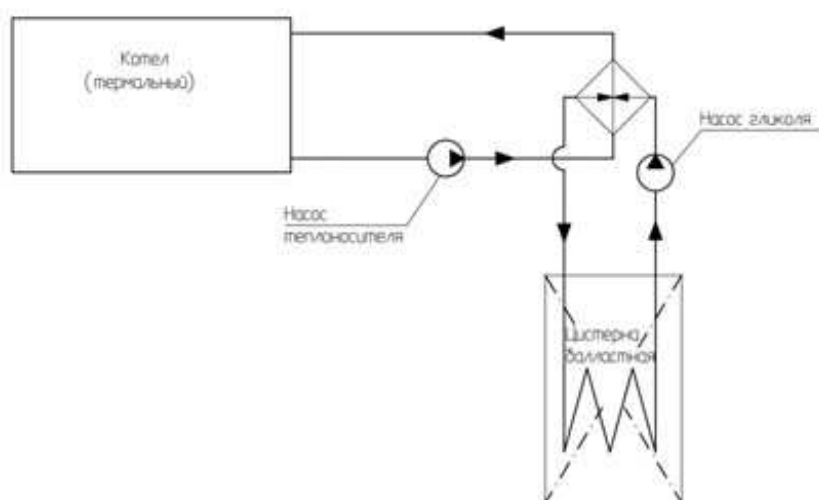


Рис. 2. Двухконтурная система обогрева

1.2. В качестве теплоносителей могут использоваться пар, горячая вода и различные органические вещества.

Благодаря незначительной коррозионной активности и высоким рабочим температурам (до 200 °С) при относительно низких давлениях в системе (4 — 6 бар) в настоящее время наибольшее распространение получили органические теплоносители: термальные масла и водно-гликолевые смеси.

Пример термального котла представлен на рис. 3.

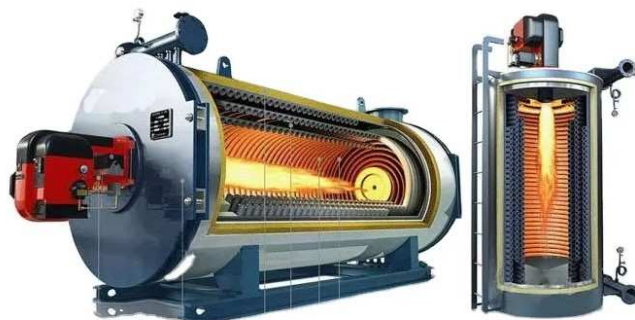


Рис. 3. Термальный котел на органическом топливе [3]

Отметим, что на системы обогрева жидкостей может расходоваться до 20 — 25 % от мощности судовой котельной установки. Распределение тепловой мощности котельной установки по потребителям для двух типов судов ледового плавания, строящихся в настоящее время на отечественных верфях, приведено на рис. 4.

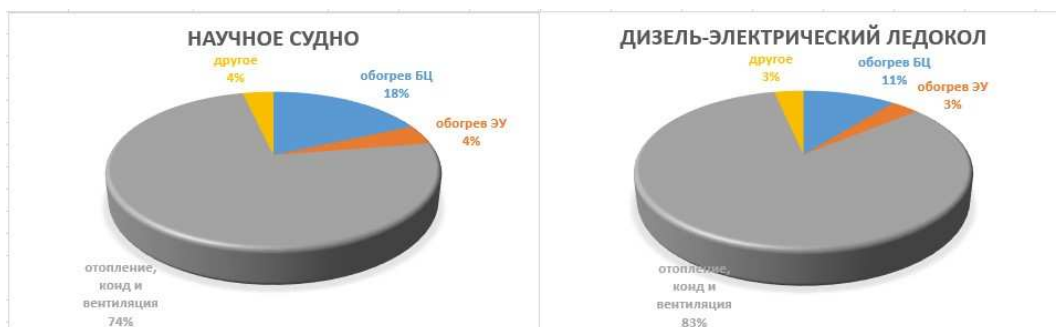


Рис. 4. Потребители тепла котельной установки

2. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА БАЛЛАСТНЫХ ЦИСТЕРН

2.1. Исходные данные для расчета.

Для поддержания проектной осадки судна при расходе судовых запасов (в первую очередь топлива) используются балластные системы.

Забортная вода принимается в балластные цистерны, расположенные в межбортном пространстве, в двойном дне, в форпике и ахтерпике. Пример расположения балластных цистерн приведен на рис. 5.

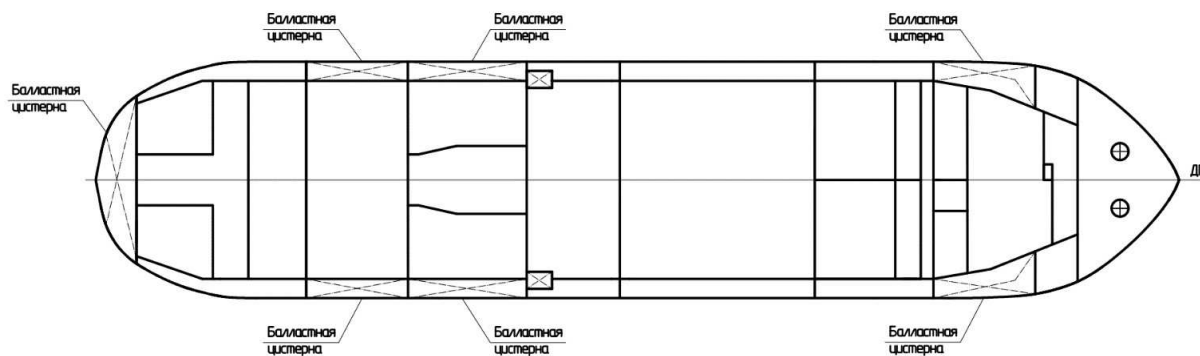


Рис. 5. Пример расположения балластных цистерн на судне

В соответствии с п. 8.3.2 ч. VIII Правил [4] на судах ледовых классов Arc4 — Arc9 форпик, ахтерпик и бортовые цистерны в составе корпуса, предназначенные для воды и расположенные выше ватерлинии, должны оборудоваться обогревом. Вопросы обеспечения высокой точности расчетов таких систем особенно актуальны в связи с интенсификацией судоходства в Российской Арктике и изменением климатических условий в бассейнах Азовского и Черного морей [5, 6].

2.2. Алгоритм расчета системы подогрева таких цистерн предлагается для условий, представленных ниже.

Схема подогрева двухконтурная.

Нагреваемой средой является морская вода.

Греющая среда — водный раствор пропиленгликоля, который нагревается термальным маслом от котельной установки. Обогрев БЦ напрямую термальным маслом не производится из-за необходимости соблюдения правил экологической безопасности (в случае разгерметизации трубопроводов нефтепродукт — термальное масло — попадет в цистерну и, при дебалластировке, за борт).

Теплофизические параметры рабочих сред принимаются при средней температуре пограничного слоя:

$$t_{\text{сл}} = \frac{t_p + t_{\text{ст}}}{2}, \quad (1)$$

где t_p — расчетная температура воды в БЦ,
 $t_{\text{ст}}$ — температура стенки.

Расчетная температура воды в БЦ определяется по формуле:

$$t_p = 0,33 \cdot t_{\text{в}}^{\text{нач}} + 0,67 \cdot t_{\text{в}}^{\text{кон}}. \quad (2)$$

Температура стенки для каждого участка определяется графоаналитическим методом, подбирается методом последовательных приближений либо считается заданной.

При выполнении расчета приняты следующие допущения:

- морская вода занимает весь объем БЦ;
- на внутренних стенках заполненных водой цистерн, граничащих с наружным воздухом, в случае, когда температура наружного воздуха ниже температуры воды в цистерне, образуется ледяная корка, выполняющая функции теплоизолятора и при этом требующая дополнительного количества теплоты для плавления; в расчете данный фактор не учитывается, принято, что система обогрева включается до начала образования корки;
- не учитывается влияние крена и дифферента на уровень воды в цистернах,
- не учтена интенсификация теплоотдачи от воды в цистерне к стенкам цистерны вследствие качки судна: качка добавляет элементы вынужденного движения к свободной конвекции жидкости в цистерне;
- термическое сопротивление и площадь поверхности набора цистерн не учитывается;

— не учитывается геометрия змеевика (возможно увеличение теплоотдачи от теплоносителя к змеевику из-за вторичной циркуляции, возникающей вследствие центробежного эффекта в поперечном сечении трубы).

Расчет произведем для цистерны, представленной на рис. 6.

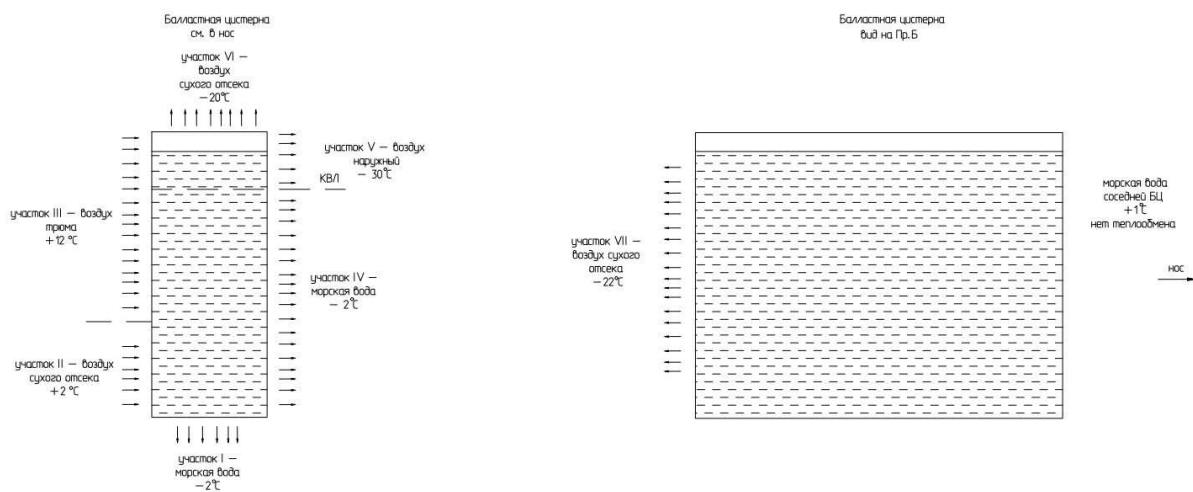


Рис. 6. Схема цистерны

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Обозначение параметра	Наименование параметра	Размерность	Значение
$t_{в}^{нач}$	начальная температура воды в балластной цистерне	°C	-2
$t_{в}^{кон}$	конечная температура воды в балластной цистерне	°C	1
$t_{зв}$	температура забортной воды	°C	-2
$t_{нар}^в$	температура наружного воздуха	°C	-30
$\rho_{в}$	плотность забортной воды	кг/м ³	1025
$\rho_{тн}$	плотность теплоносителя	кг/м ³	1015
$t_{тн}^{вх}$	температура теплоносителя на входе в змеевик	°C	70
$t_{тн}^{вых}$	температура теплоносителя на выходе из змеевика	°C	50
$C_{в}$	теплоемкость воды	кДж/(кг·K)	3,89
$C_{тн}$	теплоемкость теплоносителя	кДж/(кг·K)	3,76
$\nu_{в}$	Кинематическая вязкость воды	сСт	1,78
$\nu_{тн}$	Кинематическая вязкость теплоносителя	сСт	1,60
μ	Динамическая вязкость теплоносителя	мПа·с	1,624
w	Скорость теплоносителя в змеевике	м/с	2
$\lambda_{тн}$	Теплопроводность теплоносителя	Вт/(м·K)	0,392
$\lambda_{в}$	Теплопроводность воды	Вт/(м·K)	0,56
$\lambda_{зм}$	Теплопроводность материала змеевика	Вт/(м·K)	16
	Время нагрева	ч (с)	3 (10800)

2.3. Последовательность расчета:

- 1) составление схемы расположения цистерны;
- 2) определение температур сред «снаружи», в окружающих помещениях;
- 3) определение температур стенок цистерны;
- 4) расчет коэффициента теплопередачи;
- 5) расчет длин змеевика;
- 6) поверочный расчет толщины стенки змеевика.

Для представленной в примере цистерны получено шесть участков. Количество таких участков индивидуально и может составлять 10 и более; в практике проектирования, как правило, число участков не превышает восьми.

2.4. Расчет коэффициента теплопередачи для змеевика обогрева.

Тепловая мощность змеевика, $Q_{зм}$, Вт, представляет собой количество теплоты, передаваемое от горячего теплоносителя к среде цистерны за требуемое время нагрева, и определяется в соответствии с уравнением теплопередачи:

$$Q_{зм} = k \cdot F \cdot \Delta t_{ср}, \quad (3)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
 F — площадь поверхности змеевика, м²;
 $\Delta t_{ср}$ — температурный напор, °С.

Среднелогарифмический температурный напор в теплообменных аппаратах определяется через наибольшую и наименьшую разности температур теплоносителей [7]:

$$\Delta t_{ср} = \frac{(t_{гн}^{вх} - t_{вн}^{нач}) - (t_{гн}^{вых} - t_{вн}^{кон})}{\ln(t_{гн}^{вх} - t_{вн}^{нач}) / (t_{гн}^{вых} - t_{вн}^{кон})}. \quad (4)$$

В расчете системы обогрева в качестве температурного напора достаточно принять среднеарифметическое от средней температуры теплоносителя в змеевике и температуры воды в цистерне. Учитывая, что нагрев воды, как правило, производится на 1 — 2 °С, в уравнение теплопередачи можно в качестве температурного напора подставлять среднюю температуру теплоносителя внутри змеевика:

$$\Delta t_{ср} = \frac{t_{гн}^{вх} + t_{гн}^{вых}}{2}. \quad (5)$$

Поскольку в РД присутствует только информация о коэффициенте теплопередачи для парового змеевика, для системы, использующей термальные масла, находить k следует аналитически.

Для цилиндрической стенки рассчитывается линейный (в расчете на 1 м трубы) коэффициент теплопередачи k_l , Вт/(м·К), через коэффициенты теплоотдачи горячей и холодной сред и коэффициент теплопроводности материала змеевика:

$$k_l = \frac{1}{1/(\alpha_1 \cdot d_{зм}^{вн}) + 1/2\lambda \ln(d_{зм}^{нар}/d_{зм}^{вн}) + 1/(\alpha_2 \cdot d_{зм}^{нар})}, \quad (6)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к стенке змеевика и от стенки змеевика к воде цистерны соответственно, Вт/(м²·К), определяются через критерии подобия;
 $d_{зм}^{вн}$ и $d_{зм}^{нар}$ — соответственно внутренний и наружный диаметры змеевика, м;
 λ — теплопроводность материала стенки змеевика, Вт/(м·К).

Линейная плотность теплового потока (тепловая мощность 1 м змеевика) составит:

$$q_l = k_l \cdot \pi \cdot \Delta t_{ср}. \quad (7)$$

Внутри труб (змеевиков) имеет место вынужденное турбулентное движение теплоносителя, в цистернах — свободная конвекция нагреваемой среды, ламинарный режим.

Для расчета свободной конвекции вдоль вертикальных стенок цистерны возможно использовать формулу, предложенную академиком М.А. Михеевым:

$$Nu = 0,63 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (8)$$

Для расчета теплоотдачи при свободной конвекции у горизонтальных труб и вдоль горизонтальных стенок цистерны используется формула, полученная И.М. Михеевой:

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}. \quad (9)$$

При расчетах по формуле выше полученное значение умножается на коэффициент 1,3 для горизонтальной поверхности, обращенной вверх, и на коэффициент 0,7 для поверхности, обращенной вниз.

Течение теплоносителя внутри змеевика для термальных масел при скоростях около 2 м/с во всех случаях будет турбулентным, поэтому для определения следует использовать формулу:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}. \quad (10)$$

Расчет коэффициента теплопередачи от теплоносителя внутри змеевика к воде в цистерне представлен в табл. 2.

Для БЦ в первом приближении приняты трубы 44,5 × 4,5 мм из нержавеющей стали.

Таблица 2

Расчет коэффициента теплопередачи для змеевика обогрева

Параметр	Наименование	Размерность	Источник	Значение
$d_{3м}^{вн}$	Внутренний диаметр трубы змеевика	м	Принято	0,036
$d_{3м}^{нар}$	Наружный диаметр трубы змеевика	м	Принято	0,045
Re_1	Число Рейнольдса для теплоносителя	—	$w \cdot d_{3м}^{вн} / \nu_{тн}$	45000
Pr_1	Число Прандтля для теплоносителя	—	$\mu_{тн} \cdot c_{тн} / \lambda_{тн}$	15,58
Nu_1	Число Нуссельта для теплоносителя	—	$0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$	361
α_1	Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к змеевику	Вт/(м ² ·К)	$Nu_1 \cdot \lambda_{тн} / d_{3м}^{вн}$	3931,4
β	Коэффициент объемного расширения воды	1/°С	справочное	0,0007
Pr_2	Число Прандтля для воды	—	справочное	12,67
Gr_2	Число Грасгофа для воды	—	$g \cdot d_{3м}^{нар3} \cdot \beta \cdot \Delta t_{ср} / \nu_{в}^2$	11791327
Nu_2	Число Нуссельта для воды	—	$0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$	55,28
α_2	Коэффициент теплоотдачи от змеевика к воде	Вт/(м ² ·К)	$Nu_2 \cdot \lambda_{в} / d_{3м}^{нар}$	687,95
k_l	Линейный коэффициент теплопередачи от теплоносителя к воде	Вт/(м·К)	п. 2.2	21,58
q_l	Линейная плотность теплового потока	Вт/м	$k_l \cdot \pi \cdot \Delta t_{ср}$	4049,6

2.5. Расчет длины змеевика.

Для расчета длины змеевиков определяется общее количество теплоты, передаваемое от змеевика к балластной воде за требуемое время нагрева, $Q_{3м}$, кВт:

$$Q_{3м} = Q_{пол} + Q_{пот} \quad (11)$$

где $Q_{пол}$ — полезное количество теплоты, необходимое для подогрева соответствующего объема жидкости до требуемой температуры за заданный промежуток времени, кВт;

$Q_{пот}$ — потери тепла от воды в БЦ в окружающую среду, кВт (морскую воду, наружный воздух, среду смежных помещений).

Полезная тепловая мощность рассчитывается через массу нагреваемой жидкости G , ее теплоемкость c и температурный перепад Δt с учетом времени нагрева τ :

$$Q_{пол} = \frac{G \cdot c \cdot \Delta t}{\tau} \quad (12)$$

Тепловые потоки через ограждающие цистерну поверхности (потери тепла) определяются в соответствии с законом Ньютона — Рихмана через коэффициент теплоотдачи от среды к стенке α , площадь стенки F и перепад температур между средней температурой нагреваемой среды и температурой стенки ΔT :

$$Q_{пот} = \alpha \cdot F \cdot \Delta T \quad (13)$$

Потери тепла для участков, контактирующих с водой, практически полностью определяются теплоотдачей конвекцией.

Для участков, граничащих с наружным воздухом, РД, помимо конвекционной, рекомендует учитывать лучистую составляющую теплообмена. Ввиду сложности соответствующих расчетов рекомендуется принять потери излучением в размере 10 % от потерь конвекцией.

Таким образом, потери тепла на том или ином участке стенки танка определяются как сумма конвекционной и лучистой составляющих, при этом лучистой в большинстве случаев можно пренебречь:

$$Q_{пот} = Q_{к} + Q_{л} \quad (14)$$

Коэффициенты теплоотдачи α определяются через критерии Прандтля и Грасгофа с учетом температуры стенки на каждом участке по формулам табл. 2, при этом в качестве характерного линейного размера принимается длина участка.

Длина змеевика определяется как отношение тепловой мощности змеевика $Q_{зм}$ к линейной плотности теплового потока q_l :

$$L = Q_{зм} / q_l. \quad (15)$$

Результаты расчета для рассматриваемого примера приведены в табл. 3.

Знак (—) в значении тепловых потерь указывает на теплоприток в цистерну (температура стенки на соответствующем участке выше расчетной температуры воды в цистерне).

Таблица 3

Результаты расчета										
Параметр	Наименование	Размерность	Формула	Значение параметра						
				Уч. 1	Уч. 2	Уч. 3	Уч. 4	Уч. 5	Уч. 6	Уч. 7
$V_{ц}$	Объем цистерны	м ³		172						
$G_{в}$	Масса воды в цистерне	кг	$V_{ц} \cdot \rho_{в} / 1000$	176300						
α	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	Вт/(м ² ·К)	$Nu_1 \cdot \lambda_{воды} / L_{уч}$	39,0	116,3	138,6	79,2	259,8	152,6	161,4
$t_{ст}^{уч}$	Температура стенки	°С	принята	−0,5	1	4	−0,5	−15	−10	−11
$t_{нар}^в$	Температура наружного воздуха	°С	ТЗ					−30	−20	
$t_{пом}^в$	Температура воздуха в помещении	°С	принята		+2	+12				−22
t_k	Конечная температура воды в цистерне	°С	принята	+1						
$F_{уч}$	Площадь участка	м ²	По чертежу	24,9	20,5	40,9	48,9	12,5	24,9	19,3
$Q_k^{уч}$	Потери тепла от воды в цистерне в окружающую среду конвекцией	кВт	$\alpha \cdot F \cdot \Delta T$	0,5	−2,4	−22,6	2,0	48,6	38,1	34,3
Q_l	Потери тепла от воды в цистерне излучением в окружающую среду	кВт	$0,1 \cdot Q_{конв}$	—	−0,2	−2,3	—	4,9	3,8	3,4
$Q_{пот}$	Общие тепловые потери	кВт	$Q_k + Q_l$	108,1						
τ	Время нагрева	с	принято	10800						
$Q_{пол}$	Полезная мощность нагрева	кВт	$G_{в} \cdot c_{в} \cdot \Delta T_{в} / \tau$	190,5						
$Q_{зм}$	Тепловая мощность змеевика	кВт	$Q_{пол} + Q_{пот}$	298,6						
$G_{тн}$	Расход теплоносителя	кг/с	$Q_{зм} / (c_{тн} \cdot \Delta T_{тн})$	3,97						
$l_{зм}$	Длина змеевика	м	$Q_{зм} / q_l$	73,7						

Для бортовых балластных цистерн расчет производится для одной из симметричных цистерн.

Отметим, что полученные значения тепловой мощности соответствуют режиму подогрева воды в цистерне. Для подогретой цистерны используется режим поддержания температуры, на котором подводимое количество теплоты равно тепловым потерям в окружающую среду.

ВЫВОДЫ

Проектирование судовых систем обогрева балластных танков — сложная инженерная задача, включающая нахождение тепловых потерь от цистерны в окружающую среду, определение длины змеевиков и расхода теплоносителя. От правильности расчетов указанных систем зависит функционирование балластной системы судна, трассировка трубопроводов и выбор судовой котельной установки. При расчетах мощности судовых систем обогрева балласта основной проблемой остается нахождение коэффициентов теплоотдачи. Использование для определения указанных коэффициентов действующей отраслевой НТД затруднено в связи с недостаточной определенностью в части применения расчетных зависимостей к конкретным условиям и отсутствием данных по используемым в настоящее время теплоносителям. Расчет рекомендуется

проводить с использованием стандартных критериальных уравнений по методике, представленной в настоящей работе. Коэффициенты, входящие в основные расчетные зависимости, подлежат уточнению после проведения экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД5Р.5524-82 Системы подогрева жидких грузов морских нефтеналивных судов. Правила и нормы проектирования.
2. РД5Р.113-85 Система подогрева жидкостей в судовых цистернах. Правила проектирования.
3. Котлы // Bel-Okna.ru. [Электронный ресурс] URL: <https://bel-okna.ru/foto/maslyanyj-kotel> (дата обращения: 12.02.2025).
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VIII. Системы и трубопроводы / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
5. Дубинкина А.Д. Расчет системы обогрева балластных цистерн / А.Д. Дубинкина, Н.В. Дятлов, Е.Н. Алексин // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2022. — № 3-2.
6. Алексин Е.Н. Неатомные ледоколы нового поколения / Е. Н. Алексин // Наука и технологии — 2023: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 5 декабря 2023 г. — Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. — С. 13 — 17.
7. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: уч. пос. / В.В. Нащокин. М.: Высшая школа, 1975. — 496 с.

REFERENCES

1. RD5R.5524-82 Sistemy podogreva zhidkikh грузов морских нефтеналивных судов. Pravila i normy proektirovaniya [Heating systems for liquid cargoes of marine oil-loading vessels. Design rules and regulations].
2. RD5R.113-85 Sistema podogreva zhidkостей в судовых цистернах. Pravila proektirovaniya [The system of heating liquids in ship tanks. Design rules].
3. Kotly [Boilers]. Bel-Okna.ru. URL: <https://bel-okna.ru/foto/maslyanyj-kotel> (accessed 12.02.2025).
4. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VIII. Systems and Pipelines / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
5. Dubinkina A.D., Dyatlov N.V., Aleksin E.N. Raschet sistemy obogreva ballastnykh tsistern [Calculation of the ballast tank heating system]. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta [Science Week of St. Petersburg State Maritime Technical University]*. 2022. No. 3-2.
6. Aleksin E.N. Neatomnye ledokoly novogo pokoleniya [New generation non-nuclear icebreakers]. *Nauka i tekhnologii — 2023 [Science and Technology — 2023: coll. of articles of the III International research and practice conf., Petrozavodsk, December 5, 2023]*. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva “Novaya Nauka”, 2023. P. 13 — 17.
7. Nashchokin V.V. Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha [Technical thermodynamics and heat transfer: textbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 496 p.

УДК: 629.5.061
EDN NJLRNE

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМ КРЫЛЬЧАТЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

А.А. Равин, д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: ravinkl@mail.ru
Данг Тхань Дат, магистрант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: dangthanhdatt300@gmail.com

Для таких судов, как паромы, буксиры, тральщики, специальные суда, предназначенные для выполнения работ на морском шельфе, важным показателем является высокая маневренность. Уникальную возможность достижения высокой маневренности судна предоставляет применение крыльчатого движителя. По существу, он выполняет функции винторулевого комплекса, поскольку сочетает в себе преимущества винта регулируемого шага и активного руля. Судно, оборудованное крыльчатыми движителями, может плавно изменять скорость и направление движения, разворачиваться на месте, двигаться лагом (т.е. бортом вперед). Однако широкое применение этого типа движителя сдерживается сложностью и высокой стоимостью как самого движителя, так и гидравлической системы, применяемой для дистанционного управления. В статье рассматривается способ упрощения проектирования и изготовления системы управления крыльчатым движителем за счет применения и адаптации конструктивных модулей, входящих в состав системы дистанционного управления главным судовым дизелем.

Ключевые слова: крыльчатый движитель, система дистанционного управления.

Для цитирования: Равин А.А. Опыт разработки системы дистанционного управления судовым крыльчатым движителем / А.А. Равин, Данг Тхань Дат // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 143 — 154. — EDN NJLRNE.

EXPERIENCE IN DEVELOPING A REMOTE-CONTROL SYSTEM OF VOITH-SCHNEIDER PROPELLER

A.A. Ravin, DSc, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: ravinkl@mail.ru
Dang Thanh Dat, MSc student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: dangthanhdatt300@gmail.com

For such vessels as ferries, tugs, minesweepers, special vessels designed to perform work on the sea shelf, high maneuverability is an important indicator. A unique opportunity to achieve high maneuverability of the vessel is provided by the use of a winged propeller. It essentially performs the functions of a rudder propeller complex, since it combines the advantages of a variable pitch propeller and an active rudder. A vessel equipped with winged propellers can smoothly change speed and direction of movement, turn on the spot, move sideways (i.e. with its side ahead). However, the widespread use of this type of propeller is constrained by the complexity and high cost of both the propeller itself and the hydraulic system used for remote control. The article discusses a method for simplifying the design and manufacture of a winged propeller control system through the use and adaptation of design modules included in the remote control system of the main marine diesel engine.

Keywords: vane propeller, remote control system.

For citation: Ravin A.A., Dang Thanh Dat. Experience in developing a remote-control system of ship vendor propulsor. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 143 — 154. EDN NJLRNE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В современном судостроении для создания упора, обеспечивающего движение судна, применяется широкая номенклатура движителей: гребные винты фиксированного шага (ВФШ), гребные винты регулируемого шага (ВРШ), воздушные винты, водометные движители, винторулевые колонки, крыльчатые движители (рис. 1).

Последние являются наиболее специфическим типом движителей, как в связи с особенностями конструкции и принципа действия, так и благодаря уникальным возможностям управления скоростью и направлением движения судна. Несомненным преимуществом крыльчатого движителя (КД) перед любым другим типом движителя является возможность обеспечить высокую маневренность судна благодаря изменению направления упора (от 0 до 360°) и его величины (от максимального до нулевого) без изменения режима работы главного двигателя. Весьма значимое качество — возможность регулирования относительной поступи во время работы движителя. Это достигается плавным изменением угла атаки рабочих органов КД — крыловых лопастей. Следовательно, КД может рассматриваться в качестве винторулевого комплекса, сочетающего в себе возможности ВРШ и активного руля [1 — 7].



Рис. 1. Крыльчатый движитель

Тем не менее широкое применение КД сдерживается рядом причин. К ним следует отнести, прежде всего, сложность и высокую стоимость конструкции КД. В значительной степени общая сложность его устройства обусловлена необходимостью применения гидравлической системы управления [8]. В данной статье рассматривается упрощенный способ проектирования и изготовления такой системы путем адаптации применительно к характеристикам КД конструктивных блоков электрогидравлической системы дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) главным судовым дизелем.

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРЫЛЬЧАТОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Рабочими органами КД, взаимодействующими с водой, являются вертикально расположенные крылья, оси которых закреплены на диске, расположенном под днищем судна (рис. 2).

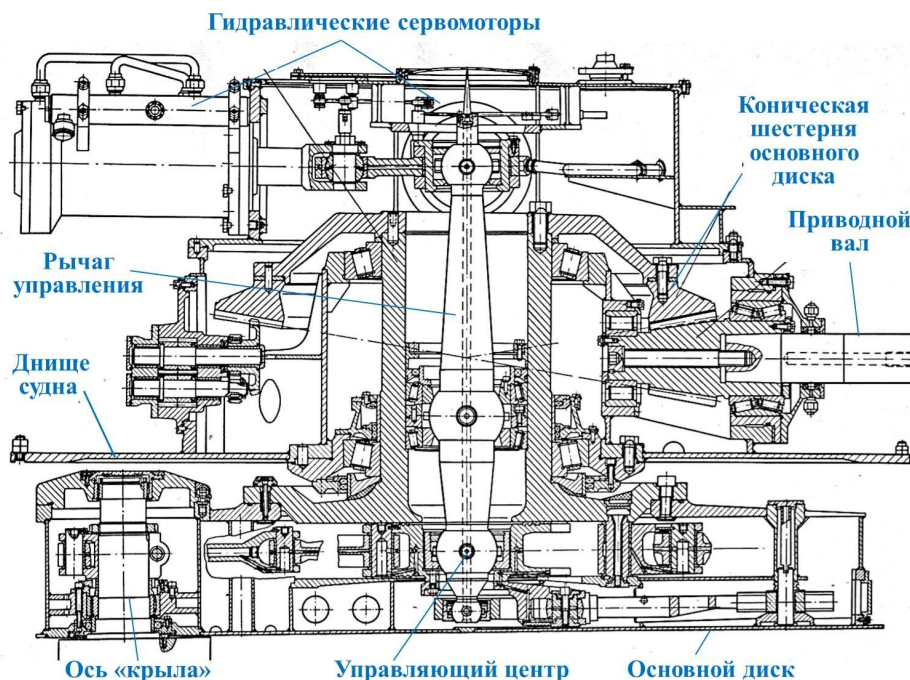


Рис. 2. Продольный разрез крыльчатого движителя ДКК 2000

Диск приводится во вращение с помощью конической передачи, соединенной с двигателем (дизелем или электромотором). Крылья при вращении основного диска разворачиваются вокруг своих осей с помощью системы рычагов, соединенных с управляющим центром. Углы их разворота определяются положением управляющего центра. Если он совпадает с центром основного диска, все крылья находятся в нейтральном положении. При этом на них не возникают полезные гидродинамические силы и отсутствует упор (рис. 3).

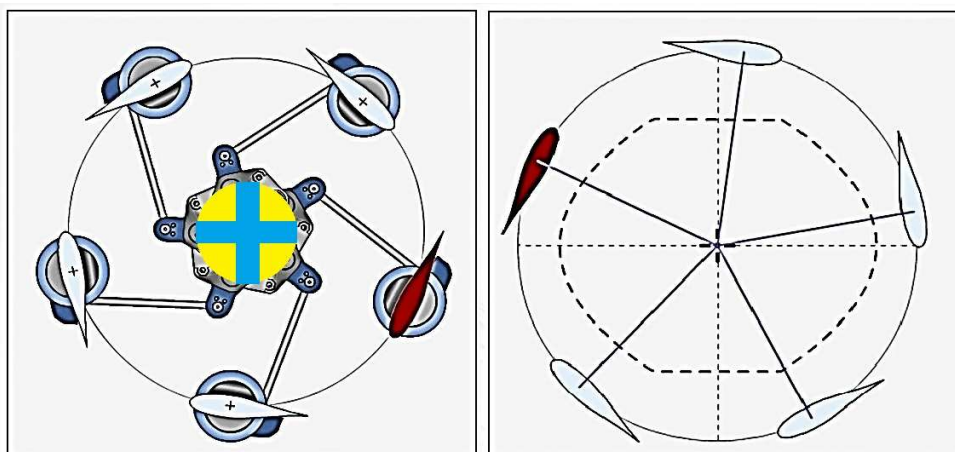


Рис. 3. Режим холостого хода

Для вывода КД из холостого режима требуется сместить управляющий центр в продольном или поперечном направлении, например вправо (рис. 4).

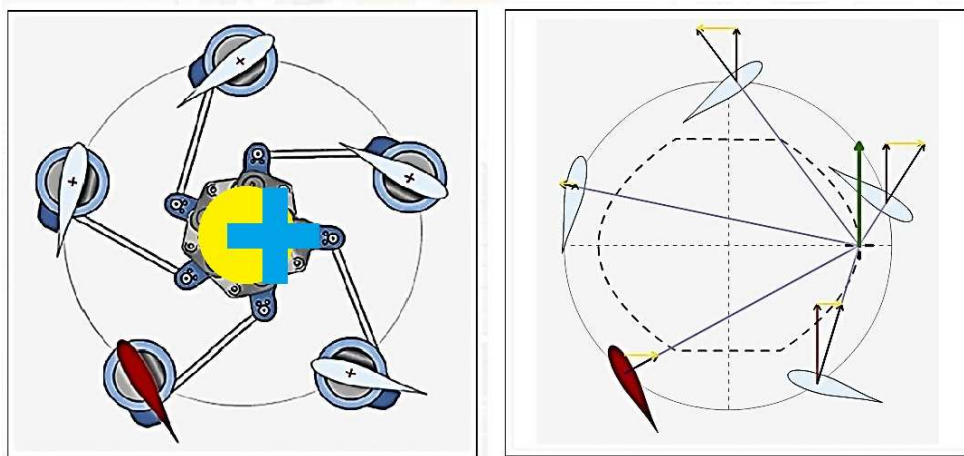


Рис. 4. Режим переднего хода

Смещения управляющего центра выполняются с помощью двух гидравлических сервомоторов, получающих команды от системы дистанционного управления (рис. 5).

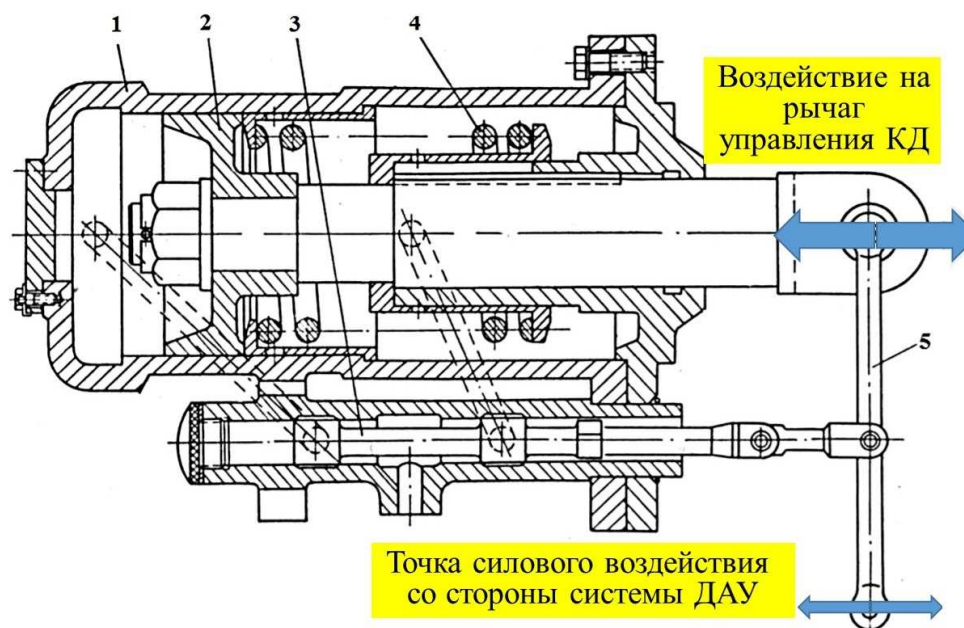


Рис. 5. Конструкция гидравлического сервомотора:

1 — корпус, 2 — поршень, 3 — золотник, 4 — возвратная пружина, 5 — рычаг обратной связи

2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА С КРЫЛЬЧАТЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

2.1. Исходные предпосылки.

Расчеты крыльчатых движителей производят обычно на основании данных модельных испытаний в кавитационных трубах или опытовых бассейнах. Результаты испытаний представляют в виде следующих безразмерных характеристик:

— относительная поступь

$$l_P = V_P / U = \frac{V_P}{\pi n D}, \quad (1)$$

— коэффициент упора

$$K_P = \frac{2P}{\rho U^2 F_P}, \quad (2)$$

— коэффициент момента

$$K_M = \frac{2M}{\rho U^2 F_P R}, \quad (3)$$

— коэффициент полезного действия

$$\eta_P = \frac{P V_P}{M \omega} = \frac{K_P}{K_M} \lambda_P. \quad (4)$$

Обозначения в формулах 2.1 — 2.4:

V_P — скорость набегающего потока воды, м/с;

U — окружная скорость КД (по осям вращения лопастей), м/с;

n — частота вращения КД, об/мин;

D — диаметр КД (по осям вращения лопастей), м;

l — длина лопастей, м;

$F_P = l \cdot D$ — гидравлическое сечение движителя, м²;

M — момент, который необходимо создавать для вращения КД, Н·м;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность пресной воды;

Зависимости величин K_P , K_M и η_P от относительной поступи λ_P называются кривыми действия крыльчатого движителя. Для движителя типа M кривые действия показаны на рис. 6.

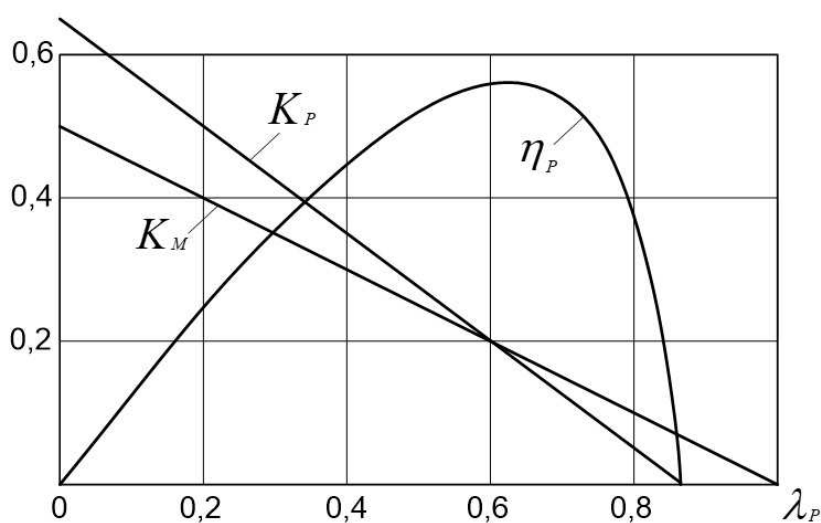


Рис. 6. Кривые действия крыльчатого движителя

2.2. Расчет показателей КД при свободном ходе судна.

Конструктивные параметры КД:

$n = 20 \text{ — } 100$ об/мин. $D = 2,6$ м. Количество лопастей $Z = 5$. $l = 1,3$ м. $F_p = 2,6 \cdot 1,3 = 3,4 \text{ м}^2$.

Эксцентриситет КД: $\varepsilon = \varepsilon_{\max} = 0,75$.

Из условия максимального КПД движителя (см. рис. 6) выбираем для номинального движения судна на свободной волне расчетное значение относительной поступи $\lambda_p = 0,6$.

Таблица 1

Расчеты для номинального режима движения судна

№	Величина	Размерность	Формула	Значения				
1	Поступь λ_p	—	Задано	0,6				
2	k_p	—	Из рис. 6	0,2				
3	K_m	—	Из рис. 6	0,2				
4	КПД η_p	—	Из рис. 6	0,56				
5	Обороты n	об/мин	Задано	20	40	60	80	100
6	Окружная скорость U	м/с	$U = \pi D n / 60$	2,7	5,4	8,2	10,9	13,6
7	Скорость потока V_p	м/с	$V_p = \lambda_p \cdot U$	1,6	3,3	4,9	6,5	8,2
8	Скорость судна V_C	узл.	$V_C = 2,05 \cdot V_p$	3,3	6,7	10,0	13,4	16,7
9	Упор P	Н	$P = K_{p\rho} U^2 F_p / 2$	2503	10012	22528	40049	62577
10	Момент M	Н·м	$M = K_{m\rho} U^2 F_p D / 4$	3254	13016	29289	52064	81351
11	Мощность N	кВт	$N = \frac{M \pi n}{30} \cdot 10^{-3}$	6,8	5,5	184	436	852

Таблица 2

Расчеты для буксировочного режима движения судна

№	Величина	Размерность	Формула	Значения				
1	Поступь λ_p	—	Задано	0,4				
2	k_p	—	Из рис.2.1	0,35				
3	K_m	—	Из рис.2.1	0,3				
4	КПД η_p	—	Из рис.2.1	0,45				
5	Обороты n	об/мин	Задано	20	40	60	80	100
6	Окружная скорость U	м/с	$U = \pi D n / 60$	2,7	5,4	8,2	10,9	13,6
7	Скорость потока V_p	м/с	$V_p = \lambda_p \cdot U$	1,1	2,2	3,3	4,4	5,4
8	Скорость судна V_C	узл.	$V_C = 2,05 \cdot V_p$	2,2	4,5	6,7	8,9	11,2
9	Упор P	Н	$P = K_{p\rho} U^2 F_p / 2$	4380	17528	39424	70087	109511
10	Момент M	Н·м	$M = K_{m\rho} U^2 F_p D / 4$	4881	19524	43930	78097	122027
11	Мощность N	кВт	$N = \frac{M \pi n}{30} \cdot 10^{-3}$	10,2	81,7	275,9	653,9	1278

Полученные в результате расчетов характеристики (рис. 7 — 10) могут быть использованы для оценки ходовых качеств судна и выбора параметров главного двигателя.

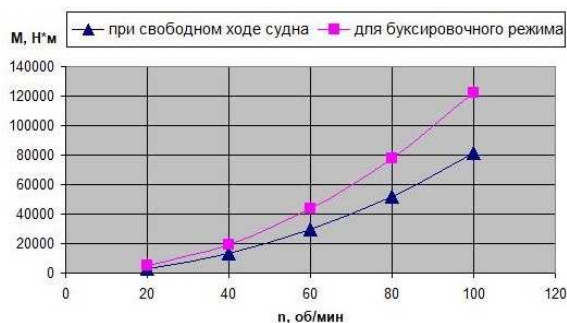


Рис. 7. Зависимость момента от частоты вращения КД

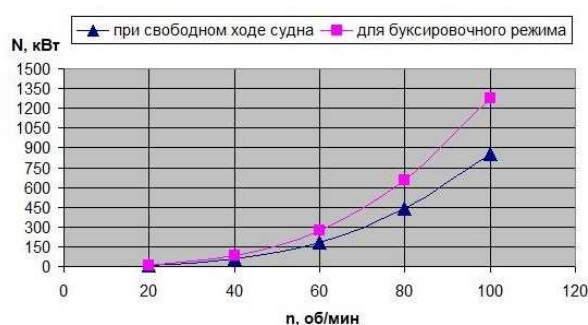


Рис. 8. Зависимость мощности от частоты вращения КД

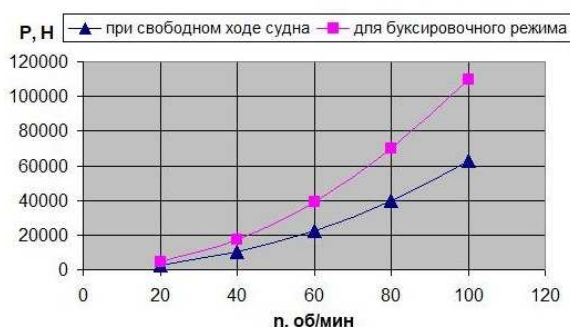


Рис. 9. Зависимость упора от частоты вращения КД

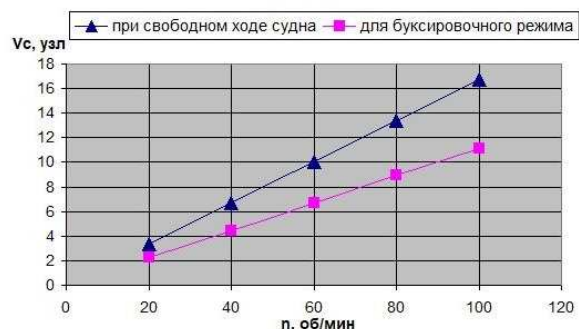


Рис. 10. Зависимость скорости судна от частоты вращения КД

3. ВЫБОР СТРУКТУРЫ И КОНСТРУКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ КРЫЛЬЧАТЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

Типовая структура систем, предназначенных для дистанционного автоматизированного управления судовыми машинами и механизмами, включает два основных компонента: командную систему и исполнительные (силовые) устройства. Входная (командная) часть у большинства современных систем ДАУ представляет собой электрическую следящую систему. Применение электронных блоков для формирования управляющих сигналов и обработки информации и передача сигналов по электрическому кабелю обеспечивают надежность, многофункциональность, низкую энергоемкость, малые веса и габариты системных блоков. Выходная (силовая) часть системы ДАУ у всех известных в настоящее время типов КД выполняется в виде гидравлических поршневых исполнительных механизмов (сервомоторов). Это объясняется целым рядом их достоинств:

- возможность развития больших усилий;
- плавность хода штока гидравлического сервомотора;
- рабочее вещество — минеральное масло, применяемое в судовых системах гидравлики и гидроавтоматики, — обеспечивает естественную смазку трущихся деталей и защиту их от коррозии;
- масло, как и всякая жидкость, практически несжимаемо, что позволяет обеспечить независимость характеристики сервомотора от усилий на его штоке.

Особенностью КД является необходимость дистанционного управления двумя сервомоторами — ходовым и рулевым, в связи с чем система ДАУ должна иметь два канала управления для каждого движителя.

Структура одного из каналов электрогидравлической системы для дистанционного управления КД из рулевой рубки представлена на рис. 11.

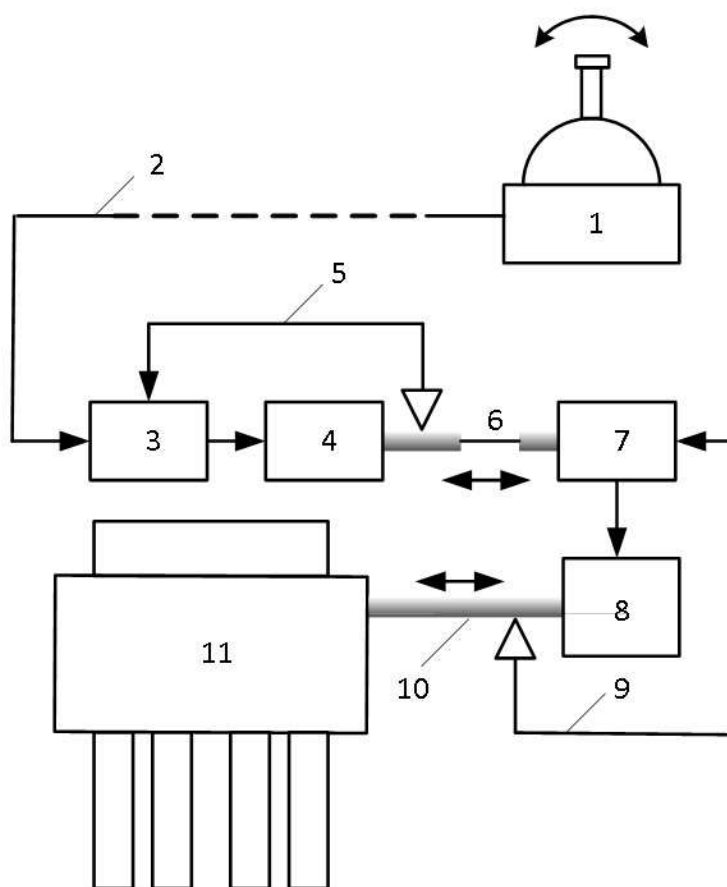


Рис. 11. Блок-схема электрогидравлической системы дистанционного управления КД (один канал):
 1 — рукоятка управления в рулевой рубке; 2 — кабель передачи управляющего электрического сигнала;
 3 — электронный блок управления; 4 — электрический исполнительный механизм; 5 — электрическая обратная связь;
 6 — соединение штока электрического исполнительного механизма и штока золотника; 7 — золотник;
 8 — гидравлический исполнительный механизм (сервомотор); 9 — рычаг обратной связи; 10 — шток сервомотора;
 11 — крыльчатый движитель

В качестве командной части системы управления КД в данной статье рассматривается возможность использования готовых модулей электрической системы ДАУ «Mini-Marex» производства немецкой фирмы Bosch-Rexroth [9] (рис. 12).

Система предназначена для дистанционного управления двухвальными судовыми пропульсивными установками с реверс-редукторными передачами, однако благодаря наличию в ней следящих систем с механическим выходом исполнительных механизмов и возможности гибкой настройки характеристик может быть приспособлена и для управления судовым крыльчатым движителем. Такое техническое решение обеспечит сокращение сроков и стоимости разработки и изготовления системы управления и позволит применить серийно выпускаемые компоненты, изготовленные с немецкой точностью и качеством.

Исходная команда задается механической установкой рукоятки командного органа. Угловое положение рукоятки преобразуется в электрический сигнал прецизионным потенциометром, установленным в корпусе командного органа (см. рис. 12). Конечным результатом функционирования командной части системы является механическое воздействие на шток золотника гидравлического сервомотора КД. Поэтому командная часть системы ДАУ является, по существу, электромеханической следящей линией (рис. 13).

Электрические управляющие сигналы от двух органов управления, расположенных на пульте судоводителя в рулевой рубке, с помощью электрических кабелей передаются в электронный блок управления сдвоенного электромеханического сервопривода, установленного вблизи управляемого объекта (в нашем случае вблизи крыльчатого движителя). Электронный блок формирует напряжения тока, подаваемые на исполнительные механизмы, находящиеся внутри сервопривода. Они представляют собой электродвигатели, вращение которых с помощью кинематических пар «винт — гайка» преобразуется в линейные перемещения штоков. Перемещения штоков датчиками обратной связи преобразуются в



Рис. 12. Пульт судоводителя и командный орган системы ДАУ «Mini-Marex»

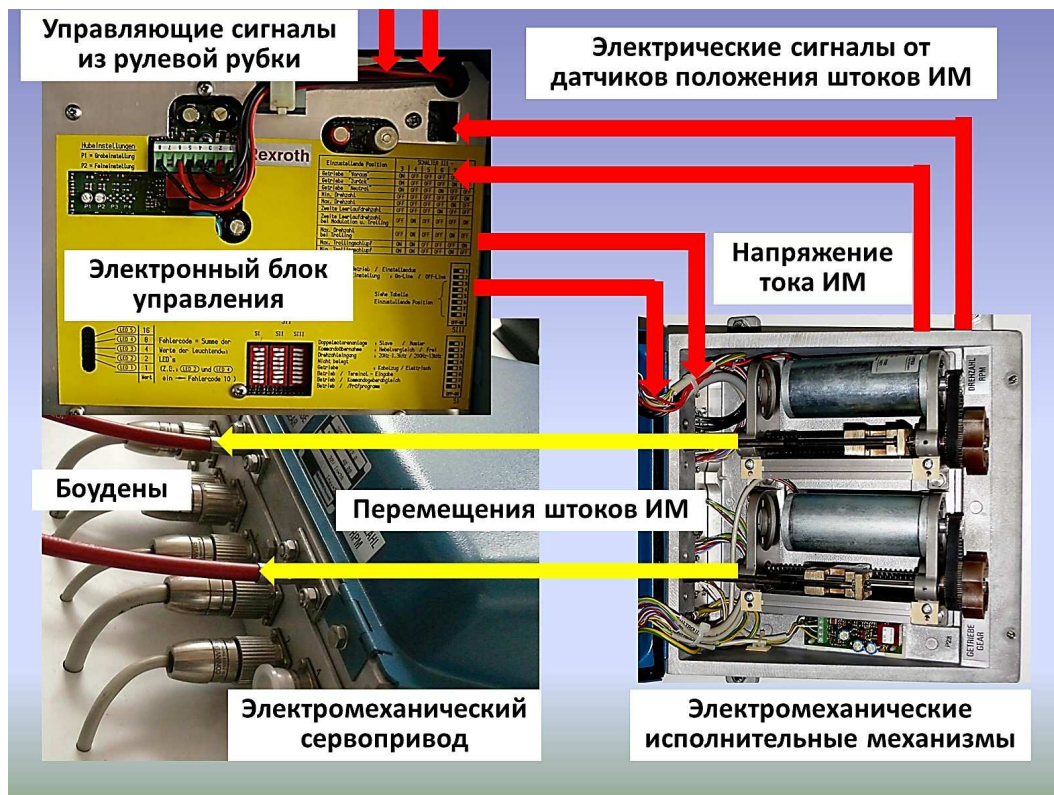


Рис. 13. Функциональная схема электрохимической следящей системы

электрические сигналы, поступающие в электронный блок управления. Там они сравниваются с управляющими сигналами, пришедшими из рулевой рубки, и в соответствии с величиной разности определяются напряжения, поступающие на электродвигатели исполнительных механизмов. Такая схема обеспечивает точное соответствие линейных перемещений штоков угловым положениям рукояток командных органов.

Следует иметь в виду, что система ДАУ «Mini-Marex» предназначена для управления главным судовым дизелем. Поэтому характеристики ее исполнительных механизмов имеют вид, показанный на рис. 14.

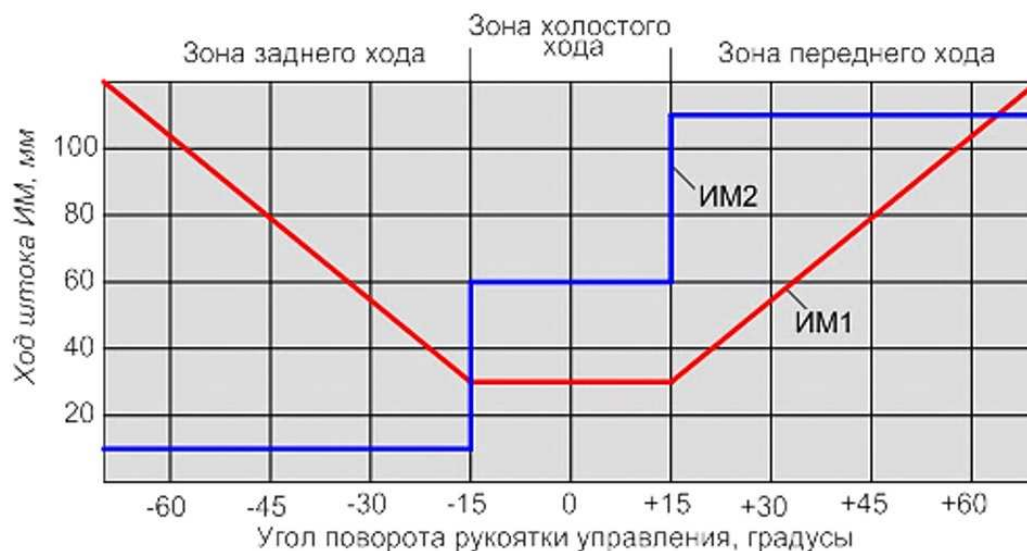


Рис. 14. Характеристики исполнительных механизмов системы ДАУ «Mini-Marex»: ИМ1 — исполнительный механизм, воздействующий на регулятор частоты вращения дизеля; ИМ2 — исполнительный механизм, воздействующий на реверс-муфту редуктора

Характеристики исполнительных механизмов системы управления КД должны иметь вид, показанный на рис. 15. Перестройка характеристик может быть выполнена с помощью электронного блока управления.

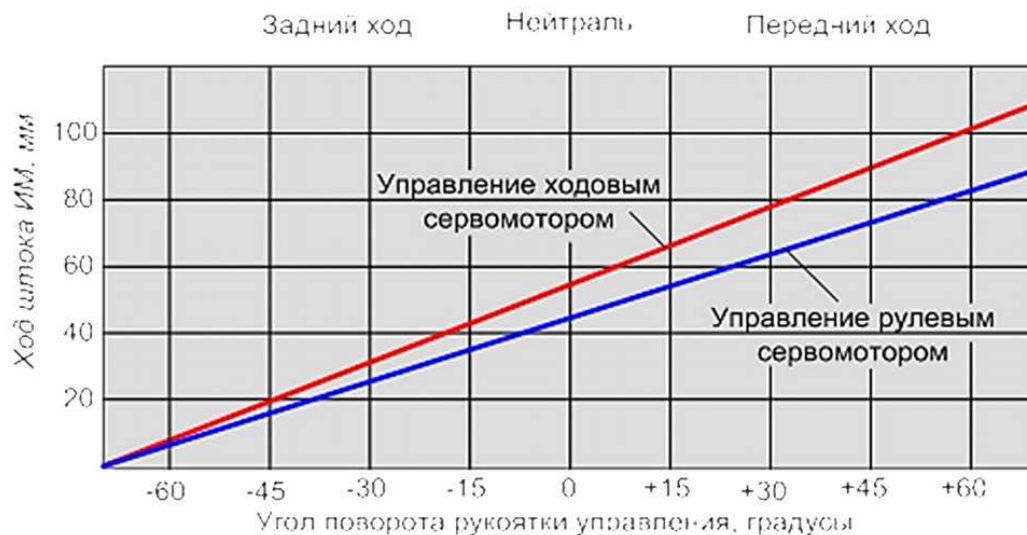


Рис. 15. Характеристики исполнительных механизмов системы управления КД

Линейные перемещения штоков исполнительных механизмов электромеханического сервопривода передаются на управляемый объект (в нашем случае — на штоки золотников гидравлических сервоприводов крылатого движителя) с помощью специальных устройств — боуденов. Они представляют собой гибкие трубки из туго навитой стальной проволоки, покрытой защитной оболочкой из маслбензостойкого пластика. Внутри трубки находится упругая стальная проволока толщиной 1,2 мм, которая и передает линейное перемещение.

Компьютерное моделирование пропульсивного комплекса с крыльчатым движителем и предлагаемой системой дистанционного управления показало возможность реализации нескольких режимов движения судна.

1. При воздействии на ходовой сервомотор КД, перемещающий рычаг управления КД в поперечном направлении, обеспечивается прямолинейное движение судна вперед или назад с изменением скорости от нулевой до максимальной.

2. При воздействии на рулевой сервопривод, перемещающий рычаг управления КД в продольном направлении, создается упор, направленный перпендикулярно диаметральной плоскости судна. При этом если крыльчатые движители расположены в корме, судно будет разворачиваться на месте вправо или влево. Большому судну (например, парому) с крыльчатыми движителями, установленными в носу и в корме, боковой однонаправленный упор позволяет двигаться лагом (бортом вперед), что очень удобно при швартовке судна к причальной стенке.

3. При одновременном воздействии на оба сервомотора КД создается упор, направленный под острым углом к диаметральной плоскости. Это обеспечивает режим циркуляции (движение судна по кругу) в различных направлениях: вперед-влево, вперед-вправо, назад-влево, назад-вправо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2026 году удивительному изобретению австрийского инженера Эрнста Лео Шнайдера — судовому крыльчатому движителю — исполнится 100 лет. Многочисленные исследования, расчеты, испытания и накопленный опыт эксплуатации, а также собственные расчеты, выполненные авторами статьи, подтвердили сочетание в этом движителе отличных ходовых качеств с уникальными возможностями обеспечения любых сложных маневров судна.

Благодаря этим особенностям крыльчатый движитель нашел применение на паромов, буксирах, тральщиках, плавучих кранах. Для судов, предназначенных для выполнения работ на морском шельфе, уникальные характеристики крыльчатого движителя могут быть полезны для точного позиционирования. Вместе с тем основным недостатком, сдерживающим широкое применение КД, является сложность и высокая стоимость как механизма КД, так и электрогидравлической системы, необходимой для дистанционного управления его режимами.

Выполненные авторами проработки показали возможность существенно упростить проектирование и изготовление этой системы за счет применения и адаптации конструктивных модулей системы ДАУ, предназначенной для управления главным судовым двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин М.П. Крыльчатый движитель — средство обеспечения высокой маневренности судна / М.П. Бородулин // Судостроение. — 1996. — № 11 — 12. — С. 18 — 21.
2. Бородулин М.П. Пропульсивная установка плавкрана грузоподъемностью 500 т / М.П. Бородулин // Судостроение. — 1986. — № 6.
3. Gerauscharne Voith-Schneider-Propeller für Sonderfahrzeuge // Hansa. — 1989. — Bd. 126. N 5.
4. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля: Судовые движители и управляемость / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1973. — 511 с.
5. Грузинов В.И. Крыльчатые движители / В.И. Грузинов, В.И. Гуляев, Т.Б. Ибрагимова, Л.Э. Лихтеров и др. — Л.: Судостроение, 1973. — 135 с.
6. Bakhtiari M. Optimisation scheme applied to the Voith-Schneider propulsion system using genetic algorithm / M. Bakhtiari, H. Ghassemi, A. Sakaki, G. He // Ships and Offshore Structures. — 2020. — Vol. 16. No. 6.
7. Jürgens D. Voith Schneider Propeller (VSP) — Investigations of the cavitation behaviour / D. Jürgens, H.-J. Heinke // First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09. Trondheim, Norway, June 2009.
8. Новосельцев М.Н. Пути модернизации крыльчатого движителя / М.Н. Новосельцев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2015. — Вып. 45. — С. 189 — 192.
9. Система «Mini Marex». Техническое описание и руководство по эксплуатации. Rexroth Bosch Group, 2005. — 46 с.

REFERENCES

1. Borodulin M.P. Kryl'chatyi dvizhitel' — sredstvo obespecheniya vysokoi manevrennosti sudna [Cycloidal propeller — a means of ensuring high ship maneuverability]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 1996. No. 11 — 12. P. 18 — 21.
2. Borodulin M.P. Propul'sivnaya ustanovka plavkрана грузопод'emnost'yu 500 t [Propulsion system of floating crane with lifting capacity of 500 tons]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 1986. No. 6.
3. Gerauscharne Voith-Schneider-Propeller fur Sonderfahrzeuge. *Hansa*. 1989. Bd. 126. N 5.
4. Voitkanskii Ya.I., Pershits R.Ya., Titov I.A. Spravochnik po teorii korablya: Sudovye dvizhiteli i upravlyaemost' [Ship theory handbook: Ship propulsion and steerability]. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 511 p.
5. Gruzinov V.I., Gulyaev V.I., Ibragimova T.B., Likhterov L.E. et al. Kryl'chatye dvizhiteli [Cycloidal propeller]. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 135 p.
6. Bakhtiari M., Ghassemi H., Sakaki A., He G. Optimisation scheme applied to the Voith-Schneider propulsion system using genetic algorithm. *Ships and Offshore Structures*. 2020. Vol. 16. No. 6.
7. Jürgens D., Heinke H.-J. Voith Schneider Propeller (VSP) — Investigations of the cavitation behaviour. *First International Symposium on Marine Propulsors SMP'09*. Trondheim, Norway, June 2009.
8. Novosel'tsev M.N. Puti modernizatsii kryl'chatogo dvizhitelya [Ways of modernizing wing propulsor]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport]*. 2015. Issue 45. P. 189 — 192.
9. Sistema «Mini Marex». Tekhnicheskoe opisanie i rukovodstvo po ekspluatatsii [Mini Marex system. Technical description and operating manual]. Rexroth Bosch Group, 2005. 46 p.

УДК 620.92
EDN IHWAOE

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАБОРТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

В.К. Шурпьяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

А.В. Рогозин, ст. преп., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., 3, e-mail: rock66@mail.ru

А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А; аспирант, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

Целью статьи является рассмотрение проблем двухконтурных и одноконтурных систем охлаждения для повышения их надежности. В статье рассматриваются причины аварий на судах, связанные с затоплением машинных отделений из-за коррозионных разрушений труб и элементов в двухконтурных системах охлаждения. Указывается, что, несмотря на нормативные требования Регистра, направленные на повышение надежности таких систем, проблемы коррозионного износа трубопроводов остаются актуальными и влияют на эксплуатацию судов. Для полного исключения опасностей затопления предлагается более широко применять одноконтурные системы с забортными охладителями. Отмечается главное ограничение для более широкого применения забортных теплообменных аппаратов: низкий коэффициент теплообмена, обусловленный естественной циркуляцией забортной воды в теплом ящике и ограничениями в Правилах Регистра по применению килевых охладителей для судов ледового класса. Для расширения практики применения забортных охладителей на судах предлагается ввести в Правила Регистра определение «обшивочный охладитель». Это позволит применять к таким охладителям требования менее строгие по сравнению с килевыми охладителями, что позволит расширить их применение на судах ледового плавания. Для интенсификации теплообмена в забортных охладителях предлагается оптимизировать конструкцию тепловых и кингстонных ящиков следующим путем: организовать в них естественную циркуляцию или создать принудительную циркуляцию забортной воды через охладитель с помощью водоструйного эжектора, используя водопожарную систему.

Ключевые слова: система охлаждения, замкнутая система охлаждения, теплообменные аппараты, забортные теплообменные аппараты.

Для цитирования: Шурпьяк В.К. Применение различных схем охлаждения забортных теплообменных аппаратов / В.К. Шурпьяк, А.В. Рогозин, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 155 — 171. — EDN IHWAOE.

APPLICATION OF VARIOUS COOLING SCHEMES FOR OUTBOARD HEAT EXCHANGERS

V.K. Shurpyak, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

A.V. Rogozin, Assistant Professor, Saint Petersburg State Maritime Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: rock66@mail.ru

A.A. Mikheeva, Lead R&D Specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A; PhD student, A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

The purpose of the article is to consider the problems of dual-circuit and single-circuit cooling systems to improve reliability. The article discusses the causes of accidents on ships related to flooding of engine rooms due to corrosion damage to pipes and elements in two-circuit cooling systems. It is pointed out that, despite the regulatory requirements of the Register aimed at improving the reliability of such systems, the problems of corrosion wear of pipelines remain relevant and affect the operation of ships. To completely eliminate the dangers of flooding, it is proposed to use single-circuit systems with outboard coolers more widely. The main limitation for the wider use of outboard heat exchangers is noted: a low heat transfer coefficient due to the natural circulation of outboard water in a warm box and restrictions in the Register Rules for the use of keel coolers for ice-class vessels. To expand the use of outboard coolers on ships, it is proposed to introduce a new type of cooler in the Register Rules, the definition of which is proposed to be added to the Register Rules. This will make it possible to apply less stringent requirements to such coolers compared to keel coolers, which will expand their use on ice navigation vessels. To intensify heat exchange in outboard coolers, measures are proposed to optimize the design of thermal and kingston boxes by organizing natural circulation in them or creating forced circulation of outboard water through the cooler using a water jet ejector using a fire protection system.

Keywords: cooling system, closed cooling system, heat exchangers, outboard heat exchangers.

For citation: Shurpyak V.K., Rogozin A.V., Mikheeva A.A. Application of various cooling schemes for outboard heat exchangers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 155 — 171. EDN IHWAOE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным об аварийности мирового торгового флота [1 — 3], за последние десятилетия произошло значительное уменьшение числа аварийных случаев при одновременном увеличении количества судов и суммарного тоннажа. Согласно приведенной статистике, наиболее часто встречающейся причиной аварий (55 % и более случаев) была потеря плавучести в результате затопления помещений судна. К сожалению, в упомянутых источниках не указаны причины затопления и источники поступления воды — в результате течи в корпусных конструкциях или в результате отказа в системах забортной воды. Данное наблюдение хорошо перекликается с анализом аварийности на судах с классом Регистра, выполненным еще в 2005 году [4], где в качестве одного из выводов особо указано: «все виды механического оборудования (за исключением систем забортной воды) не вырабатывают свой ресурс за время эксплуатации судна, т.е. ресурс судна в целом определяется износом корпуса».

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ЗАБОРТНОЙ ВОДЫ

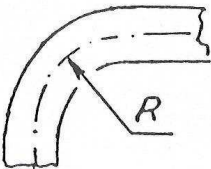
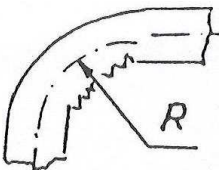
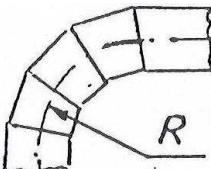
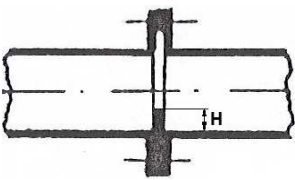
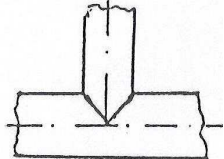
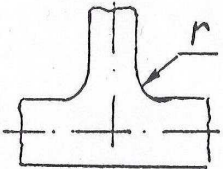
Одной из наиболее ответственных систем на судне, выход из строя которой приводит к потере хода судна и серьезным авариям, является система охлаждения СЭУ. Неоднократные случаи затопления машинных отделений на судах вследствие коррозионного разрушения труб и приемных патрубков систем охлаждения забортной водой потребовали принятия многочисленных срочных изменений в нормативных документах Регистра. После затоплений машинных отделений на судах «Аскания Нова» и «Dream», гибели судна «Авиор» и других серьезных происшествий на судах в начале 2000-х годов были приняты дополнительные требования Регистра к системам забортной воды. Изменения включали в себя требования по ограничению скорости потока в системах забортной воды, защите от контактной коррозии, горячему цинковому покрытию стальных труб и конструктивному исполнению приемных и отливных патрубков. Перечисленные конструктивные требования были внедрены в часть VIII «Системы и трубопроводы» Правил классификации и постройки морских судов (далее — Правила Регистра) и применяются для судов, построенных после 1999 года. Кроме этого, для контроля текущего износа элементов систем охлаждения забортной водой были введены требования о периодических измерениях остаточной толщины стенок приемных патрубков и межкингстонных перемычек после 10 лет эксплуатации (начиная со второго очередного освидетельствования). Все перечисленные меры положительно сказались на надежности систем охлаждения, и случаи затопления машинных отделений в настоящее время не фиксируются, но тем не менее опасность затопления помещений на судах в результате коррозионных повреждений трубопроводов систем охлаждения забортной водой по-прежнему остается актуальной и будет оставаться таковой, пока существуют трубопроводы забортной воды.

Безопасная эксплуатация трубопроводов забортной воды требует дополнительных затрат на проведение периодической диагностики и замены изношенных труб, так как ресурс трубопроводов забортной воды по-прежнему значительно меньше ресурса механизмов и судна в целом. В табл. 1 [5] приведены результаты расчета показателей безотказности и долговечности для некоторых элементов трубопроводов из медно-никелевого сплава МНЖ5-1 при средней скорости потока 2,5 м/с и толщине стенки труб 2,5 мм; расчет выполнен согласно РД5.5104-79 «Методика расчёта безотказности и долговечности элементов и допустимые скорости потока морской воды» [6]. В качестве показателя безотказности принята средняя наработка до отказа $T_{ср}$, а долговечности — средний ресурс до списания T_p . Из таблицы следует, что среднее значение жизни такой трубы, изготовленной из медно-никелевого сплава, составляет всего порядка 11 лет, но есть элементы трубопроводов, которые уменьшают среднюю наработку до отказа $T_{ср}$ до 5 лет.

Рассчитанная по той же методике средняя наработка до отказа трубопроводов, изготовленных из оцинкованной стали с толщиной покрытия 50 мкм в зависимости от диаметра трубопровода для различных значений средней скорости потока, показана на диаграмме на рис. 1 [7]. Расчет показателей долговечности производился для всего сортамента стальных труб при минимальной требуемой толщине стенки согласно части VIII Правил Регистра. Расчеты показывают, что средняя наработка до отказа составляет от 4 до 14 лет для труб номинальным диаметром до 200 мм.

Таблица 1

Определение показателей безотказности и долговечности (годы)

Трубопроводный элемент	Характеристики*	Охлаждение забортной водой		Водяное пожаротушение	
		$T_{ср}$	T_p	$T_{ср}$	T_p
Отвод гнутый 	$R/D = 1,5$	11,9	10,2	18,3	15,7
	$R/D = 2,0$	18,4	15,7	25,8	22,0
	$R/D = 2,5$	29,3	25,1	35,7	30,5
Отвод гнутый с гофрами 	$R/D = 1,5; h/D = 0,09$	7,41	6,33	12,2	10,5
Отвод, сваренный из секторов 	$R/D = 1,5$	7,40	6,3	12,2	10,4
	$R/D = 2,0$	9,35	7,99	15,0	12,8
Фланцевое соединение с выступающей внутрь прокладкой 	$H/D = 0,2$	4,34	3,72	7,54	6,44
	$H/D = 0,1$	5,01	4,28	8,60	7,35
Тройник прямой сварной 	$r/D = 0$	5,0	4,3	8,5	7,4
Тройник прямой со скругленными кромками 	$r/D = 0,1$	9,40	8,03	15,0	12,8
	$r/D = 0,3$	12,8	10,9	19,4	16,6

* D — диаметр трубы; R — средний радиусгиба; h — высота гофров; r — радиус скругления кромки; H — высота выступающей внутрь прокладки.

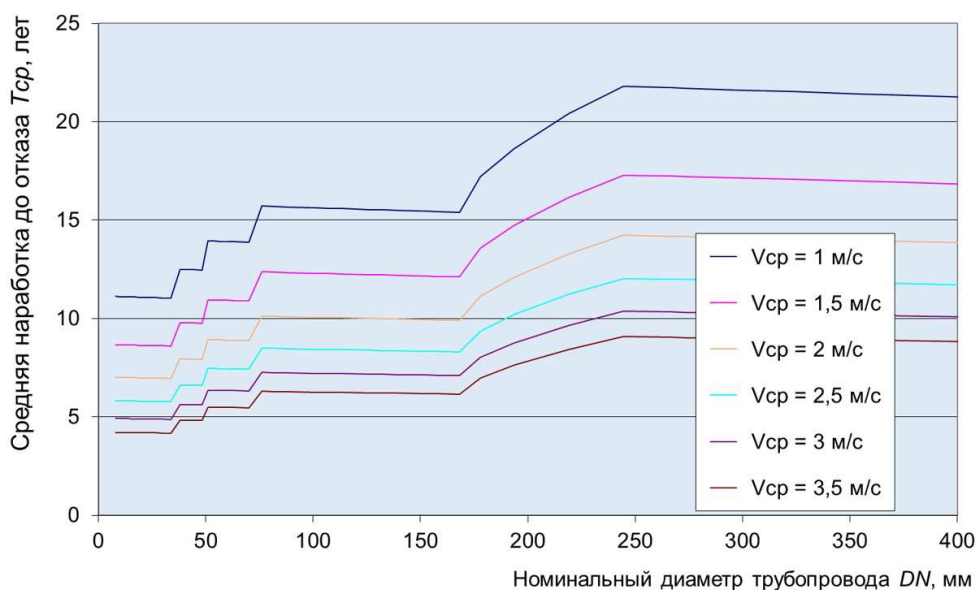


Рис. 1. Средняя наработка до отказа стальных труб морской воды с толщиной стенки согласно части VIII Правил Регистра и УТ МАКО URP2

Здесь можно сделать первый промежуточный вывод: повышение надежности судовых систем охлаждения забортной водой за счет повышения надежности трубопроводов либо связано с применением дорогостоящих материалов (титановых сплавов, пластмасс, дорогостоящих покрытий труб), либо требует значительного снижения скорости потока в трубах при увеличении диаметров трубопроводов. Последнее зачастую невозможно в судовых условиях из-за ограниченного пространства в машинном отделении.

Более радикальный способ обеспечения безопасности от затопления машинного отделения связан с отказом от трубопроводов забортной воды в системах охлаждения и применением замкнутой одноконтурной системы, преимущества и недостатки которых рассмотрим далее с целью определения пробелов в действующих нормативных документах.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СЭУ

Известно, что основное назначение системы охлаждения — это обеспечение отвода тепла от различных механизмов, устройств, приборов через теплообменные аппараты (ТА). В дизельных установках система охлаждения применяется для охлаждения рабочих цилиндров двигателей, ТА циркуляционной масляной системы, наддувочного воздуха, газовыпускного коллектора.

По своему конструктивному исполнению системы охлаждения, как и другие судовые системы, делятся на проточные (одноконтурные) и циркуляционные (замкнутые). В проточных системах холодоноситель берется из внешней среды вне системы и после охлаждения работающего оборудования возвращается в окружающую среду. На судах в качестве холодоносителя в проточных системах охлаждения может быть использована забортная вода или наружный воздух. Применение воздуха в одноконтурных проточных системах на судах не находит применения из-за низкой теплоемкости воздуха, но применяется для охлаждения некоторых видов электрического и электронного оборудования. Главным ограничением применения одноконтурных систем, использующих забортную воду в качестве холодоносителя, является температура ее нагрева, так как в случае охлаждения проточной системой забортной воды при температурах выше 45°C из соленой воды начинают выделяться растворенные соли. В результате отложения солей уменьшается теплообмен от деталей двигателя воде, что приводит к повышенным тепловым напряжениям, снижению надежности и экономичности двигателя. На современных судах примерами проточных одноконтурных систем охлаждения забортной водой могут быть системы охлаждения дейдвудного устройства, подшипников валопровода и некоторых шлюпочных двигателей.

В циркуляционных системах по замкнутому контуру многократно проходит постоянное количество охлаждающего вещества, а тепло от него отводится через ТА к охлаждающему рабочему телу второго контура, который выполняется в виде проточной системы. В этом случае в охлаждении принимают участие

два потока, а системы называют двухконтурными. Применяемые в судовых дизельных энергоустановках замкнутые системы охлаждения позволяют использовать пресную воду в качестве холодоносителя в замкнутом контуре охлаждения, что сохраняет от отложений полости охлаждения двигателя и позволяет поддерживать наиболее благоприятную температуру воды охлаждения, регулируя ее в соответствии с режимом работы двигателя. До конца прошлого столетия системы охлаждения дизельных энергетических установок почти всегда двухконтурные: двигатели охлаждаются пресной водой замкнутого контура, которая, в свою очередь, охлаждается забортной водой в специальном холодильнике. В качестве циркуляционных насосов пресной и забортной воды используются центробежные насосы.

При этом в качестве теплоносителя во втором внешнем контуре охлаждения в таких системах могут использоваться вода или воздух. Применение воздушного охлаждения имеет целый ряд преимуществ, прежде всего это отсутствие труб забортной воды, приемных фильтров и кингстонных ящиков. Но так как вода обладает гораздо большей теплоемкостью по сравнению с воздухом и в связи с доступностью на судне забортной воды для охлаждения, воздушные системы не получили широкого применения на морских судах, воздушные системы охлаждения нашли применение в судовых аварийных дизель-генераторах небольшой мощности, обычно до 200 кВт.

В настоящее время на судах наибольшее распространение получили двухконтурные системы охлаждения, внутренний контур предусматривает циркуляцию пресной воды по замкнутому контуру с помощью специальных насосов охлаждения, которые могут быть навешенными на главный двигатель (ГД) или иметь электрический привод. Второй внешний контур таких систем предусматривает использование забортной охлаждающей воды, прием которой происходит в кингстонном или ледовом ящике. Для циркуляции в контуре забортной воды обычно предусматривается не менее двух независимых насосов с приводом от электродвигателя. Пример двухконтурной системы охлаждения показан на рис. 2, где на схеме синим цветом показана система охлаждения забортной водой с двумя кингстонными ящиками, межкингстонной перемычкой с приемными фильтрами, циркуляционными насосами, ТА контура охлаждения двигателя пресной водой. Несмотря на то, что контур забортной воды обычно изготавливается из дорогостоящих цветных металлов, трубы систем охлаждения забортной водой остаются одним из наиболее ненадежных элементов СЭУ [8]. Кроме того, работа двухконтурной системы охлаждения связана с дополнительными затратами энергии на привод насоса охлаждения забортной водой, что сказывается на показателях энергоэффективности судна [9].

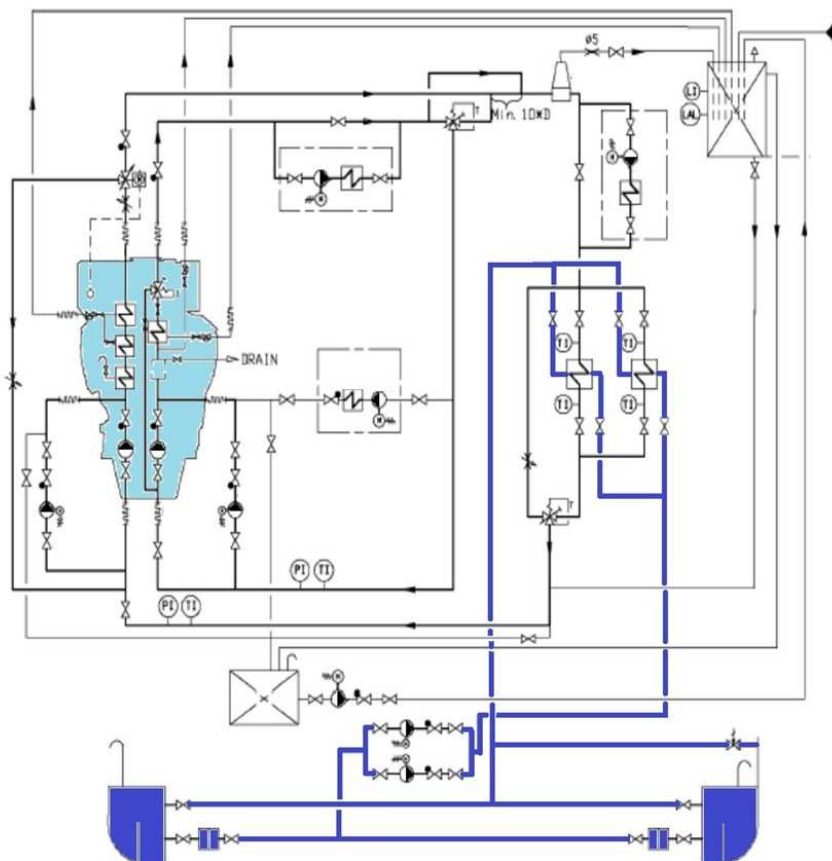


Рис. 2. Схема двухконтурной системы охлаждения

ОДНОКОНТУРНЫЕ ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Начиная с конца прошлого века на морских судах и судах типа «река-море» наметилась новая тенденция развития систем охлаждения. Кратко ее можно изложить следующим образом: при отказе от применения двухконтурных систем охлаждения вместо системы охлаждения забортной водой используются либо охладители пресной воды, расположенные в кингстонных ящиках, либо корпусные конструкции, охлаждаемые непосредственно забортной водой. Обычная типовая схема работы системы охлаждения с расположенными в кингстонном ящике охладителями показана на рис. 3.

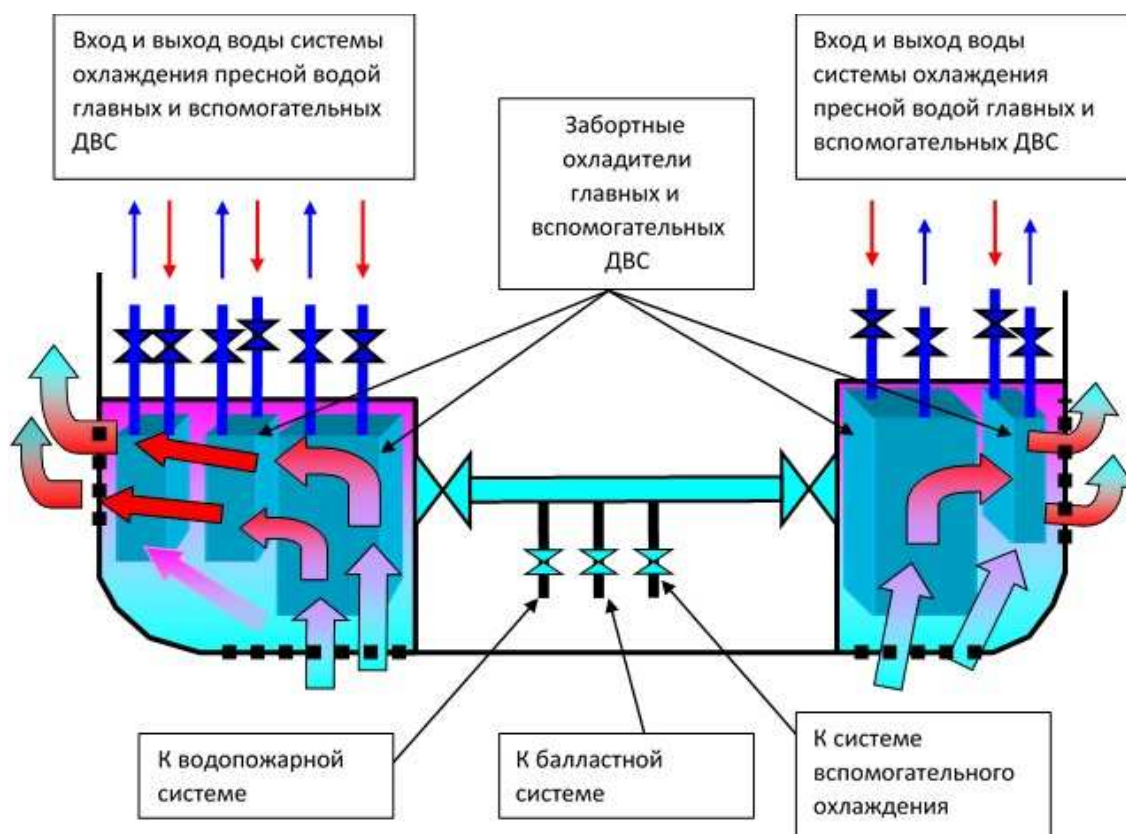


Рис. 3. Принцип работы системы охлаждения с проточными забортными охладителями

В настоящее время на судах наибольшее распространение получили забортные охладители проточного типа, расположенные в специальных выгородках, которым в Правилах Регистра дается определение «ящик проточного охладителя» и которые одновременно могут выполнять функцию кингстонных или ледовых ящиков. В качестве проточных охладителей используются ТА с горизонтально расположенной трубной доской и U-образными трубками из медных сплавов, обычно скрепленными несколькими горизонтальными промежуточными диафрагмами, предотвращающие вибрацию тонкостенных труб. Пример такого охладителя показан на рис. 4, где показан забортный ТА фирмы BLOXMA. На рис. 5 показан пример расположения проточного забортного охладителя в машинном отделении буксира.

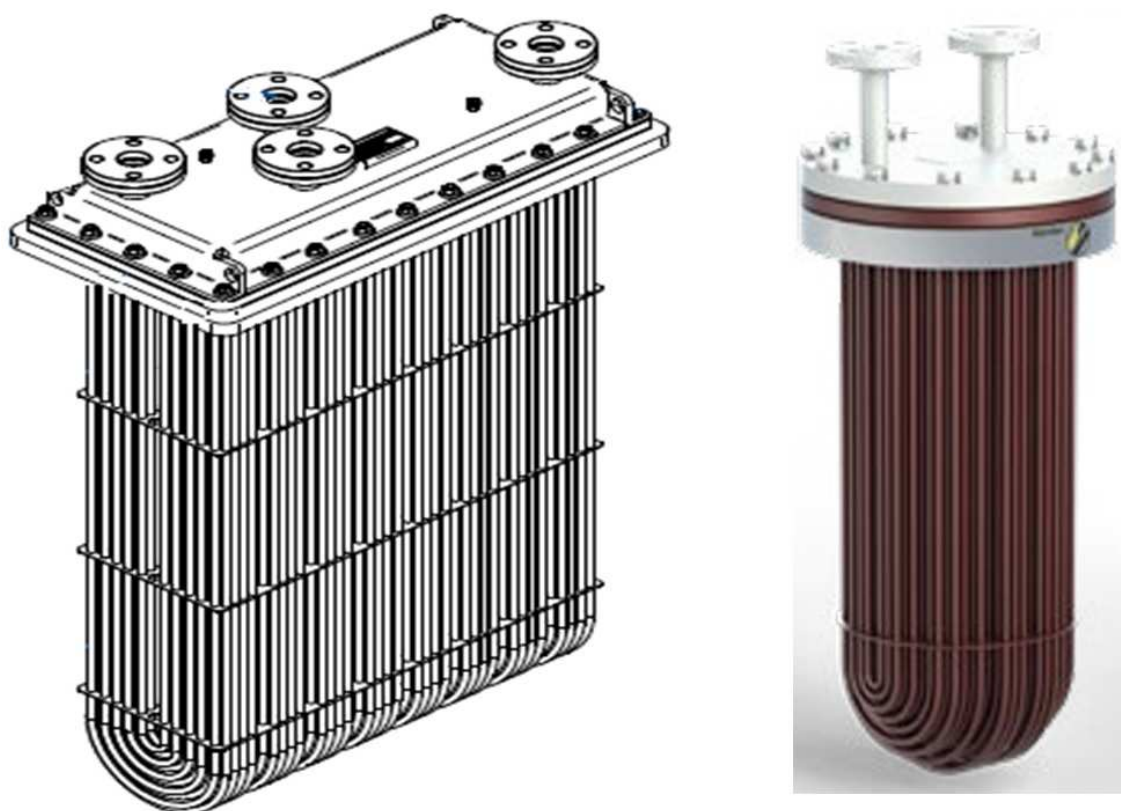


Рис. 4. Забортный охладитель проточного типа для главного двигателя (слева) фирмы BLOKLAND и для вспомогательного дизель-генератора (справа) фирмы KELVION

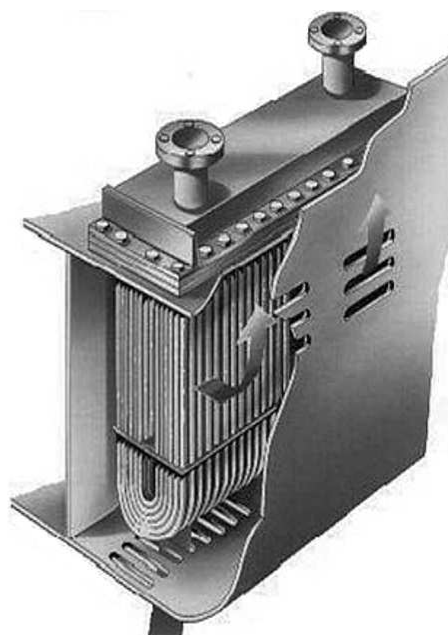


Рис. 5. Расположение забортного охладителя проточного типа в машинном отделении буксира «CASTOR» (слева) и расположение теплообменного аппарата в выгородке теплообменного ящика (справа) по материалам фирмы BLOXMA

Другой способ организации теплообмена в системе охлаждения без использования трубопроводов забортной воды предусматривает использование забортных килевых охладителей, то есть специальных ТА или каналов, вынесенных за пределы наружной обшивки. Килевой охладитель — это подвесной ТА, прикрепленный к подводной части корпуса судна. Килевые охладители могут быть выполнены в виде труб (рис. 6 справа), змеевиков, каналов (рис. 7) или специально изготовленного ТА (рис. 6 слева), материал которого должен быть совместим с материалом корпуса судна для предотвращения гальванической коррозии. На рис. 7 показан буксир с килевым забортным охладителем, выполненным в виде каналов, приваренных к корпусу судна.



Рис. 6. Килевые забортные охладители фирмы Duramax Marine: забортные аппараты (слева) и пучки труб (справа)

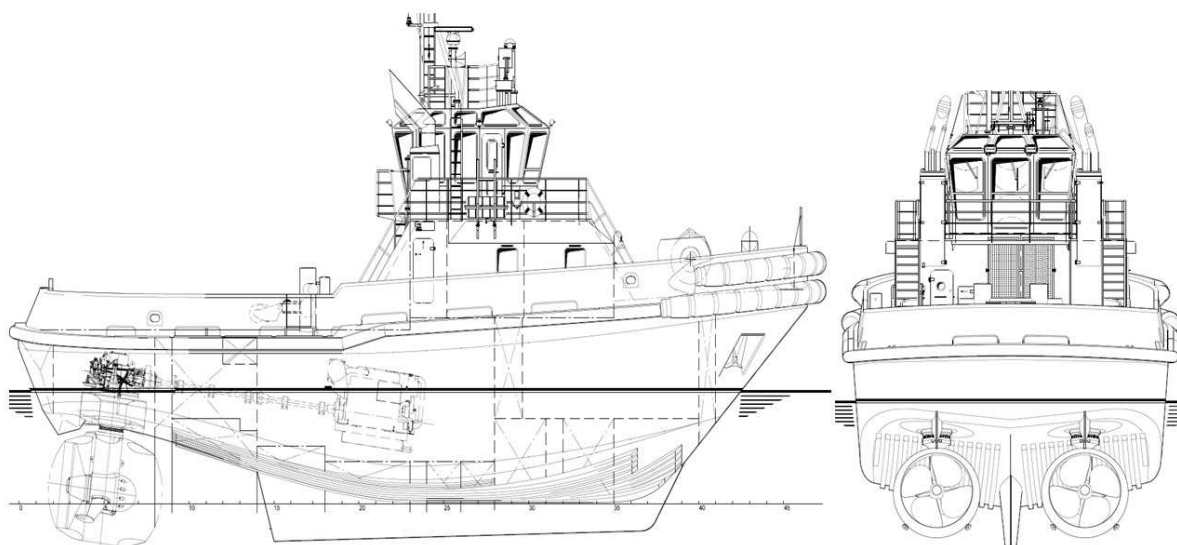


Рис. 7. Буксир с килевым забортным охладителем, выполненным в виде каналов, приваренных к корпусу судна

Отличительной чертой всех килевых охладителей являются поверхности теплообмена, выступающие за пределы наружной обшивки, в результате чего велика вероятность их повреждения при столкновении с препятствиями, плавающими в воде предметами и льдом. Поэтому Правилами Регистра по применению таких систем накладывается несколько дополнительных ограничений для судов с ледовым классом, о чем будет рассказано далее.

Один из возможных вариантов использования корпусных конструкций в качестве охладителей показан на рис. 8, подробные исследования таких систем приведены в [10]. В конструкциях этого типа нет выступающих за пределы корпуса поверхностей теплообмена, в качестве них выступает наружная обшивка, повреждение которой значительно менее вероятно по сравнению с ТА и трубами, расположенными вне корпуса судна. Тем не менее Правила Регистра не разделяют теплообменные системы такого типа и килевые, поэтому все ограничения, накладываемые на килевые охладители, в настоящее время применимы к таким системам.

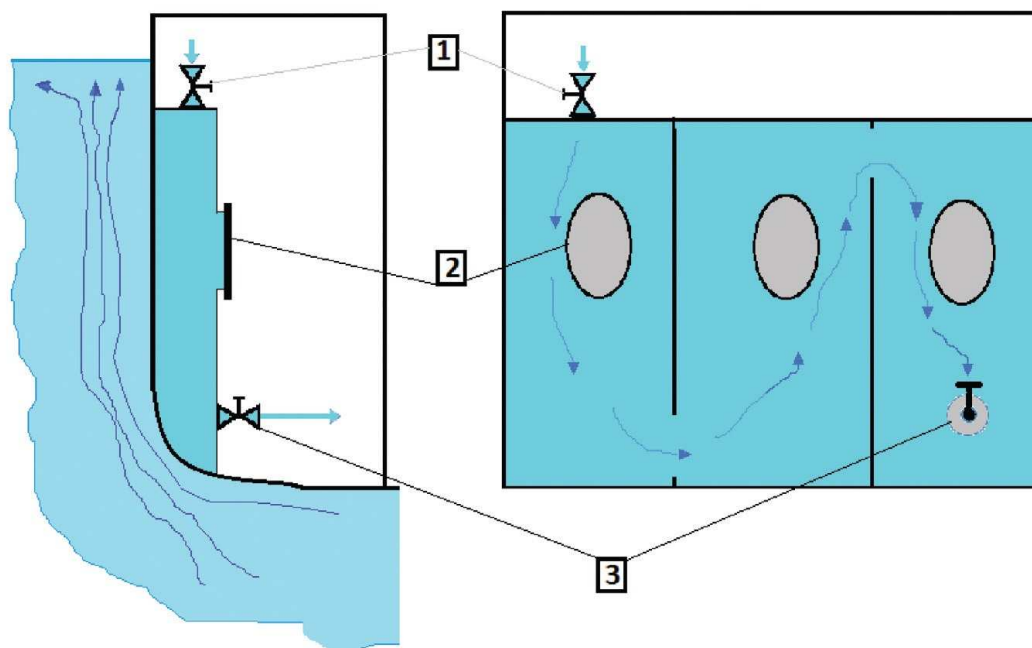


Рис. 8. Схема работы забортного охладителя, использующего наружную обшивку в качестве поверхности теплообмена:
1 — приемный клапан; 2 — горловина лаза одного из каналов охлаждения; 3 — отливной клапан

ТРЕБОВАНИЯ ПРАВИЛ РЕГИСТРА К СИСТЕМАМ С ЗАБОРТНЫМИ ОХЛАДИТЕЛЯМИ

Требования к системам с килевыми охладителями появились в Правилах Регистра в 1999 году. Определение килевого охладителя тогда в Правилах дано не было, поэтому первоначально все забортные охладители рассматривались как килевые и к ним применялись одинаковые ограничения без учета особенностей конструкции: не допускалось применение на ледоколах и судах ледового плавания категорий ЛУ4 — ЛУ9 (Arc 4 и Arc 9 в современной классификации). Кроме того, в системе, помимо основного охладителя, присутствовал резервный забортный охладитель, который может быть общим для нескольких главных двигателей. В Правилах 2016 года, в разделе 15.6 части VIII, содержащем требования к системам с килевыми охладителями, появилось допущение, позволяющее использовать такие системы для судов с классом Arc 4 в случае, если толщина стенок каналов теплообменника имеет величину не менее толщины бортовой обшивки судна. При этом допущено не устанавливать резервный охладитель для двух главных двигателей, если система позволяет работать двум двигателям с использованием одного охладителя. Кроме того, для судов с ограниченным районом плавания резервирование охладителей не требуется вообще.

Правила Регистра начиная с издания 2017 года существенно расширили допустимую область применения таких систем: в части VIII были введены определения проточных охладителей (теплообменные аппараты, расположенные в специальных выгородках) и килевых (поверхностями теплообмена служат корпусные конструкции, через которые прокачивается охлаждающая среда). Для каждой из этих групп были определены ограничения в зависимости от ледового класса судна. В результате появления в Правилах 2017 года определений килевых и проточных охладителей ограничения по применению проточных забортных охладителей на судах ледового плавания были сняты.

Для дальнейшего расширения применения забортных охладителей предлагается рассмотреть разделение килевых охладителей на находящиеся за бортом и примыкающие к наружной обшивке, с использованием корпуса судна в качестве поверхности охлаждения. Для более широкого применения таких систем необходимо сформулировать их определение в части VIII Правил Регистра и указать допустимую область применения. Наиболее разумным представляется назвать такие ТА обшивочными охладителями (sidecoolers) и дать следующее определение: обшивочный охладитель — теплообменный аппарат, выполненный в виде цистерны, примыкающей к наружной обшивке судна, через которую происходит теплообмен между охлаждаемой жидкостью и забортной водой.

В результате введения такого определения в Правила Регистра появится возможность применять обшивочные охладители без ограничений по ледовому классу.

Можно предложить классификацию забортных охладителей, как показано на рис. 9. Для каждой из этих групп были определены ограничения в зависимости от ледового класса судна.



Рис. 9. Классификация забортных охладителей

ПРЕИМУЩЕСТВА ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Преимущества одноконтурных систем охлаждения с забортными охладителями очевидны.

1. Существенно уменьшается потребление электроэнергии в процессе эксплуатации судна, так как нет затрат на работу насосов охлаждения забортной водой. На работу насосов охлаждения забортной водой приходится приблизительно 20 % всей вырабатываемой на ходу судна электроэнергии или примерно 0,4 — 1,0 % мощности главного двигателя (меньшее значение для двигателей большей мощности), то есть для среднетоннажного судна мощность привода насоса охлаждения забортной водой составляет 15 — 20 кВт. Если учесть, что для привода насоса мощностью 15 кВт требуется приблизительно 3 литра топлива в час, то можно подсчитать, что годовая экономия топлива для судна с коэффициентом ходового времени 0,5 составит 13 — 15 т [9].

2. Значительно упрощается система охлаждения, и, как следствие, повышается ее надежность. Наименее надежными элементами систем охлаждения забортной водой являются трубы, затем в порядке возрастания надежности следуют запорная арматура, насосы, ТА, контрольно-измерительные приборы. Отсутствие основных элементов системы охлаждения забортной водой значительно повышает надежность механической установки. При этом опасности, связанные с потерей хода судна, значительно уменьшаются, а опасность затопления машинного отделения в результате разрыва трубы охлаждения забортной водой исключается.

3. Существенно снижаются затраты при постройке, за счет отказа от закупок насосов забортной воды и арматуры. При этом необходимо учесть, что для уменьшения коррозионного износа в системах охлаждения забортной водой часто используют трубы и арматуру из цветных сплавов, а если используются стальные трубы, то они, согласно требованиям Регистра, должны иметь горячее цинковое покрытие. Существенно снижается общая трудоемкость постройки судна за счет уменьшения затрат на монтаж оборудования и изготовление труб.

4. Отсутствие труб забортной воды уменьшает образование конденсата в машинном отделении; как следствие, уменьшаются количество льяльных вод, связанная с этим коррозия корпусных конструкций в машинном отделении и затраты на утилизацию нефтесодержащих льяльных вод.

5. Существенно уменьшается количество донно-бортовой арматуры (ДБА) и донно-бортовых приварных приемных и отливных патрубков, что существенно уменьшает вероятность затопления машинного отделения. Не случайно, проанализировав аварии, связанные с затоплением машинных отделений, и рассмотрев опасности, связанные с отказами трубопроводов, Регистр определил [11] два наиболее опасных объекта на судне: донно-бортовые патрубки и межкингстонные переключки, к которым в настоящее время предъявляются требования по обязательным периодическим замерам толщин стенок.

6. Уменьшается объем замеров толщин стенок элементов системы охлаждения для судов в эксплуатации. Требование о замерах толщин стенок донно-бортовых патрубков появилось в связи с большой опасностью затопления помещений после их выхода из строя, так как в этом случае невозможно остановить поступление воды путем закрытия донно-бортовой арматуры. С учетом большого диаметра донно-бортовых патрубков и расположения их значительно ниже ватерлинии вероятность затопления машинного отделения (МО) после аварии патрубка практически 100 %. Примером может служить затопление МО на теплоходе «Аскания Нова», когда приемный патрубок был изношен до толщины бумаги. Требование о замерах толщин стенок межкингстонных переключек также появилось в связи с большой опасностью затопления МО, хотя в данном случае поступление воды можно остановить путем закрытия приемной донно-бортовой арматуры. Но в этом случае происходит неизбежная остановка главных и вспомогательных двигателей и, как следствие, на время ремонта потеря хода, управляемости, электропитания от всех источников, кроме аварийного дизель-генератора (АДГ), то есть судно попадает в ситуацию, когда до катастрофы остается один шаг. Для того чтобы произошла потеря судна, достаточно еще одного опасного события, например плохой погоды или появления другого судна, с которым невозможно избежать столкновения из-за отсутствия хода.

Хотя при использовании забортных охладителей на судне зачастую сохраняются донно-бортовые патрубки и межкингстонная переключка для балластной и пожарной систем, учитывая их назначение и кратковременный режим работы, последствия и вероятность наступления такого отказа значительно меньше. В табл. 2 приводятся типовые отказы системы охлаждения и связанные с ними опасности, дается оценка вероятности реализации этих опасностей для двух вариантов систем охлаждения.

Таблица 2

Сравнение последствий и вероятности типовых отказов двухконтурной системы охлаждения и одноконтурной с забортным охладителем

Описание отказа	Следствия отказа	Описание опасности	Оценка вероятности	
			Схема с системой охлаждения забортной водой	Схема с забортным охладителем
Выход из строя труб системы охлаждения забортной воды	1. Прием воды в МО в течение времени, необходимого на закрытие ДБА	1. Затопление машинно-котельного отделения (МКО)	1. Возможно при неверных действиях экипажа	1. Исключено
	2. Остановка ГД или дизель-генераторов	2. Потеря хода на время ремонта	2. Весьма вероятно	2. Исключено
Выход из строя межкингстонной магистрали	1. Прием воды в МО в течение времени, необходимого на закрытие ДБА	1. Затопление МКО	1. Возможно при неверных действиях экипажа. Весьма вероятно при одновременном отказе ДБА	1. Исключено
	2. Остановка ГД и дизель-генераторов (кроме АДГ)	2. Потеря хода и электропитания на время ремонта и осушения МКО	2. Неизбежно	2. Исключено
Выход из строя приемного или отливного патрубка	1. Прием воды в МО	1. Затопление МКО	1. Весьма вероятно	1. Исключено
	2. Остановка ГД и дизель-генераторов (кроме АДГ)	2. Потеря хода и электропитания	2. Весьма вероятно	2. Исключено
		3. Потеря судна	3. Возможно при неблагоприятных обстоятельствах	3. Исключено
Забивание кингстонных ящиков битым льдом и шугой	1. Нарушение охлаждения	1. Потеря хода на время очистки фильтров и обогрева кингстонных ящиков	1. Возможно при плавании в весеннем битом льду	1. Маловероятно. Возможно при производстве балластных операций

Продолжение — табл. 2

Описание отказа	Следствия отказа	Описание опасности	Оценка вероятности	
			Схема с системой охлаждения забортной водой	Схема с забортным охладителем
Выход из строя теплообменного аппарата (ТА) охлаждения пресной воды	1. Потери пресной воды	1. Переход на резервный ТА. Ремонт ТА	1. Возможен ремонт в рейсе или порту путем заглушки или подвальцовки трубок ТА. Возможна замена трубных элементов на плаву	1. Возможен ремонт в рейсе или порту путем заглушки поврежденных трубок ТА. Замена ТА возможна только в доке
	2. Попадание забортной воды в контур охлаждения пресной водой	2. Сокращение ресурса дизеля. Внеплановое техобслуживание	2. Возможно при неверных действиях экипажа	2. Возможно при неверных действиях экипажа
Обрастание ТА морскими организмами	1. Перегрев главных и вспомогательных двигателей	1. Уменьшение мощности двигателей	1. Уменьшение скорости хода. Очистка во время рейса	1. Уменьшение скорости хода. Очистка возможна только в доке

Как следует из табл. 2, большинство наиболее опасных событий, связанных с отказами системы забортной воды, при применении схемы с забортными охладителями либо полностью исключаются, либо значительно уменьшается вероятность их наступления и тяжести последствий. Только в последнем случае последствия аварии для систем охлаждения с забортными охладителями могут быть более тяжелыми, чем для двухконтурных систем охлаждения. Учитывая, что характер отказа, возникающего в результате обрастания ТА, является постепенным, необходимо периодически контролировать эффективность его работы в процессе эксплуатации.

Однако системы охлаждения с забортными охладителями не лишены недостатков. Применение забортных охладителей имеет ряд особенностей, в настоящее время ограничивающих использование таких систем, несмотря на все их преимущества. Если в обычном ТА с обеих сторон стенки, разделяющей две среды, происходит принудительный (а это значит, и регулируемый) массообмен теплоносителя, то в случае с забортным охладителем циркуляция теплоносителя естественная, а значит, и надежно рассчитать ее интенсивность гораздо сложнее. При создании замкнутых систем охлаждения разработчики сталкиваются с проблемой отсутствия необходимых, в достаточной степени достоверных методик расчета теплоотвода в забортных ТА, обеспечивающих естественную циркуляцию охлаждаемого теплоносителя с необходимой кратностью. Как известно, интенсивность теплообмена, характеризуемая коэффициентом теплоотдачи с поверхности, зависит от скорости движения жидкости, а она, в свою очередь, при естественной циркуляции зависит только от объемного температурного расширения и соответствующего повышения температуры и имеет сравнительно низкие значения коэффициентов теплопередачи, что определяет значительные площади требуемой поверхности и габариты ТА.

При этом классический прием, который широко используется при проектировании ТА, — увеличение площади поверхности теплообмена со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи с поверхности путем оребрения труб — в данном случае практически не применим, так как значительно увеличивает интенсивность обрастания поверхностей теплообмена морскими организмами.

Таким образом для забортных охладителей, несмотря на все их преимущества, есть главное естественное ограничение по применению — низкий коэффициент теплообмена внутри теплообменного ящика, обусловленный естественной циркуляцией. Это ограничивает применение таких систем охлаждения судами с мощностью главных двигателей в несколько тысяч киловатт.

При таких условиях весьма актуальной становится разработка методов интенсификации теплообмена между поверхностью теплообмена и забортной водой.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ЗАБОРТНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

С целью интенсификации теплопередачи ТА со стороны цистерны целесообразно использовать различные доступные средства организации принудительного движения внутри теплообменного ящика (ТЯ). Авторам представляется перспективным рассмотреть следующие варианты.

1. Организация естественной циркуляции в ТЯ.

Анализ применяемых конструкций ТЯ, в которых располагают забортные охладители, говорит о том, что в настоящее время производители ТА, равно как и проектировщики судовых конструкций, не занимаются их оптимизацией, и здесь существует большое поле деятельности. В частности, установка простых направляющих конструкций внутри ТЯ обещает значительное увеличение коэффициента теплоотдачи с поверхности. При этом можно сформулировать простой принцип организации естественной циркуляции в ТЯ: необходимо стремиться к отсутствию циркуляции теплоносителя внутри ТЯ при максимальной циркуляции внешнего теплоносителя (через приемную и выпускную решетки). При такой организации циркуляции теплоносителя наиболее холодная свежая забортная вода должна поступать к поверхностям нагрева и затем, осуществив теплосъем, уходить за борт, не смешиваясь с прочей водой в ТЯ. В подтверждение этого предположения ранее [12] было показано, что в условиях естественной циркуляции за счет изменения плотности нагретой воды для увеличения скорости циркуляции и массообмена большое значение имеет высота ТЯ.

2. Подача в ТЯ сжатого воздуха (барботирование).

Такой способ весьма эффективен и, по данным проведенных исследований [13], позволяет повысить коэффициент теплоотдачи в 6 — 8 раз. Однако он не применим при длительной непрерывной эксплуатации в этом режиме из-за большого расхода сжатого воздуха, запас которого должен храниться на судне для пуска главного двигателя.

3. Организация искусственной циркуляции в ТЯ.

Конструкция системы охлаждения, позволяющая работать в двух режимах, то есть без затрат энергии на прокачку воды через кингстонный ящик для обычного режима работы и с принудительной прокачкой забортной воды в режиме форсажного охлаждения, при нехватке естественной циркуляции. Эти системы можно назвать гибридными. Такая схема может быть реализована для особых режимов повышенной мощности при малых скоростях судна (например, режим буксировки) или для работы при температуре забортной воды 32 °С, что встречается довольно редко в российских широтах. Возможны следующие варианты гибридных схем.

3.1. Предусмотреть в системе отдельный резервный насос забортной воды с пластинчатым ТА в машинном отделении. Такую схему охлаждения можно назвать «смешанной», то есть работающей по обычной схеме с охлаждением через забортный охладитель и с подачей воды от кингстонного ящика с охлаждением в резервном пластинчатом ТА в случае недостатка охлаждения от забортного охладителя или его отказа. Хотя в этом случае все затраты на систему охлаждения сохраняются, расходы энергии на привод насоса охлаждения будут практически нулевыми.

3.2. Для организации искусственной циркуляции в ТЯ можно задействовать один из насосов забортной воды общесудового назначения, например пожарный, охлаждения кондиционеров, санитарный и т.п. Такой насос может забирать воду из ТЯ, увеличивая приток более холодной забортной воды. Безусловным преимуществом такой схемы является возможность реализовать ее практически без изменений в системе охлаждения. Единственное, о чем необходимо позаботиться, — это чтобы забор воды из кингстонного ящика производился из его более нагретой части, чтобы вода, попадающая в межкингстонную магистраль, прошла через охладитель, например, как это показано на рис. 10. Однако использование для этого пожарного насоса нельзя назвать энергоэффективным решением, так как пожарный насос создает высокий напор, в данном случае ненужный, а это приводит к дополнительным потерям энергии.

3.3. Использовать напор, теряемый в предыдущей схеме, возможно с помощью водоводяного эжектора, как это показано на рис. 11. Предусмотреть внутри ТЯ специальный эжектор с приводом от пожарного насоса с откачкой воды за борт. Если пожарный насос забирает уже нагретую воду, то эффективность такой работы будет повышена, по сравнению с вариантом 3.2, не менее чем в два раза.

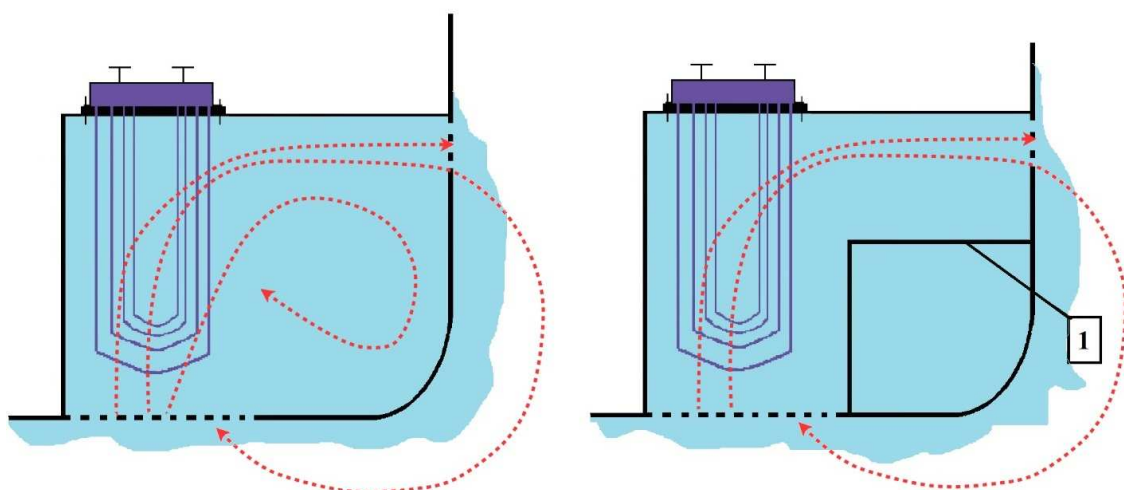


Рис. 10. Схема естественной циркуляции в теплообменном ящике:
1 — конструкции для организации потока в кингстонном ящике

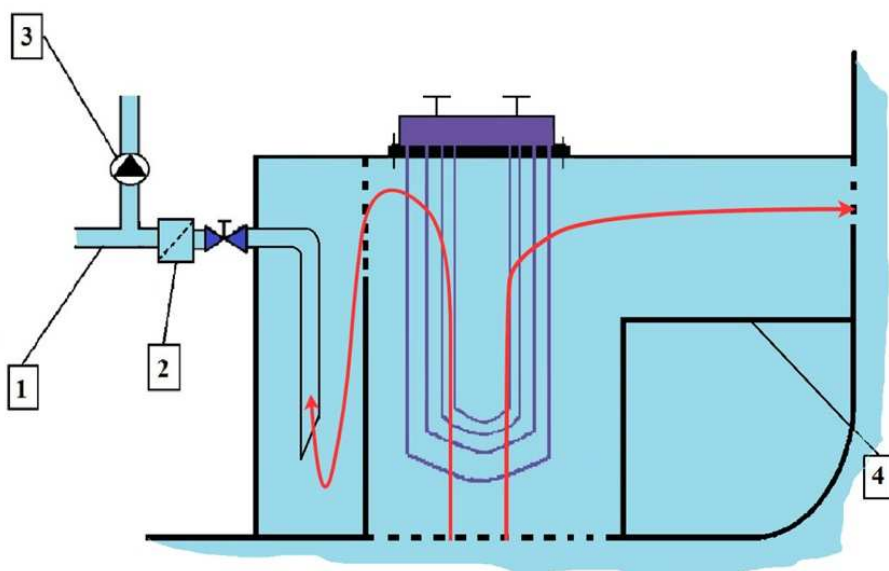


Рис. 11. Схема работы забортного охладителя с использованием пожарного насоса или другого насоса общесудового назначения:
1 — межкингстонная перегородка; 2 — фильтр забортной воды; 3 — пожарный насос;
4 — конструкции для организации потока в кингстонном ящике

Таким образом, помимо одноконтурных и двухконтурных схем системы охлаждения, появляется третий тип — гибридные схемы, использующие принудительную прокачку через теплообменный ящик. С учетом этого классификация систем охлаждения примет вид, показанный на рис. 13.

Гибридные схемы охлаждения являются более надежными, так как в случае недостаточного охлаждения и появления угрозы перегрева главного двигателя появляется возможность воспользоваться дополнительными возможностями схемы без необходимости понижения мощности. Осмысленная разработка конструктивных мер по организации массо- и теплообмена в ТЯ требует математической модели этих процессов и, возможно, модельного и натурного моделирования. При использовании гибридной схемы точность таких расчетов менее значима, работа системы возможна в двух режимах: с естественной циркуляцией (основной режим) и с принудительной циркуляцией (режим форсированного охлаждения).

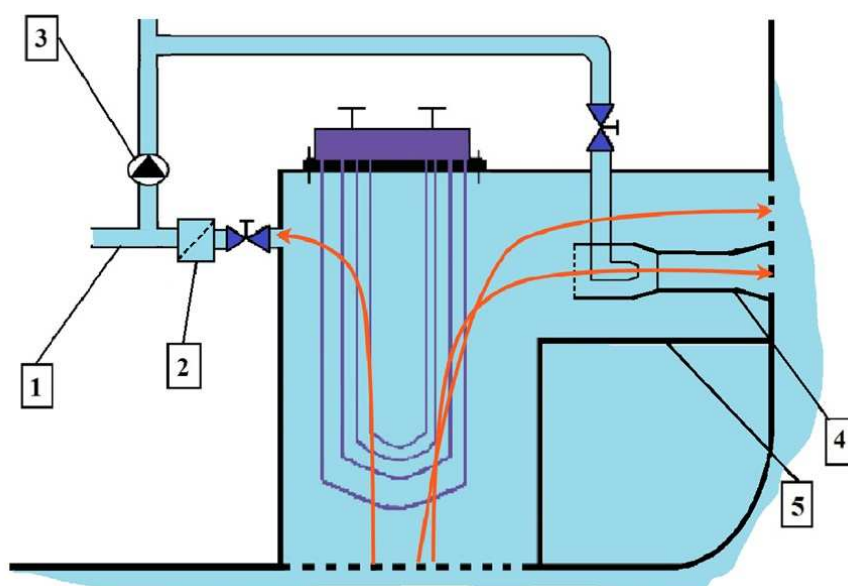


Рис. 12. Схема работы забортного охладителя с использованием водоструйного эжектора с приводом от пожарного насоса:

1 — межконтинентальная перегородка; 2 — фильтр забортной воды; 3 — пожарный насос;
4 — водоструйный эжектор; 5 — конструкции для организации потока в континентальном ящике

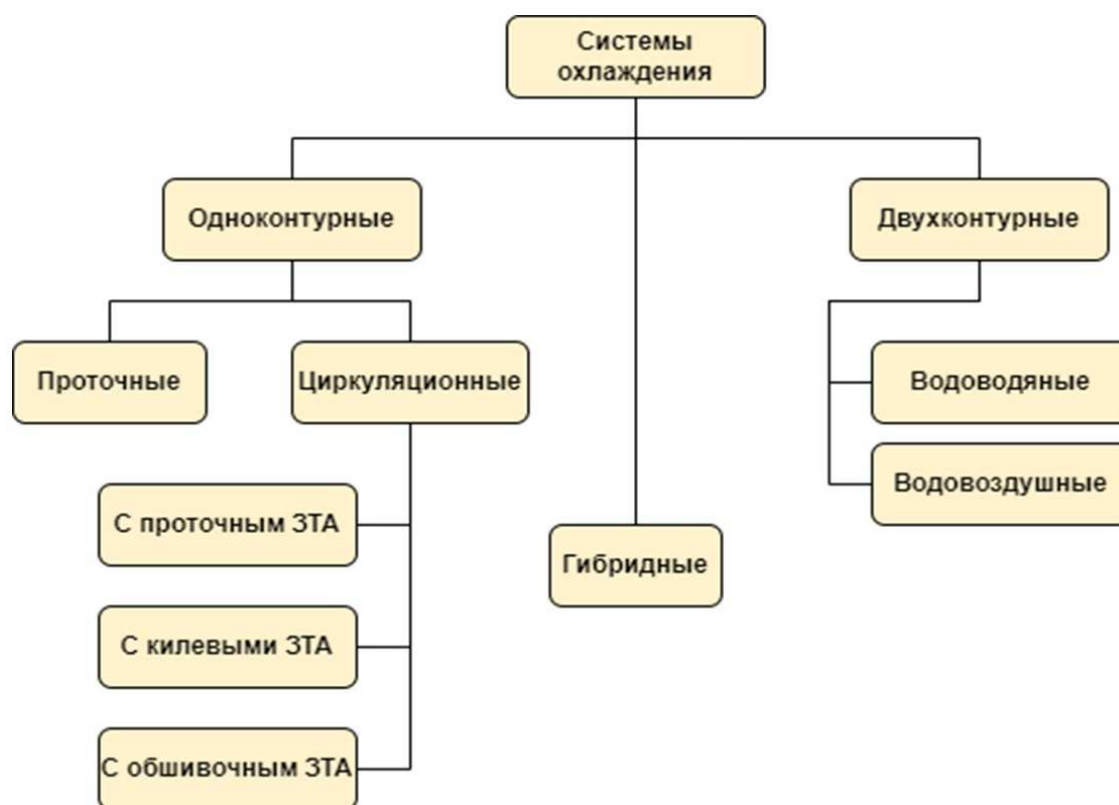


Рис. 13. Классификация систем охлаждения

ВЫВОДЫ

1. Развитие замкнутых систем охлаждения судовых энергетических установок является чрезвычайно перспективным направлением совершенствования судов. При этом, по сравнению с широко используемыми в настоящее время разомкнутыми системами, повышается надежность эксплуатации, снижается стоимость системы, обеспечивается экономия энергии и исключается уничтожение рыбных ресурсов морей и океанов.

2. Для более широкого применения забортных охладителей требуется разработать эффективные меры по интенсификации теплообмена в проточных охладителях. В качестве эффективного способа обеспечения интенсивности теплообмена в забортных ТА проточного типа предлагается использовать гибридные схемы охлаждения, которые в особо тяжелых условиях эксплуатации могут работать в режиме принудительной циркуляции воды в кингстонном ящике.

3. В процессе разбора возможных вариантов систем охлаждения сделано предложение выделить обшивочные ТА в отдельный класс, отграничив их от килевых охладителей с целью расширения области применения для систем охлаждения судов ледового плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганнесен В.В. Аварийность морских судов и методология поиска причинно-следственных связей, приведших к аварии / В.В. Ганнесен, Е.Е. Соловьёва // Научные труды Дальрыбвтуза. — 2022. — Т. 61, № 3. — С. 70 — 76.
2. Мотрич В.Н. 2022 год: аварийность морского флота / В.Н. Мотрич // Морские вести России. — 27.10.2023. [Электронный ресурс] URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/105728/> (дата обращения 04.02.2025).
3. Мотрич В.Н. Аварийность морского флота / В.Н. Мотрич // Морские вести России. — 24.09.2024. [Электронный ресурс] URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/111604/> (дата обращения 04.02.2025).
4. Шурпяк В.К. Анализ аварийности на судах с классом регистра / В.К. Шурпяк, А.А. Сергеев // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2005. — № 28. — С. 32 — 46.
5. Макаров В.Г. Новые требования Регистра к защите от коррозии судовых трубопроводов / В.Г. Макаров, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 1999. — № 22. — С. 194 — 206.
6. РД5.5104-79 Методика расчёта безотказности и долговечности элементов и допустимые скорости потока морской воды.
7. Голуб Е.С. Оценка технического состояния трубопроводов забортной воды согласно новым документам Регистра / Е.С. Голуб, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2000. — № 23. — С. 216 — 227.
8. Харламова А.Э. Анализ аварийности судов, вызванной ненадежной работой системы охлаждения судовых энергетических установок / А.Э. Харламова, М.Н. Покусаев, А.В. Трифонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 30 — 40. — DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40. EDN QCWWRO.
9. Шурпяк В.К. Оценка влияния основных судовых систем на показатели энергетической эффективности судна / В.К. Шурпяк, А.А. Серов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48/49. — С. 95 — 103.
10. Федоровский К.Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К.Ю. Федоровский, Н.К. Федоровская. — М.: Вузовский учебник; ИНФРА-М, 2017. — 164 с.
11. Горелик Б.А. Идентификация опасностей и оценка риска судовых трубопроводов / Б.А. Горелик, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2009. — № 32. — С. 156 — 170.
12. Орлова Е.Г. Проблема оценки эффективности судовых систем охлаждения с забортными охладителями / Е.Г. Орлова, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник / Российский морской регистр судоходства. — 2008. — № 31. — С. 245 — 259.
13. Ткач С.Н. Экспериментальные исследования теплоотдачи забортного охладителя в условиях свободно-конвективного и газожидкостного течения морской воды / С.Н. Ткач, И.И. Свириденко, Е.С. Ткач // Вісник СевНТУ. — 2013. — № 137. — С. 351 — 354. — EDN RBIDIH.

REFERENCES

1. Gannesen V.V., Solov'eva E.E. The accident rate of sea vessels and the methodology for searching for the accident causes. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2022. Vol. 61. No 3. P. 70 — 76. (In Russ.)
2. Motrich V.N. 2022 god: avariinost' morskogo flota [2022: Maritime fleet accident rate]. *Morskie vesti Rossii [Maritime News of Russia]*. 27.10.2023. URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/105728/> (accessed 04.02.2025).
3. Motrich V.N. Avariinost' morskogo flota [Maritime fleet accident rate]. *Morskie vesti Rossii [Maritime News of Russia]*. 24.09.2024. URL: <https://morvesti.ru/themes/1693/111604/> (accessed 04.02.2025).
4. Shurpyak V.K., Sergeev A.A. Analysis of the average accident rate of RS classed ships. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2005. Issue 28. P. 32 — 46.
5. Makarov V.G., Shurpyak V.K. Novye trebovaniia Registra k zashchite ot korrozii sudovykh truboprovodov [New Register requirements for corrosion protection of ship pipelines]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 1999. Issue 22. P. 194 — 206.
6. RD5.5104-79 Metodika rascheta bezotkaznosti i dolgovechnosti elementov i dopustimye skorosti potoka morskoi vody [Methodology for calculation of reliability and durability of elements and allowable seawater flow rates].

7. Golub E.S., Shurpyak V.K. Otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia truboprovodov zabortnoi vody soglasno novym dokumentam Registra [Assessment of the technical condition of seawater pipelines according to the new Register documents]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2000. Issue 23. P. 216 — 227.
8. Harlamova A.E., Pokusaev M.N., Trifonov A.V. Analysis of ship accidents caused by unreliable operation of cooling systems of ship power plants. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2023. Vol. 2. P. 30 — 40. DOI 10.24143/2073-1574-2023-2-30-40. EDN QCWWRO. (In Russ.)
9. Shurpyak V.K., Serov A.A. Evaluation of influence of main ship systems on the ship energy efficiency indices. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017. No. 48/49. P. 95 — 103. (In Russ.)
10. Fedorovskii K.Yu., Fedorovskaia N.K. Zamknutyie sistemy okhlazhdeniia sudovykh energeticheskikh ustanovok [Closed-circuit cooling systems for ship power plants]. Moscow: Vuzovskii uchebnik; INFRA-M, 2017. 164 p. (In Russ.)
11. Gorelik B.A., Shurpyak V.K. Hazards identification and risk assessment of ship piping. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2009. Issue 32. P. 156 — 170. (In Russ.)
12. Orlova E.G., Shurpyak V.K. Efficiency assessment of ship cooling systems equipped with box coolers. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2008. Issue 31. P. 245 — 259. (In Russ.)
13. Tkach S., Sviridenko I., Tkach O. Experimental researches of heat emission of outboard cooler in the conditions of free-convective and gas-liquid flow of sea water. *Visnik SevNTU*. 2013. Vol. 137. P. 351 — 354. EDN RBIDIH. (In Russ.)

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 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.5 Общие требования к оформлению материалов.

1.5.1 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.

1.5.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилия, 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. *Neirofiziolgia [Neurophysiology]*. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed on 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

- цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

- краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;

- обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

- использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

- выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация — книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовки, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (kuteynikov.ma@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят процедуру двойного слепого рецензирования. 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/>
<https://cdo.smolgu.ru>

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

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 78

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

Подписано в печать 27.03.2025. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

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