

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФЛОТА НАЛИВНЫХ СУДОВ ДЛЯ СМП

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ
И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ**
ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ



№ 79
ИЮНЬ
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 автоматизации 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 автоматизации 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. Покусав — 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. Il'in — 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
Yurii 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

№ 79

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

Смоленцев С.В., Брыляков А.В., Сенченко В.Г., Буцанец А.А. Структурный анализ системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов через графы состояний. 4

S.V. Smolentsev, A.V. Bryliakov, V.G. Senchenko, A.A. Butsanets Structural analysis of the system of autonomous ship navigation and mooring through state graphs

Реуцкий А.С., Шурпяк В.К., Толмачев С.А. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива 14

A.S. Reutskii, V.K. Shurpyak, S.A. Tolmachev Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

Линник Е.Ю., Суслов А.Н. Перспективы развития флота наливных судов для обеспечения круглогодичной навигации по Северному морскому пути. 26

E.Yu. Linnik, A.N. Suslov Prospects for the development of the tanker fleet for year-round navigation via the Northern Sea Route

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

Чебан Е.Ю., Кожевников Е.Ю., Никущенко Д.В. Оценка параметров волн при движении некоторых тел простой формы в свободном потоке численными методами. 39

E.Yu. Cheban, A.I. Kozhevnikov, D.V. Nikushchenko A study of some simple-shape bodies wave generation during motion in the unrestricted flow

Часовников Н.Ю., Франк М.О. Краткий обзор критериев мореходности и результаты проверки удовлетворения некоторым из них проектами судов АО «ЦМКБ «АЛМАЗ». 52

N.Yu. Chasovnikov, M.O. Frank A brief overview of the seakeeping criteria and the results of checking the satisfaction of some of them by the projects of the vessels of JSC CMDDB ALMAZ

Буров Ю.П. Взаимосвязь элементов и характеристик фидерного контейнерного судна 62

Yu.P. Burov Study of functional dependencies of the main characteristics of a container ship

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Бойко М.С., Тряскин В.Н. Оценка влияния новых данных о морском волнении в Северной Атлантике на долговременное распределение волновых нагрузок на корпус судна 74

M.S. Boyko, V.N. Tryaskin Impact assessment of the new North Atlantic wave data on long-term hull girder wave loads

Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Нуднер И.С., Семенов К.К. Особенности проведения экспериментальных исследований воздействия волн цунами на плавучий объект с якорной системой раскрепления 87

N.D. Belyaev, V.V. Lebedev, I.S. Nudner, K.K. Semenov Features of experimental research of the tsunami waves impact on a floating object with an anchor system

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА
MATERIALS AND WELDING

Ильин А.В., Ларионов А.В. Контроль работы разрушения при испытаниях полнотолщинных образцов падающим грузом 96

A.V. Ilyin, A.V. Larionov Impact energy evaluation with full-thickness specimens at drop-weight tear test

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
DESIGN OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Реуцкий А.С. Суда для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций 112

A.S. Reutskii Ships for construction and maintenance of offshore wind farms

Таровик О.В. Обзор развития теории проектирования судов и обсуждение перспектив создания цифровых проектных решений. 124

O.V. Tarovik Review of the evolution of ship design theory and discussion of the prospects of digital design solutions

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Гулый В.А., Кондратьев В.В. Некоторые предложения по совершенствованию системы парораспределения главного турбоагрегата атомного ледокола проекта 22220 137

V.A. Gulyi, V.V. Kondratiev Some suggestions for improving the steam distribution system of the main turbine unit of the nuclear icebreaker project 22220

Шурпяк В.К., Чугаева А.Е., Березин А.О. Анализ потребления топлива и энергоэффективности на российских морских судах (2019 — 2024) 148

V.K. Shurpyak, A.E. Chugaeva, A.O. Berezin Analysis of energy efficiency and fuel consumption on Russian sea-going ships (2019 — 2024)

ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ
REVIEW OF INTERNATIONAL DOCUMENTS

Грибанькова А.А., Трусов В.И., Агиевич М.А. Анализ требований иностранных классификационных обществ к отливкам из коррозионностойких сталей, применяемых в судостроении 164

A.A. Gribankova, V.I. Trusov, M.A. Agievich Analysis of requirements of foreign classification communities to castings of corrosion-resistant steels used in shipbuilding



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 656.61.052
EDN CQXSLE

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ПРОВОДКИ И ШВАРТОВКИ СУДОВ ЧЕРЕЗ ГРАФЫ СОСТОЯНИЙ

С.В. Смоленцев, д-р техн. наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: SmolencevSV@gumrf.ru

А.В. Брыляков, мл. науч. сотр., Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 Россия, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: brylyakov99@inbox.ru

В.Г. Сенченко, канд. техн. наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 Россия, Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: victor.senchenko@mail.ru

А.А. Буцанец, канд. техн. наук, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru; Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: butsanets.aa@rs-class.org

В данной работе рассматриваются модели состояний системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов и ее ключевого компонента — буксира-автомата. Исследование направлено на анализ функционирования системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов, определение возможных режимов работы и условий переходов между состояниями, а также выявление факторов, влияющих на эффективность выполнения операций в акватории порта. Для формализации логики работы системы и ее компонентов используются графы состояний, описывающие возможные состояния, переходы между ними и внешние воздействия. Особое внимание уделяется интеграции автономных буксиров-автоматов, систем автономной швартовки и других автоматизированных решений в рамках единой системы. Разработанные модели служат инструментом для глубокого понимания внутренних процессов системы, а также позволяют выявить узкие места и потенциальные риски, что создает основу для дальнейшего совершенствования технологий автономного судовождения. Результаты работы соответствуют современным международным трендам и национальной стратегии Российской Федерации в области модернизации морской отрасли.

Ключевые слова: портовые воды, автономное судовождение, дистанционное управление, граф состояний системы.

Для цитирования: Смоленцев С.В. Структурный анализ системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов через графы состояний / С.В. Смоленцев, А.В. Брыляков, В.Г. Сенченко, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 4 — 13. — EDN CQXSLE.

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE SYSTEM OF AUTONOMOUS SHIP NAVIGATION AND MOORING THROUGH STATE GRAPHS

S.V. Smolentsev, DSc, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: SmolencevSV@gumrf.ru

A.V. Bryliakov, Researcher, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924 Russia, Novorossiysk, pr. Lenina, 93, e-mail: bryliakov99@inbox.ru

V.G. Senchenko, PhD, Professor, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924 Russia, Novorossiysk, pr. Lenina, 93, e-mail: victor.senchenko@mail.ru

A.A. Butsanets, PhD, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru; Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: butsanets.aa@rs-class.org

This paper considers the state models of the system of autonomous guiding and mooring of ships and its key component — tugboat-automate. The research aims at analyzing the functioning of the system of autonomous ship navigation and mooring, determining possible modes of operation and conditions of transitions between states, as well as identifying factors affecting the efficiency of operations in the port water area. To formalize the logic of operation of the system and its components, state graphs describing possible states, transitions between them and external influences are used. Special attention is paid to the integration of autonomous tugboats, autonomous mooring systems and other automated solutions within a single system. The developed models serve as a tool for deep understanding of the internal processes of the system, as well as identify bottlenecks and potential risks, which creates a basis for further improvement of autonomous ship navigation technologies. The results of the work correspond to the current international trends and the national strategy of the Russian Federation in the field of maritime industry modernization.

Keywords: harbor waters, autonomous ship navigation, remote control, system state graph.

For citation: Smolentsev S.V., Bryliakov A.V., Senchenko V.G., Butsanets A.A. Structural analysis of the system of autonomous ship navigation and mooring through state graphs. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 4 — 13. EDN CQXSLE. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий автономного судовождения является одним из ключевых направлений модернизации морской отрасли. Это подтверждается как международными трендами, так и национальной стратегией Российской Федерации. В рамках реализации дорожной карты «Маринет» с 2016 г. ведутся активные разработки технических средств для автономного (безэкипажного) судовождения, направленные на внедрение инновационных решений в гражданский флот [1, 2]. Одним из перспективных направлений в данной области является разработка автономных буксиров-автоматов (БА) (рис. 1) [3, 4].

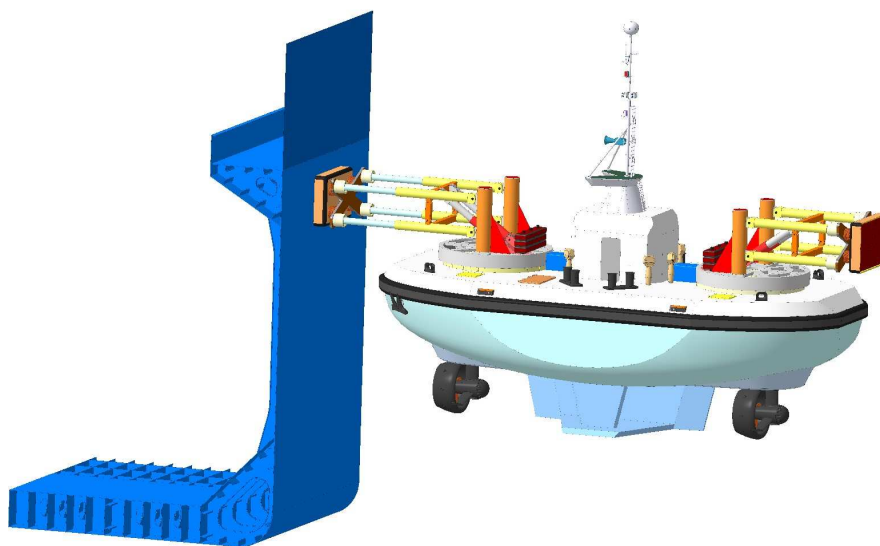


Рис. 1. Концепт применения БА для кантовки грузового судна (патент)

Эти устройства оснащаются современными системами управления, автоматическими поворотными швартовными устройствами (ПШУ) и высокоманевренными пропульсивными комплексами. БА предназначены для выполнения широкого спектра операций, включая сопровождение транспортных судов при заходе/выходе из порта, обеспечение швартовных операций и другие морские операции при необходимости или назначении БА.

В целях автоматизации швартовных операций активно разрабатываются и внедряются системы автономной швартовки (САШ) [5]. Данные системы представляют собой высокотехнологичные решения, предназначенные для автоматизации процессов швартовки судов у причала. Они оснащены механизмами захвата и удержания корпуса судна, которые функционируют без участия человека, что значительно повышает безопасность и сокращает время выполнения операций (рис. 2). САШ интегрируются в общую систему управления портовой инфраструктурой и обеспечивают взаимодействие как с автономными, так и с экипажными судами, гарантируя точность и надежность швартовных операций в различных условиях.

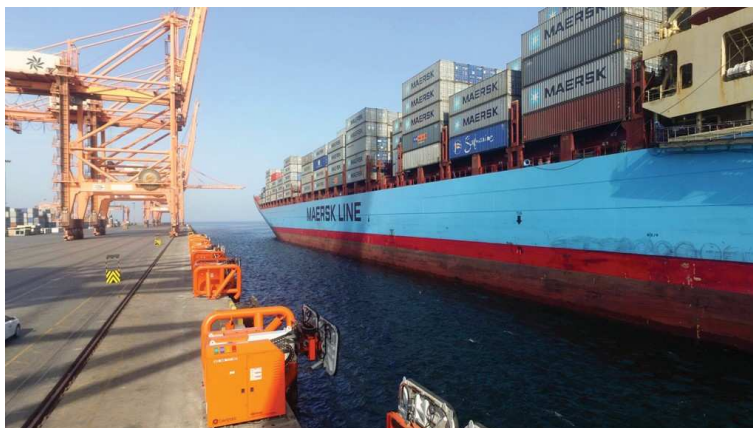


Рис. 2. Система автономной швартовки Cavotec

Комплексный подход к автоматизации операций в акватории порта предполагает объединение автономных буксиров-автоматов (БА), систем автономной швартовки (САШ) и других автоматизированных систем порта в рамках единой системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов (СОАПШ) (рис. 3) [6 — 9].

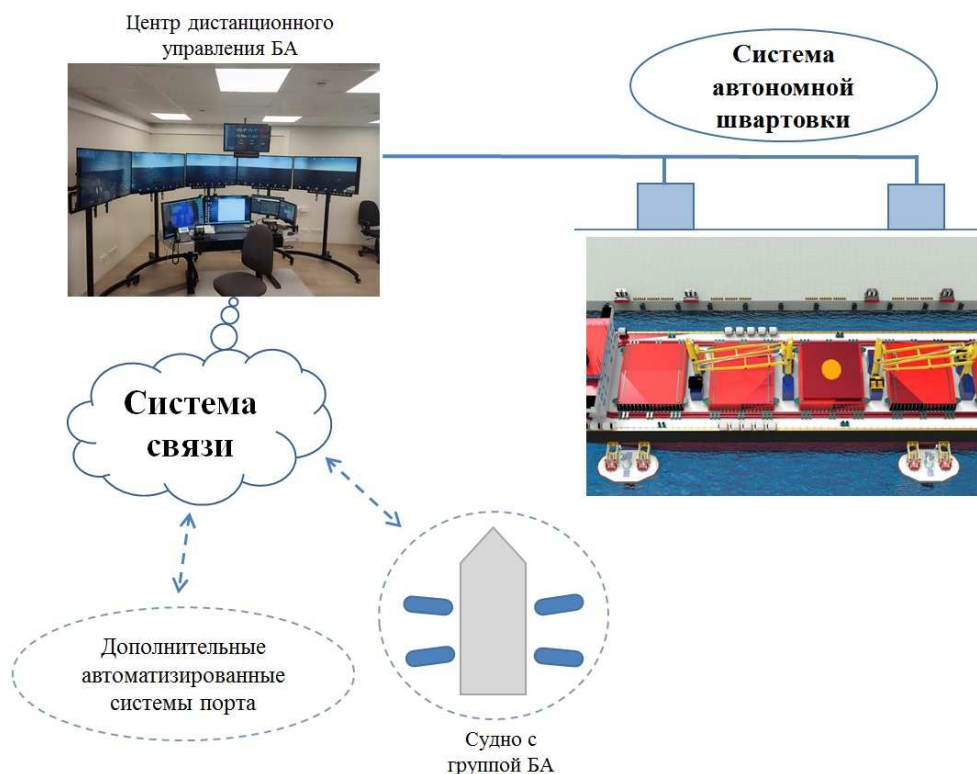


Рис. 3. Пример архитектуры СОАПШ

Такая интеграция позволяет достичь синергетического эффекта, обеспечивая высокий уровень безопасности, надежности и экономической эффективности морских операций.

Однако успешное внедрение таких систем требует детального анализа их функционирования, выявления потенциальных проблем и разработки методов их решения [10, 11].

Графы состояний представляют собой эффективный инструмент для формализации логики работы сложных систем, таких как СОАПШ и ее компоненты. Они позволяют описать возможные состояния системы, условия переходов между ними и внешние факторы, влияющие на ее работу. В контексте проектируемых систем автономного судовождения анализ графов состояний позволяет не только упростить понимание их функционирования, но и выявить ключевые вопросы, которые необходимо решить для успешной опытной эксплуатации и внедрения [12].

Целью данной работы является описание моделей состояний системы обеспечения автономной проводки и швартовки судов (СОАПШ) и ее ключевого компонента — буксира-автомата (БА).

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Построение графа состояний СОАПШ для формализации ее рабочих режимов и условий переходов между ними.

2. Разработка детального графа состояний буксира-автомата, включая его комплексное рабочее состояние и подсостояния, с описанием выполняемых операций.

3. Определение внешних и внутренних факторов, влияющих на изменение состояний системы и ее компонентов.

4. Формализация сценариев выполнения операций буксиром-автоматом в различных условиях, включая стандартные и аварийные ситуации.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Как сама СОАПШ, так и ее отдельные компоненты могут находиться в различных состояниях. Это зависит как от внешних причин: наличие заявок на сопровождение транспортных судов, возможные запреты или ограничения на проведение операций сопровождения транспортных судов от администрации порта, погодные условия, перебои с внешним питанием и т.п., так и от внутренних причин: наличие необходимых ресурсов, техническое состояние компонентов системы и т.п. [6, 9, 11 — 13].

Составим граф состояний СОАПШ, представленный на рис. 4.

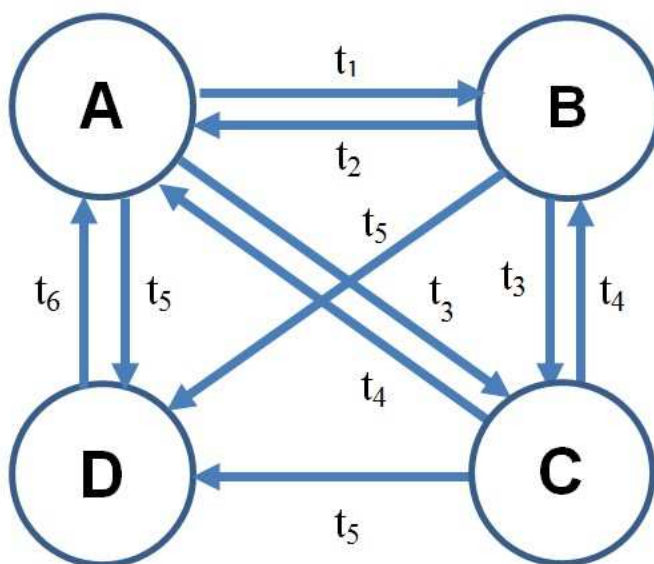


Рис. 4. Граф состояний СОАПШ

Предусмотрены следующие состояния системы:

A — *готовность*: система готова к обработке транспортных судов;

B — *рабочее*: система используется для проведения операции сопровождения или удержания у причала транспортного судна;

C — *простоя*: система не может проводить операции сопровождения транспортных судов вследствие административного запрета, погодных условий или иных ограничений на проведение операций сопровождения в акватории порта, процессы удержания судов у причалов продолжают;

D — *аварийное*: система не может обеспечивать полную функциональность вследствие выхода из строя или некорректной работы ее компонентов. Описанный граф состояний СОАПШ может быть представлен в виде формулы:

$$S_{\text{СОАПШ}} = \{A, B, C, D\}. \quad (1)$$

Между состояниями предусмотрены следующие переходы t_n :

t_1 — *готовность* → *рабочее*: реализуется при получении заявки на сопровождение транспортного судна;

t_2 — *рабочее* → *готовность*: реализуется по завершении операции сопровождения судна на выход из порта при условии, что в данный момент отсутствуют заявки на сопровождение транспортного судна и не производятся операции сопровождения или удержания у причала другого судна;

t_3 — *готовность* → *простоя*, *рабочее* → *простоя*: реализуется при получении информации о временном запрете на проведение операций сопровождения транспортных судов в акватории порта;

t_4 — *простоя* → *готовность*, *простоя* → *рабочее*: реализуется при отмене временного запрета на проведение операций сопровождения транспортных судов в акватории порта, система возвращается в состояние, из которого она до этого попала в состояние простоя;

t_5 — *готовность* → *аварийное*, *рабочее* → *аварийное*, *простоя* → *аварийное*: реализуется в случае выхода из строя или некорректной работы компонентов системы, что приводит к невозможности системы выполнять свои функции;

t_6 — *аварийное* → *готовность*: реализуется в результате устранения причин аварийного состояния системы.

$$T_{\text{СОАПШ}} = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}. \quad (2)$$

Для обеспечения более детального понимания функционирования системы СОАПШ важно рассмотреть не только ее общую модель состояний, но и модели отдельных ключевых компонентов, которые непосредственно влияют на выполнение операций в акватории порта. Одним из таких компонентов является буксир-автомат (БА), который играет центральную роль в реализации задач по сопровождению и швартовке/отшвартовке.

Функционирование буксира-автомата также может быть описано с помощью графа состояний, который учитывает специфику его работы, включая взаимодействие с системой СОАПШ, выполнение различных операций и переходы между состояниями в зависимости от внешних и внутренних факторов [14, 15]. Граф состояний буксира-автомата представлен на рис. 5.

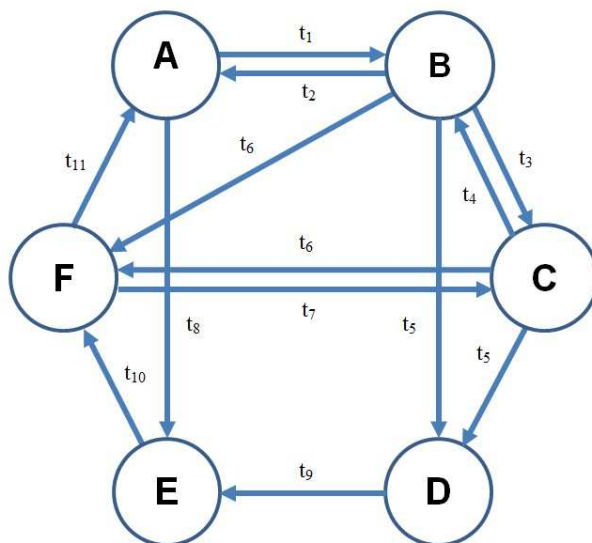


Рис. 5. Граф состояний БА

- A** — *готовность*: БА готов к работе, находится в месте базирования или в месте временной стоянки;
B — *рабочее*: БА участвует в операции в акватории порта;
C — *простоя*: БА приостанавливает свое участие в операции в акватории порта по причине перехода СОАПШ в режим простоя;
D — *аварийное*: БА не может функционировать вследствие выхода из строя или некорректной работы его систем;
E — *восстановление*: проводится ремонт или плановое техническое обслуживание БА в месте базирования или в пункте технического обслуживания;
F — *зарядка*: проводится зарядка батарей БА в месте базирования или в месте временной стоянки.

$$S_{\text{БА}} = \{A, B, C, D, E, F\}. \quad (3)$$

Между состояниями БА предусмотрены следующие переходы:

- t_1 — *готовность* → *рабочее*: реализуется при получении задания на проведение операции из ЦДУ;
 t_2 — *рабочее* → *готовность*: реализуется по выполнении задания и прибытии БА в место базирования или в место временной стоянки;
 t_3 — *рабочее* → *простоя*: реализуется по команде из ЦДУ при переходе СОАПШ в состояние простоя, БА прерывает выполнение задания и прибывает в место базирования или в место временной стоянки;
 t_4 — *простоя* → *рабочее*: реализуется по команде из ЦДУ при переходе СОАПШ в рабочее состояние, БА возвращается к выполнению задания, назначенного ему до перехода в состояние простоя;
 t_5 — *рабочее* → *аварийное*, *простоя* → *аварийное*: реализуется в случае выхода из строя или некорректной работы подсистем или компонентов БА, что приводит к невозможности выполнять свои функции;
 t_6 — *рабочее* → *зарядка*, *простоя* → *зарядка*: реализуется при завершении (или прерывании) выполнения задания и подключении БА к источнику питания для зарядки батареи в месте базирования или в месте временной стоянки;
 t_7 — *зарядка* → *простоя*: при завершении зарядки батареи БА в месте базирования или в месте временной стоянки или по команде из ЦДУ при переходе СОАПШ в рабочее состояние в случае, если БА попал в это состояние из состояния простоя;
 t_8 — *готовность* → *восстановление*: реализуется по команде из ЦДУ для проведения планового технического обслуживания БА в месте базирования или в пункте технического обслуживания;
 t_9 — *аварийное* → *восстановление*: реализуется по прибытии БА в аварийном состоянии в пункт технического обслуживания для ремонта;
 t_{10} — *восстановление* → *зарядка*: реализуется при подключении БА к источнику питания для зарядки батареи в месте базирования по завершении ремонта или технического обслуживания;
 t_{11} — *зарядка* → *готовность*: реализуется при завершении зарядки батареи БА в месте базирования или в месте временной стоянки.

$$T_{\text{БА}} = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}\}. \quad (4)$$

В *рабочем* состоянии БА выполняет задание, полученное из ЦДУ, которое включает в себя отстыковку от причала в месте базирования или временной стоянки, движение по акватории порта до места начала выполнения указанной в задании операции, выполнение самой операции, движение по акватории порта от места завершения выполнения операции до места базирования или места временной стоянки, стыковку с причалом [9].

Рабочее состояние БА является комплексным [14, 16 — 18]. В свою очередь, оно может быть представлено графом состояний, показанным на рис. 6.

- B1** — отстыковка и отход от причала в месте базирования или месте временной стоянки;
B2 — движение БА по акватории порта от места базирования или от места временной стоянки к объекту;
B3 — стыковка БА к объекту посредством жесткой сцепки, формирование ордера;
B4 — проводка объекта по акватории в составе ордера;
B5 — маневрирование в составе ордера в районе причала;
B6 — обеспечение подхода судна к причалу;
B7 — обеспечение отхода судна от причала;
B8 — буксировка БА в аварийном состоянии;
B9 — отстыковка от объекта;
B10 — движение БА по акватории порта от объекта к месту базирования или к месту временной стоянки;
B11 — подход и стыковка к причалу в месте базирования или в месте временной стоянки.

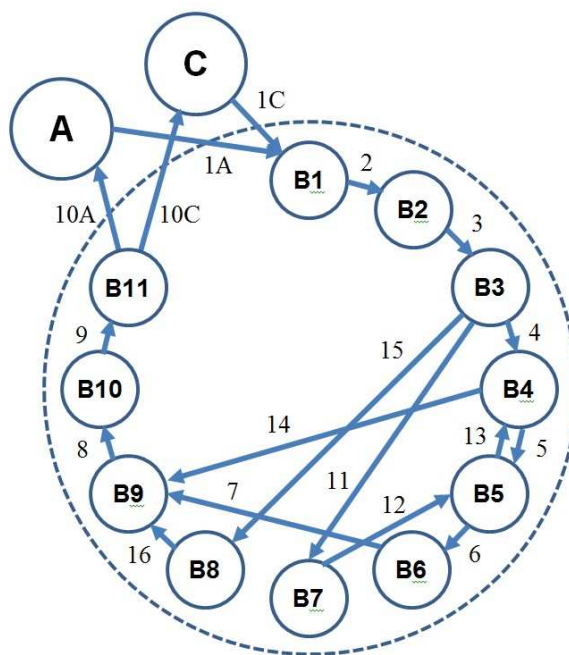


Рис. 6. Граф состояний внутри рабочего состояния БА

Граф состояний внутри рабочего состояния БА может быть представлен в виде:

$$V_{\text{БА}} = \{B1, B2, \dots, B11\}.$$

(5)

Между состояниями предусмотрены следующие переходы:

1A — $A \rightarrow B1$: реализуется при назначении задания на проведение операции из ЦДУ, БА переходит в *рабочее* состояние, начинает отстыковку и отход от причала в месте базирования или в месте временной стоянки;

1C — $C \rightarrow B1$: реализуется при получении команды из ЦДУ на продолжение выполнения задания при переходе СОАПШ в *рабочее* состояние, БА переходит в *рабочее* состояние, начинает отстыковку и отход от причала в месте базирования или в месте временной стоянки;

2 — $B1 \rightarrow B2$: реализуется после отхода БА от причала в месте базирования или в месте временной стоянки, БА начинает движение к объекту;

3 — $B2 \rightarrow B3$: реализуется при подходе БА к объекту, БА начинает стыковку к объекту посредством жесткой сцепки;

4 — $B3 \rightarrow B4$: реализуется по завершении процесса стыковки БА к объекту, БА в составе ордера начинает обеспечивать движение судна по акватории порта;

5 — $B4 \rightarrow B5$: реализуется после прихода ордера в зону подхода к причалу (ЗПП), БА в составе ордера обеспечивает маневрирование судна в районе причала;

6 — $B5 \rightarrow B6$: реализуется по завершении процесса маневрирования судна в районе причала, БА в составе ордера начинает обеспечивать подход судна к причалу;

7 — $B6 \rightarrow B9$: реализуется после завершения процесса швартовки судна, БА начинает отстыковку от судна;

8 — $B9 \rightarrow B10$: реализуется после отстыковки БА от объекта, БА начинает движение по акватории порта к месту базирования или к месту временной стоянки;

9 — $B10 \rightarrow B11$: реализуется при подходе БА к месту базирования или к месту временной стоянки, БА начинает процесс подхода к причалу и стыковки к нему;

10A — $B11 \rightarrow A$: реализуется после стыковки БА к причалу в месте базирования или месте временной стоянки, БА переходит в состояние *готовности*;

10C — $B11 \rightarrow C$: реализуется после стыковки БА к причалу в месте базирования или в месте временной стоянки при условии прерывания операции сопровождения по команде из ЦДУ, БА переходит в состояние *простоя*;

11 — $B3 \rightarrow B7$: реализуется по завершении процесса стыковки БА к объекту и отшвартовки судна, БА в составе ордера начинает обеспечивать отход судна от причала;

12 — **B7** → **B5**: реализуется по завершении отхода судна от причала, БА в составе ордера начинает обеспечивать маневрирование судна в районе причала;

13 — **B5** → **B4**: реализуется по завершении маневрирования судна в районе причала, БА в составе ордера начинает обеспечивать движение судна по акватории порта;

14 — **B4** → **B9**: реализуется после завершения процесса сопровождения судна в заданный район, БА начинает отстыковку от судна;

15 — **B3** → **B4**: реализуется по завершении процесса стыковки БА к аварийному БА, БА начинает буксировку аварийного БА к пункту технического обслуживания;

16 — **B6** → **B9**: реализуется после завершения процесса приема аварийного БА в пункте технического обслуживания, БА начинает отстыковку от аварийного БА.

Вышеизложенные переходы состояний внутри рабочего состояния БА могут быть записаны в виде формулы:

$$E_{\text{БА}} = \{(A, B1), (C, B1), (B1, B2), (B2, B3), (B3, B4), \dots, (B11, A), (B11, C)\}. \quad (6)$$

БА может принимать участие в следующих операциях:

- сопровождение транспортного судна при заходе в порт и швартовке к причалу:

$$B1 \rightarrow B2 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow B5 \rightarrow B6 \rightarrow B9 \rightarrow B10 \rightarrow B11;$$

- сопровождение транспортного судна при отшвартовке от причала и выходе из порта:

$$B1 \rightarrow B2 \rightarrow B3 \rightarrow B7 \rightarrow B5 \rightarrow B4 \rightarrow B9 \rightarrow B10 \rightarrow B11;$$

- сопровождение транспортного судна при перешвартовке между причалами:

$$B1 \rightarrow B2 \rightarrow B3 \rightarrow B7 \rightarrow B5 \rightarrow B4 \rightarrow B5 \rightarrow B6 \rightarrow B9 \rightarrow B10 \rightarrow B11;$$

- оказание помощи аварийному транспортному судну:

$$B1 \rightarrow B2 \rightarrow B3 \rightarrow B4 \rightarrow B9 \rightarrow B10 \rightarrow B11;$$

- оказание помощи БА, находящемуся в аварийном состоянии:

$$B1 \rightarrow B2 \rightarrow B3 \rightarrow B8 \rightarrow B9 \rightarrow B10 \rightarrow B11.$$

Таким образом, БА выполняет широкий спектр операций в акватории порта, начиная от отстыковки от причала и заканчивая стыковкой после завершения задания. Его рабочее состояние включает подсостояния, связанные с движением, стыковкой, сопровождением судов, маневрированием у причала и буксировкой в аварийных ситуациях. Переходы между состояниями четко регламентированы и зависят от команд ЦДУ, завершения этапов операций или внештатных ситуаций. Граф состояний БА позволяет формализовать логику его работы и описать все возможные сценарии выполнения задач, что обеспечивает надежность и эффективность функционирования системы СОАПШ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования достигнуты следующие ключевые результаты.

1. Описан граф СОАПШ, который включает четыре основных состояния: «готовность», «рабочее», «простой» и «аварийное». Для каждого состояния определены условия переходов между ними, что позволяет формализовать логику работы системы и учесть влияние как внешних факторов (например, погодные условия, заявки на сопровождение судов, административные запреты), так и внутренних (техническое состояние компонентов, наличие ресурсов).

2. Разработан детальный граф состояний буксира-автомата, включающий шесть основных состояний: «готовность», «рабочее», «простой», «аварийное», «восстановление» и «зарядка». Особое внимание уделено комплексному рабочему состоянию БА, которое включает подсостояния, связанные с выполнением операций (например, отстыковка от причала, движение к объекту, стыковка с судном, маневрирование в составе ордера). Это позволило описать все этапы выполнения операций буксиром-автоматом.

3. Описаны сценарии выполнения операций буксиром-автоматом в различных условиях, включая стандартные и аварийные ситуации. Учтены такие операции, как сопровождение транспортного судна при

заходе/выходе из порта, помощь аварийным судам, обеспечение швартовки/отшвартовки и перешвартовка между причалами. Это позволяет улучшить понимание функциональности БА и его взаимодействия с системой СОАПШ.

4. Разработанные модели состояний и графы переходов служат основой для анализа функционирования СОАПШ и ее компонентов. Это создает предпосылки для успешной опытной эксплуатации и внедрения технологий автономного судовождения, что соответствует современным международным трендам [19 — 22] и национальной стратегии Российской Федерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

В данной статье представлена часть научно-исследовательской работы по теме «Разработка концепции использования буксиров-автоматов (автономных судов) в морских портах». Заказчик — Министерство транспорта Российской Федерации, исполнитель — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», государственный контракт от 01.07.2024 № 1142414.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. План мероприятий («Дорожная карта») «МариНет» Национальной технологической инициативы. [Электронный ресурс] URL: https://nti2035.ru/markets/docs/DK_marinet.pdf (дата обращения 26.11.2024).
2. Пинский А.С. Е-Навигация и безэкипажное судовождение / А.С. Пинский // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 4 (65). — С. 50 — 54. — EDN WMAHYT.
3. Патент на полезную модель № 222507 U1 Российская Федерация, МПК В63В 3/00. Корпус судна-буксира: № 2023128879: заявл. 07.11.2023: опубл. 29.12.2023 / В.Г. Сенченко, А.Б. Крючков, В.В. Заслонов; заявитель ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова». — EDN TJCDAW.
4. Биденко С.И. О концептуальном облике буксира-автомата для работы в буксирном ордере или «стае» / С.И. Биденко, В.Г. Сенченко, А.Б. Васильев // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2021. — № 1-1. — DOI 10.52899/978-5-88303-611-7_170. — EDN MQZWRV.
5. Патент № 2808875 C1 Российская Федерация, МПК В63В 21/00. Швартовый захватный модуль (варианты): № 2023109206: заявл. 11.04.2023: опубл. 05.12.2023 / В.Г. Сенченко, А.Б. Крючков, В.В. Заслонов, Д.А. Крючков; заявитель ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова». — EDN OJRYES.
6. Приказ Минтранса России от 30.11.2017 № 503 «Об утверждении Обязательных постановлений в морском порту Новороссийск».
7. Алексеев Г.М. Особые случаи морской практики: уч. пос. / Г.М. Алексеев. — М.: Морской транспорт, 1959. — 338 с.
8. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel / A. Golovina // SHS Web of Conferences. — 2022. — Vol. 134. — P. 00114. — DOI 10.1051/shsconf/202213400114. — EDN WPEUCZ.
9. Патент № 2809129 C1 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04, G05D 1/08, G08G 3/00. Способ проводки, швартовки и отшвартовки морского грузового судна в автономном режиме и способ работы цифровой инструментальной платформы управления движением группы автономных судов-буксиров в портовой акватории: № 2023102499: заявл. 03.02.2023: опубл. 07.12.2023 / В.Г. Сенченко, М.А. Лопатин, Д.Е. Студеникин; заявитель ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова». — EDN IEUNZK.
10. Епихин А.И. Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А.И. Епихин, М.А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 3-1 (53). — С. 77 — 82. — DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010.
11. Студеникин Д.Е. Динамическое формирование коридора безопасности при планировании маршрута движения судна / Д.Е. Студеникин, С.И. Кондратьев, Е.В. Хекерт, М.А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2-4 (52). — С. 128 — 131. — DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.081.
12. Лопатина В.В. Методика проведения измерений геометрических перемещений подвижного объекта / В.В. Лопатина, В.Г. Сенченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4-4 (50). — С. 62 — 66. — DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.098.
13. Заслонов В.В. Определение параметров группы азимутальных буксиров-автоматов при выполнении буксировочных работ / В.В. Заслонов, С.С. Жук, Я.В. Бурьлин // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 4-1 (66). — С. 214 — 224. — DOI 10.37220/MIT.2024.66.4.025. — EDN EZZHBK.
14. Hensen H. Tug use in port. A practical guide. 2nd ed. / H. Hensen. — Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. — 192 p.
15. Заслонов В.В. Метод группового движения морских подвижных объектов / В.В. Заслонов, С.Н. Стуконог // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 2 (111). — С. 76 — 84. — DOI 10.34046/aumsuomt111/13. — EDN OVAQNS.
16. Управление автономным подруливающим устройством / Я.В. Бурьлин, А.Н. Попов, С.И. Кондратьев, Боран-Кешишьян А.Л. и др. // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 4-2 (66). — С. 114 — 120. — DOI 10.37220/MIT.2024.66A.066. — EDN WYKCM.
17. Бурьлин Я.В. Идентификация нелинейной модели движения судна и адаптивное управление по траектории: дисс. ... канд. техн. наук / Я.В. Бурьлин; ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова. Новороссийск, 2018. — 132 с. — EDN IJTRJA.
18. Burylin I.V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes / I.V. Burylin // Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021. — Vol. 2061 (1). — P. 012074. — DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012074. — EDN FWSZAF.

19. Головина А.А. Законодательное закрепление уровней автономности морских автономных надводных судов / А. А. Головина // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. — 2024. — № 4 (49). — С. 59 — 63. — EDN YQJUTU.
20. Айзинов С.Д. Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С.Д. Айзинов, А.А. Буцанец, С.В. Смоленцев, В.Г. Сенченко и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83 — 96. — EDN HNHFAA.
21. Karetnikov V. Simulation of maneuvering trials of an unmanned or autonomous surface ship on a navigation simulator / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 130 LNCE. — P. 146-156. — DOI 10.1007/978-981-33-6208-6_15. — EDN JJVLQH.
22. Karetnikov V. Development of methods for maneuvering trials of autonomous ships in test water area / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2021. — Vol. 130 LNCE. — P. 503 — 508. — DOI 10.1007/978-981-33-6208-6_5. — EDN PHCRQD.

REFERENCES

1. Plan meropriyatiy («Dorozhnaya karta») «MariNet» Natsionalnoi tekhnologicheskoi initsiativy [Plan of action (Roadmap) “MariNet” of the National Technological Initiative]. URL: https://nti2035.ru/markets/docs/DK_marinet.pdf (accessed 26.11.2024).
2. Pinskiy A.S. E-Navigatsiya i bezekipazhnoe sudovozhdenie [E-navigation and unmanned navigation]. *Transport Rossiiskoi Federatsii [Transport of the Russian Federation]*. 2016. No. 4 (65). P. 50 — 54. EDN WMAHYT.
3. Utility Model Patent No. 222507 U1 Russian Federation, IPC B63H 25/04, G05D 1/08, G08G 3/00. The hull of the tugboat: No. 2023128879: application 07.11.2023: published 29.12.2023 / Senchenko V.G., Kryuchkov A.B., Zaslono V.V.; applicant FGBOU VO Admiral F.F. Ushakov State Maritime University. EDN TJCDAW.
4. Bidenko S.I., Senchenko V.G., Vasil'ev A.B. O kontseptual'nom oblike buksira-avtomata dlya raboty v buksirnom ordine ili "stae" [On the conceptual appearance of an automatic tugboat for operation in a tow warrant or "flock"]. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta. [Science Week of St. Petersburg State Marine Technical University]*. 2021. No. 1-1. DOI 10.52899/978-5-88303-611-7_170. EDN MQZWRV.
5. Patent No. 2808875 C1 Russian Federation, MPK B63B 21/00 No. 2023109206. Mooring gripping module (variants): application 11.04.2023: published 05.12.2023 / V.G. Senchenko, A.B. Kryuchkov, V.V. Zaslono V.V., D.A. Kryuchkov; applicant FGBOU VO Admiral F. F. Ushakov State Maritime University. EDN OJRYES.
6. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated November 30, 2017 N 503 "On approval of Mandatory regulations in the seaport of Novorossiysk".
7. Alekseev G.M. Osobyie sluchai morskoi praktiki [Special cases of maritime practice: study guide]. Moscow: Morskoi transport, 1959. 338 p.
8. Golovina A. On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel. *SHS Web of Conferences*. 2022. Vol. 134. P. 00114. DOI 10.1051/shsconf/202213400114. EDN WPEUCZ.
9. Patent No. 2809129 C1 Russian Federation, IPC B63H 25/04, G05D 1/08, G08G 3/00. The method of wiring, mooring and unmooring a marine cargo vessel in autonomous mode and the method of operation of the digital instrument platform for controlling the movement of a group of autonomous tugboats in the port area: No. 2023102499: application 02/03/2023: published 12/07/2023 / V.G. Senchenko, M.A. Lopatin, D.E. Studenikin; applicant FGBOU VO Admiral F.F. Ushakov State Maritime University. EDN IEUNZK.
10. Epikhin A.I., Modina M.A. Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses. *Marine intellectual technologies*. 2021. No. 3-1 (53). P. 77 — 82. DOI 10.37220/MIT.2021.53.3.010. (In Russ.)
11. Studenikin D.E., Kondratiev S.I., Heckert E.V., Modina M.A. Dynamic formation of a safety corridor during preliminary vessel route planning. *Marine intellectual technologies*. 2021. No. 2-4 (52). P. 128 — 131. DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.081. (In Russ.)
12. Lopatina V.V., Senchenko V.G. Methodic of measuring of geometric displacements of a moving object. *Marine intellectual technologies*. 2020. No. 4-4 (50). P. 62 — 66. DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.098. (In Russ.)
13. Zaslono V.V., Zhuk S.S., Burylin Ya.V. Determination of parameters of a group of azimuthal automatic tugboats during towing operations. *Marine intellectual technologies*. 2024. No. 4-1 (66). P. 214 — 224. DOI 10.37220/MIT.2024.66.4.025. EDN EZZHBK. (In Russ.)
14. Hensen H. Tug use in port. A practical guide. 2nd ed. Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. 192 p.
15. Zaslono V.V., Stukonog S.N. The method of group movement of marine mobile objects. *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Operation of marine transport]*. 2024. No. 2 (111). P. 76 — 84. DOI 10.34046/aumsuomt111/13. EDN OVAQNS. (In Russ.)
16. Burylin Ya.V., Popov A.N., Kondratiev S.I., Boran-Keshishyan A.L. et al. Autonomous thruster control. *Marine intellectual technologies*. 2024. No. 4-2 (66). P. 114 — 120. DOI 10.37220/MIT.2024.66A.066. EDN WYKCM. (In Russ.)
17. Burylin Ya.V. Identifikatsiya nelineinoy modeli dvizheniya sudna i adaptivnoye upravlenie po traektorii [Identification of a nonlinear model of ship movement and adaptive trajectory control: PhD thesis] / Admiral F.F. Ushakov State Maritime University. Novorossiysk, 2018. 132 p. EDN IJTRJA.
18. Burylin I.V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021*. Vol. 2061 (1). P. 012074. DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012074. EDN FWSZAF.
19. Golovina A.A. Zakonodatel'noe zakreplenie urovnei avtonomnosti morskikh avtonomnykh nadvodnykh sudov [Legislative consolidation of the levels of autonomy of marine autonomous surface vessels]. *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova [Bulletin of the Admiral F.F. Ushakov State Maritime University]*. 2024. No. 4 (49). P. 59 — 63. EDN YQJUTU.
20. Aysinov S.D., Butsanets A.A., Smolentsev S.V., Senchenko V.G. et al. 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. EDN HNHFAA. (In Russ.)
21. Karetnikov V., Ol'khovik E., Butsanets A., Ivanova A. Simulation of maneuvering trials of an unmanned or autonomous surface ship on a navigation simulator. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 130 LNCE. P. 146 — 156. DOI 10.1007/978-981-33-6208-6_15. EDN JJVLQH.
22. Karetnikov V., Ol'khovik E., Butsanets A., Ivanova A. Development of methods for maneuvering trials of autonomous ships in test water. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 130 LNCE. P. 503 — 508. DOI 10.1007/978-981-33-6208-6_5. EDN PHCRQD.

УДК 62-61 + 504.03
EDN FBBBJV

АНАЛИЗ ПОЛОЖЕНИЙ РУКОВОДЯЩИХ ПРИНЦИПОВ ИМО ПО ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЛЯ ВСЕХ ВИДОВ СУДОВОГО ТОПЛИВА

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

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

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

В работе рассматривается нормативная база ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов (ПГ) на протяжении жизненного цикла для различных видов судового топлива, в том числе биотоплива, в целях снижения показателя эксплуатационной углеродоемкости судна СП. Целью исследования является анализ положений этих документов, главным образом Руководства ИМО по оценке интенсивности выбросов ПГ на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива, существующих и разрабатываемых требований конвенции МАРПОЛ и других связанных документов, которые будут определять основные направления развития не только международного судоходства, но и судостроительной науки и техники в ближайшие годы и десятилетия. Задачей исследования стало определение основных принципов учета выбросов парниковых газов от судовых топлив, выявление критериев экологичности судового топлива, порядка учета выбросов парниковых газов при использовании судового топлива на всем жизненном цикле в целях реализации соответствующих требований МАРПОЛ.

Ключевые слова: сокращение выбросов парниковых газов с судов, эксплуатационная углеродоемкость, чистые нулевые выбросы, жизненный цикл интенсивности выбросов парниковых газов, альтернативные виды судового топлива, биотоплива.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А.С. Реуцкий, В.К. Шурпьяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14 — 25. — EDN FBBBJV.

ANALYSIS OF THE IMO GUIDELINES FOR ESTIMATING THE INTENSITY OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS OVER THE LIFE CYCLE FOR ALL TYPES OF MARINE FUELS

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

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

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

The paper examines the IMO regulatory framework for the assessment of GHG intensity over the life cycle for various types of marine fuels, including biofuels, in order to reduce the operational carbon intensity indicator of a ship. The purpose of the study is to analyze the provisions of these documents, mainly the 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (2024 LCA Guidelines), existing and upcoming MARPOL requirements and other related documents which will determine the main directions of development not only of international shipping, but also of shipbuilding science and technology in the coming years and decades. The objective of the study was to determine the basic principles of accounting for greenhouse gas emissions from marine fuels, to identify criteria for the sustainability of marine fuels, to set procedures for GHG life cycle assessment of marine fuels as part of implementation of the relevant MARPOL requirements.

Keywords: reduction of greenhouse gas emissions from ships, operational carbon intensity, net zero emissions, lifecycle intensity of greenhouse gas emissions, alternative marine fuels, biofuels.

For citation: Reutskii A.S., Shurpyak V.K., Tolmachev S.A. Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 14 — 25. EDN FBBBJV. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Долгое время главной проблемой при использовании углеводородных топлив из ископаемого сырья считалась ограниченность запасов нефти и газа в недрах нашей планеты. Сторонники развития альтернативных видов энергетики в семидесятых годах прошлого века задавали модные тогда вопросы: что человечество будет делать, когда углеводороды в земле закончатся? Что будет после «века нефти»? Хотя уже в те годы экологи указывали на растущие проблемы, их «успокаивали» тем, что не стоит беспокоиться о выбросах в атмосферу, так как «нефти осталось на 20 лет», сокращение запасов приведет к сокращению добычи, росту цен на топливо и «естественному» сокращению его потребления. Когда один из авторов, будучи студентом, задал преподавателю вопрос: «Что будем делать через двадцать лет, когда нефть закончится?» — то получил ответ, что за 20 лет до того, когда преподаватель в свою очередь задал этот вопрос, запасы нефти тоже оценивались «на 20 лет». После этого прошло уже 40 лет активного использования недр нашей планеты, но и сейчас разведанные запасы при сохранении существующего уровня потребления оцениваются в 50 лет, а неразведанных запасов, возможно, еще на 80 лет [1]. То есть так же, как каменный век закончился не потому, что закончились камни, так и «век нефти» закончится не из-за истощения недр, а в результате появления более привлекательной альтернативы и решения накопленных за долгие годы нерешенных проблем.

Главная проблема использования топлива нефтяного происхождения заключается в том, что его сжигание приводит к значительному загрязнению атмосферы. Классические загрязнители, возникающие при сжигании нефтяного топлива (окислы азота (NO_x) и серы (SO_x), твердые частицы), ухудшают качество воздуха и оказывают вредное влияние на здоровье человека. В отличие от них углекислый газ (CO_2), являясь основным компонентом выбросов в атмосферу, представляет собой другую проблему. Так как CO_2 не вреден для здоровья, его выбросы долгое время на судах не ограничивались. Но когда парниковый эффект был определен как главный виновник нежелательных климатических изменений, Международная морская организация (ИМО) разработала целый ряд ограничений, связанных с необходимостью повышения энергоэффективности морских судов. Углекислый газ является конечным продуктом сгорания любого топлива, содержащего углерод. Поэтому его выбросы не могут быть снижены с помощью какого-либо каталитического нейтрализатора или системы фильтрации, что оказалось очень эффективным для улавливания NO_x и SO_x . Системы улавливания, хранения и утилизации CO_2 на борту судна дороги в эксплуатации и связаны с многочисленными дополнительными опасностями, нормативная база для таких систем в настоящее время отсутствует. Таким образом, для сокращения выбросов CO_2 с судов остаются две возможности: уменьшить расход топлива или использовать альтернативные виды топлива. Одной из таких альтернатив, в том числе для морской отрасли, может стать биотопливо, применение которого может решить многие проблемы, связанные с экологией и декарбонизацией.

Многие государства, не обладая развитой ресурсной энергетической базой и желая обрести независимость от богатых ископаемыми источниками энергии стран, в собственных интересах ведут активную работу по созданию новых или изменению действующих нормативных инструментов, имеющих целью полную декарбонизацию судоходной отрасли. Под декарбонизацией в контексте данной статьи подразумевается реагирование судоходной отрасли на изменение климата, в том числе путем отказа от ископаемого углеводородсодержащего топлива в пользу экологически чистых источников энергии или биотоплива.

Однако становится все более очевидным тот факт, что биотопливо не является полностью безвредным для окружающей среды, так как интенсивное сельское хозяйство с использованием большого количества удобрений требует значительных энергетических затрат. Для того чтобы учесть реальные выбросы в атмосферу, возникающие при потреблении биотоплива, а не только при его сжигании, необходимо учитывать потребление энергии и производить оценку выбросов CO_2 за весь жизненный цикл топлива. Поэтому ИМО приступила к разработке Руководства по учету выбросов парниковых газов (далее — ПГ) на протяжении жизненного цикла судового топлива. В октябре 2025 г. предполагается принятие пересмотренного Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ с новыми требованиями в отношении интенсивности топливных выбросов ПГ (ИТВПГ/GFI). Проект соответствующих поправок к МАРПОЛ в настоящее время рассматривается, и эти требования, в случае их принятия, вступят в силу 1 марта 2027 г. Целью настоящей статьи является анализ положений этого документа, так как выработанные в нем решения, возможно, будут определять основные направления развития не только международного судоходства, но и судостроительной науки и техники в ближайшие годы и десятилетия.

1. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУДОВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УГЛЕРОДОЕМКОСТИ

В настоящее время биотопливо рассматривается как углеродно-нейтральное топливо, то есть условно считается, что при его сжигании не производится выбросов CO_2 в атмосферу, что фактически, конечно, неверно. Углекислый газ, который выбрасывается в атмосферу при сжигании биотоплива, был ранее выделен из атмосферы в процессе фотосинтеза во время роста растений, использованных для производства биотоплива. Таким образом, при использовании биотоплива, в отличие от ископаемых видов топлива, имеет место рециркуляция углекислого газа.

В настоящий момент для поддержания выполнения стратегии ИМО по сокращению выбросов ПГ с судов [2] принимаются так называемые среднесрочные меры, состоящие из пакета технических и рыночных инструментов, направленных на сокращение выбросов судоходной отрасли в обозначенный срок. При этом для достижения запланированного «чистого нулевого выброса парниковых газов около 2050 года» требуется прохождение контрольных точек в 2030 и 2040 гг., когда должно быть достигнуто снижение количества выбросов ПГ с судов на $\approx 20 - 30\%$ и на $\approx 70 - 80\%$ соответственно от уровня выбросов 2008 г. Как указано в исследовании [3], техническая часть этих мер будет содержать в себе ужесточающиеся с течением времени нормы содержания ПГ в выбросах в атмосферу с судов (посредством регулирования интенсивности парниковых газов в судовом топливе), а также рыночные инструменты (рис. 1). В рамках ИМО была достигнута договоренность между государствами о целесообразности введения рыночного инструмента по регулированию выбросов с судов — механизма установления цен на выбросы ПГ [4], напрямую связанного с определением количества выбросов ПГ в атмосферу, произведенных в результате всего жизненного цикла судового топлива. При этом широкое распространение получил новый для ИМО термин *sustainability*, который широко применяется в новых документах ИМО, оценивающих выбросы в течение жизненного цикла топлива. Термин *sustainability* употребляется как характеристика способности той или иной области деятельности человека (в данном случае производства судового топлива) к устойчивому развитию без ущерба для будущего потребления и дальнейшего использования природных ресурсов, то есть характеризует экологически рациональное развитие, обеспечивающее учет будущих потребностей. Наиболее корректным смысловым переводом термина *sustainability* на русский язык, по мнению авторов, является термин «экологичность», хотя в последнее время довольно часто встречается ошибочный перевод словом «устойчивость».

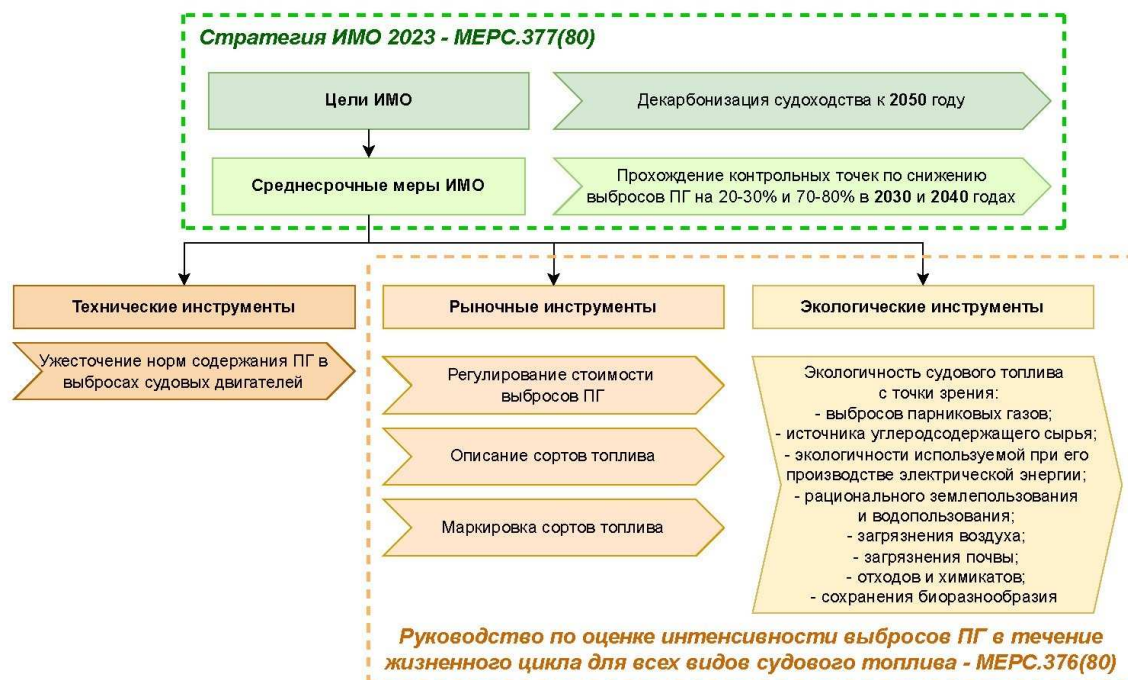


Рис. 1. Инструменты достижения среднесрочных целей ИМО по декарбонизации судоходной отрасли

Важнейшим элементом действующих требований МАРПОЛ по эксплуатационной углеродоемкости и перспективных требований в отношении интенсивности топливных выбросов парниковых газов является механизм определения содержания парниковых газов в топливе в эквиваленте CO_2 . Так, действующее в настоящий момент Руководство 2022 г. по показателям эксплуатационной углеродоемкости и методам их расчета [5] предусматривает использование для каждого вида судового топлива переводного коэффициента углеродоемкости C_{Fj} (отношение массы топлива к массе выброшенных при его использовании ПГ в граммах CO_2 -экв.). Процедура нахождения массы выбросов от определенного вида топлива j сводится к произведению массы потраченного за отчетный период топлива j на характерный для этого топлива переводной коэффициент C_{Fj} , взятый из таблицы 2.2.1 Руководства 2018 г. по методу вычисления фактического конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ) для новых судов (Резолюция МЕРС.308(73)).

Долгое время номенклатура топлив, для которых был определен и зафиксирован в документах ИМО переводной коэффициент C_F , была ограничена жидкими нефтяными топливами, производимыми в соответствии со стандартом ISO 8217, а также некоторыми альтернативными видами топлива — сжиженными природным и нефтяным газом, спиртовыми топливами, упомянутыми в Руководстве по расчету ККЭЭ [6]. Однако обновленная в 2024 г. версия этого стандарта допускает использование судового топлива, образованного путем смешивания его составляющих, произведенных из различного сырья, полученного из возобновляемых и/или ископаемых источников. Также стандартом [7] допускается содержание в судовом топливе до 100 % составляющих, полученных из биологического сырья, появилась возможность производить топливо путем смешивания его компонентов в различных пропорциях, в связи с чем процесс определения CO_2 -эквивалента для отдельных видов топлива серьезно усложнился.

Упомянутый стандарт придерживается прежней системы маркировки топлива, что, с одной стороны, не позволяет конечному потребителю получать информацию о смесевом составе закупаемого топлива, а с другой стороны, затрудняет процесс определения его углеродоемкости, так как у одного и того же вида исходного сырья могут быть различные происхождение и процесс производства. Получающиеся в результате новые сорта (смеси различных видов) топлива будут иметь разную энергетическую ценность (здесь — низшую теплоту сгорания, МДж/г топл.) и, если учитывать выбросы CO_2 за весь жизненный цикл, разную интенсивность выбросов (г CO_2 -экв./г топл.) и коэффициент углеродоемкости C_F . Эти величины необходимо будет верифицировать для каждого производителя топлива.

В целях подтверждения качества и верификации свойств топлива Руководством по оценке интенсивности выбросов ПГ на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива (далее — Руководство) [8] предполагается ввести систему сертификации судовых топлив, учитывающую не только физические характеристики источника сырья, использованного для производства топлива, но и степень влияния способа его добычи, выращивания, переработки и транспортировки на окружающую среду — атмосферу, почву, водные ресурсы и т.д.

Таким образом, одним из главных инструментов ИМО, который отвечает новой стратегии, является Руководство — новый документ ИМО, в данный момент имеющий рекомендательный статус и представляющий собой совокупность механизмов определения интенсивности выбросов ПГ в атмосферу от различных видов судового топлива применительно ко всему их жизненному циклу, а также описания процесса сертификации.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТА РУКОВОДСТВА ПО УЧЕТУ ВЫБРОСОВ ПГ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУДОВОГО ТОПЛИВА

Согласно Руководству, выбросы парниковых газов должны включаться в специальные национальные кадастры парниковых газов. Однако в соответствии с п. 3.5 руководящих принципов МГЭИК [9] международное судоходство относится к категории «Мобильные источники выбросов», поэтому выбросы от судового топлива, используемого в международных перевозках, в них не учитываются. При этом в принятой ИМО Стратегии 2023 года по сокращению выбросов парниковых газов с судов [2] при реализации планов по сокращению выбросов предписано учитывать все выбросы ПГ, которые были зафиксированы за весь жизненный цикл топлива и других энергоносителей (электроэнергии), используемых на борту судна от момента добычи до конечного использования на судне.

Действующая в настоящее время методология ИМО по определению показателей эксплуатационной углеродоемкости [5], подробно исследованная в статьях [10, 11], предполагает учет только выбросов при непосредственном использовании топлива на судне (этап «от танка до кильватера» — Tank to Wake (TtW)).

Углеродный след при добыче и транспортировке сырья и производстве топлива (этап «от скважины до танка» — Well to Tank (WtT)) не учитывался, и, таким образом, не учитывались выбросы за весь жизненный цикл («от скважины до кильватера» — Well to Wake (WtW)).

В отличие от этого, Руководство учитывает влияние всех ПГ, выбрасываемых за весь жизненный цикл, включая добычу и выращивание, производство, переработку и транспортировку на судно, а также и сжигание на судне. Руководство, которое предполагается к постоянному совершенствованию (в рамках ИМО в настоящее время проводится пересмотр Руководства), содержит пять глав и пять приложений. В пяти главах документа последовательно описывается его область применения, приводится методология определения выбросов ПГ для различных элементов цепочки поставок топлива, приводятся значения коэффициентов выбросов (в том числе принимаемые по «умолчанию»), а также область проверки, сертификации и требования к постоянному процессу проверки. В приложениях к Руководству представлен список рассматриваемых видов топлива и соответствующие им коэффициенты выбросов «по умолчанию». Руководство направлено на охват всего жизненного цикла топлива: помимо потребления на судне, производится учет выбросов CO_2 за весь жизненный цикл, в том числе добычу или выращивание сырья, рекуперацию почвы, переработку и преобразование сырья в топливо, транспортировку и бункеровку его на судно. Также Руководство вводит маркировку, которая включает информацию о виде топлива, сырье, процессе переработки, коэффициентах выбросов ПГ, о топливных смесях и аспектах устойчивого развития. Руководство определяет все элементы, подлежащие проверке/сертификации, и содержит общую процедуру стандартов сертификации.

3. МЕТОДОЛОГИЯ, ПРЕДСТАВЛЕННАЯ В ПРОЕКТЕ РУКОВОДСТВА ПО УЧЕТУ ВЫБРОСОВ ПГ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУДОВОГО ТОПЛИВА

3.1. Методология WtW.

Целью Руководства является описание методики определения и, в ряде случаев, назначение параметров интенсивности выбросов ПГ, происходящих в результате всего жизненного цикла (производства, цепочки поставок и использования) топлива и энергоносителей, используемых в судовых энергоустановках. В этом документе **учитываются** следующие выбрасываемые в атмосферу при производстве и использовании судового топлива парниковые газы: CO_2 , CH_4 , N_2O и **не учитываются**: неметановые летучие органические соединения (НМЛОС), оксиды серы SO_x , монооксид углерода (CO), твердые частицы (ТЧ) и сажа (black carbon).

Углеродный след «от скважины до судового бункерного танка» - «WtT – Well to Tank»

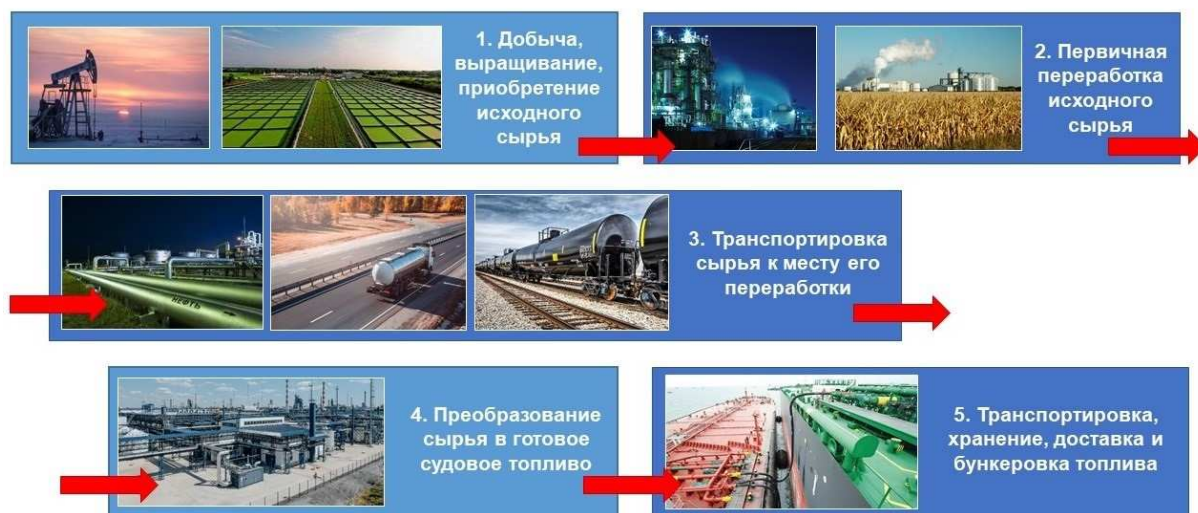


Рис. 2. Интенсивность выбросов ПГ для цепочки производства и поставки судового топлива на судно (WtT)¹

¹ Изображения из открытых источников сети интернет: <https://tass.ru/opinions/7784345>, <https://prommoscow.info/exhibition/gasoline-plant-mnpz>, https://world.lib.ru/t/trahtenberg_r_m/gorodaigody-69.shtml, https://www.researchgate.net/publication/329809693_Bunkering_Incidents_and_Safety_Practices_in_Turkey_Oil_Spill_Alone_The_Turkish_Straits_Sea_Area_Accidents_Environmental_Pollution_Socio-Economic_Impacts_and_Protection/figures?lo=1, <https://www.istc.illinois.edu/research/energy> (дата обращения 21.05.2025).

В качестве величины, характеризующей экологическую составляющую жизненного цикла и энергетическую ценность рассматриваемого топлива или его компонента, в Руководстве используется **коэффициент выбросов ПГ** (далее — КВПГ, GHG intensity), представляющий собой отношение массы выбрасываемых при сжигании топлива ПГ $M_{ПГ}$ к нижней теплотворной способности (LCV) этого топлива:

$$GHG = M_{ПГ} / LCV, \quad (\text{г CO}_2\text{-экв.}) / \text{МДж}. \quad (1)$$

Количество выбросов ПГ, учитываемых Руководством, — $M_{ПГ}$ измеряется в граммах CO_2 -эквивалента, и при его расчете требуется использовать характерные для CO_2 , CH_4 и N_2O значения 100-летнего потенциала глобального потепления ($GWP100$), приведенные в отчете МГЭИК. Масса выбросов ПГ в общем виде выглядит следующим образом:

$$M_{ПГ} = GWP_{\text{CO}_2(100)} \cdot M_{\text{CO}_2} + GWP_{\text{CH}_4(100)} \cdot M_{\text{CH}_4} + GWP_{\text{N}_2\text{O}(100)} \cdot M_{\text{N}_2\text{O}}, \quad \text{г CO}_2\text{-экв.}, \quad (2)$$

где $M_{ПГ}$ — масса выброшенных ПГ, г;

$GWP_{(100)}$ — 100-летний потенциал глобального потепления, который для двуокиси углерода равен 1, для метана равен 28, а для двуокиси азота равен 265;

M — масса соответствующего выброшенного в атмосферу вещества, г.

При определении КВПГ в Руководстве используется подход, при котором учитываются все коэффициенты выбросов ПГ для всех составляющих судового топлива за весь их жизненный цикл, что в тексте Руководства обозначено как WtW , то есть учитываются выбросы углекислого газа, метана и оксида азота, происходящие при добыче, выращивании, переработке, транспортировке и хранении всех компонентов (сырья для изготовления топлива или компонентов топлива) для всей цепочки их производства и поставки от источника сырья до непосредственного использования топлива в судовой энергоустановке и выбросов продуктов сгорания топлива в атмосферу (рис. 2). При этом цепочка WtW разделена на два основных компонента, WtT и TtW :

$$GHG_{WtW} = GHG_{WtT} + GHG_{TtW}, \quad \text{г CO}_2\text{-экв.} / \text{МДж}_{(LCV)}. \quad (3)$$

Таким образом, помимо привычного для ИМО круга вопросов, связанных с выбросами вредных веществ в результате использования топлива судовой энергетической установкой (TtW), в Руководстве учитываются выбросы ПГ в результате всех действий с топливом и необходимым для его изготовления сырьем (WtT). Рассмотрим здесь основные моменты этих методических указаний.

3.2. Методология WtT .

Топливная партия может представлять собой смесь видов топлива, изготовленных из различных видов сырья, полученных из различных источников, поэтому расчет интенсивности выбросов для цепочки «от скважины до танка» (WtT — рис. 2) должен производиться с использованием средневзвешенных значений энергии различных компонентов топлива и к каждому компоненту топлива должна прилагаться соответствующая информация. Руководство предполагает, что смешанные виды судового топлива должны быть включены в схемы сертификации, а соответствующие коэффициенты выбросов парниковых газов по умолчанию или фактические коэффициенты выбросов (г CO_2 /МДж) должны определяться пропорционально энергии каждой части, получающейся в результате топливной смеси.

Таким образом, количество выбросов ПГ в рамках цепочки WtT представляет собой сумму выбросов от получения исходного сырья e_{fescu} , от изменения содержания углерода в почве из-за изменения процесса землепользования e_l , от обработки сырья и производства из него конечного продукта e_p , от доставки исходного сырья от места добычи к месту производства и в результате доставки готового продукта к потребителю e_{td} за вычетом экономии выбросов путем накопления углерода в почве e_{sca} , улавливания углерода и его хранения e_{ccs} и измеряется в г CO_2 -экв./МДж $_{(LCV)}$:

$$GHG_{WtT} = e_{fescu} + e_l + e_p + e_{td} - e_{sca} - e_{ccs}, \quad \text{г CO}_2\text{-экв.} / \text{МДж}_{(LCV)}. \quad (4)$$

В тексте Руководства представлено описание методики, в соответствии с которой были получены значения КВПГ WtT (GHG_{WtT}) для различных видов топлива «по умолчанию». В нем отдельно указано, что значение каждой составляющей выбросов должно быть подтверждено как минимум тремя различными источниками, в качестве которых могут приниматься отчеты НИР, научные статьи и финансовые документы организации. Из трех (или более) значений следует выбирать наибольшее, а в информационных целях следует указать диапазон полученного КВПГ. Выбросы, связанные с изменением содержания углерода в почве из-за изменения процесса землепользования, e_l и экономия выбросов за счет накопления углерода в почве e_{sca} в силу

отсутствия методического аппарата и накопленных статистических данных принимаются равными нулю, поэтому для текущих расчетов КВПГ судового топлива для цепочки WtT формула (4) обретает вид:

$$GHG_{WtT} = e_{fecu} + e_p + e_{td} - e_{ccs}, \text{ г CO}_2\text{-экв./МДж}_{(LCV)}. \quad (5)$$

Данные о выбросах, происходящих в процессе получения и обработки сырья, транспортировки топлива должны предоставляться в орган по сертификации в виде специально подготовленных таблиц, в которых собирается и обрабатывается информация о жизненном цикле судового топлива и определяется конечное значение его КВПГ в рамках цепочки WtT.

Несмотря на довольно сложную процедуру определения и подтверждения КВПГ $_{WtT}$ (GHG_{WtT}), документ содержит его значения «по умолчанию» для различных видов топлива ([8], Приложение 2), которыми необходимо руководствоваться в случаях невозможности расчета по (4). Анализ этих значений (рис. 3) показывает, что использование возобновляемого топлива (биодизеля) не дает принципиального преимущества по выбросам парниковых газов при учете цепочки WtT, так как интенсивность этих выбросов сравнима со значением GHG_{WtT} характерным для нефтяного топлива с минимальным содержанием серы.

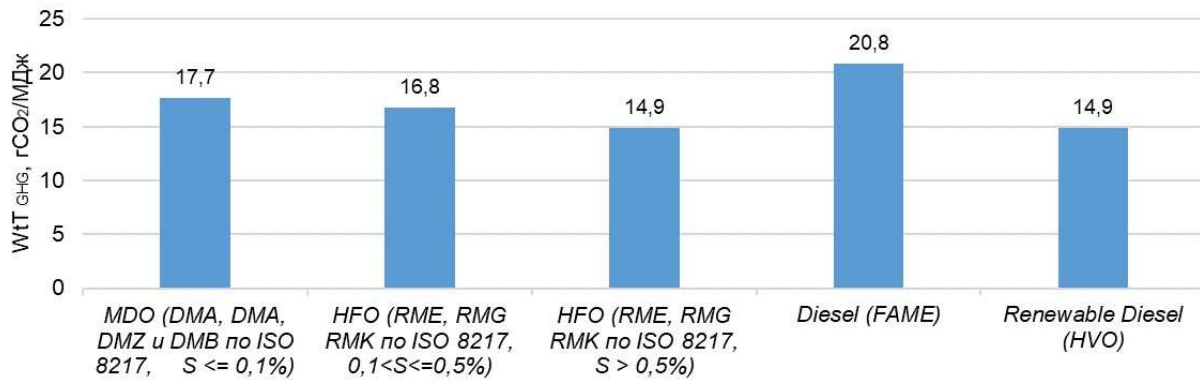


Рис. 3. Значения интенсивности выбросов ПГ «по умолчанию» для различных видов топлива применительно к цепочке WtT

Поэтому рассмотрим документ дальше, чтобы понять, в какой момент биотопливо становится «экологически чище» и как это отражено в методике.

3.3. Методология расчета TtW.

В отличие от WtT, целью методологии TtW является количественное определение интенсивности выбросов ПГ, образующихся на борту судна и связанных с расходом топлива, включающих все связанные со сжиганием и конверсией топлива выбросы, происходящие на судне.

Оценка выбросов ПГ в период TtW определяется по формуле:

$$GHG_{TtW} = \frac{1}{LCV} \left[\left(1 - \frac{1}{100} (C_{slip_{ship}} + C_{fug}) \right) \cdot (C_{fCO_2} \cdot GWP_{CO_2} + C_{fCH_4} \cdot GWP_{CH_4} + C_{fN_2O} \cdot GWP_{N_2O}) + \left(1 - \frac{1}{100} (C_{slip_{ship}} + C_{fug}) \cdot C_{sfu} \cdot GWP_{fuelx} \right) - S_{Fc} \cdot e_c - S_{Fccu} \cdot e_{ccu} - e_{OCCS} \right], \text{ г CO}_2\text{-экв./МДж}_{(LCV)}, \quad (6)$$

где $C_{slip_{ship}}$ — коэффициент, учитывающий несгоревшее или иным образом неиспользованное топливо (из числа доставленного на судно); $C_{slip_{ship}} = C_{slip} \cdot (1 - C_{fug}/100)$, % массы всего судового топлива;

C_{slip} — коэффициент, учитывающий несгоревшее или иным образом неиспользованное топливо (из числа подаваемого на преобразователь энергии (двигатель, котел)), % массы всего судового топлива;

C_{fug} — коэффициент, учитывающий потери топлива на пути от судового танка до использующей его силовой установки (утечки, испарение и т.д.), % массы конкретного судового топлива (пока методика не разработана, $C_{fug} = 0$);

C_{sfu} — коэффициент, учитывающий долю ПГ в компонентах топлива, г ПГ/г топлива;

GWP_{fuelx} — 100-летний потенциал глобального потепления, связанный с содержанием ПГ в компонентах топлива [9], см. (2), г CO₂-экв./г ПГ;

S_{Fc} — логическая величина, учитывающая при расчете значения TtW источник углерода для биотоплива, равен 1, для ископаемого топлива равен 0;

e_c — углерод, полученный в результате роста биомассы, г CO₂-экв./г топлива;

e_{ccu} — углеродные единицы от использования уже «уловленного» CO₂ для производства топлива (пока методика не разработана, $S_{Fccu} \cdot e_{ccu} = 0$), г CO₂-экв./г топлива;

S_{Fccu} — логическая величина, учитывающая использование ранее «уловленного» CO₂ в процессе производства синтетического топлива при расчете значения TtW (пока методика не разработана, $S_{Fccu} \cdot e_{ccu} = 0$), может принимать значение 1 или 0;

e_{OCCS} — количество углеродных единиц, полученных за счет улавливания углерода на борту судна, определяемое с учетом всех выбросов, которые произошли в процессе этого улавливания и транспортировки CO₂ до хранилища (пока методика не разработана, $e_{OCCS} = 0$).

При оценке выбросов ПГ в рамках цепочки TtW могут использоваться два подхода:

- 1) источник углерода в топливе не учитывается, поэтому $S_{Fc} = S_{Fccu} = 0$;
- 2) источник углерода в топливе учитывается (например, используемый для производства биотоплива уже содержащийся в почве CO_2), поэтому $S_{Fc} = S_{Fccu} = 1$.

Таким образом, с учетом еще не разработанных методик ($e_l, e_{sca}, C_{fug}, e_{ccu}, e_{OCCS} = 0$), в настоящее время суммарное значение КВПГ (3) для топлива или его составляющей может быть представлено в виде суммы (5) и (6):

$$GHG_{WtW} = e_{fecu} + e_p + e_{td} - e_{ccs} + \frac{1}{LCV} \left[\left(1 - \frac{C_{slip_{ship}}}{100} \right) \cdot (C_{fCO_2} \cdot GWP_{CO_2} + C_{fCH_4} \cdot GWP_{CH_4} + C_{fN_2O} \cdot GWP_{N_2O}) + \left[\left(1 - \frac{C_{slip_{ship}}}{100} \cdot C_{sfx} \cdot GWP_{fuelx} \right) - S_{Fc} \cdot e_c \right] \right], \text{ г } CO_2\text{-экв./МДж}_{(LCV)}. \quad (7)$$

На рис. 4 представлена структура формулы (7), где видно, что главное отличие при определении КВПГ ископаемого топлива и биотоплива заключается в том, что для биотоплива не берется в расчет весь углерод, полученный из окружающей среды при выращивании сырья, из которого оно изготовлено (e_c).

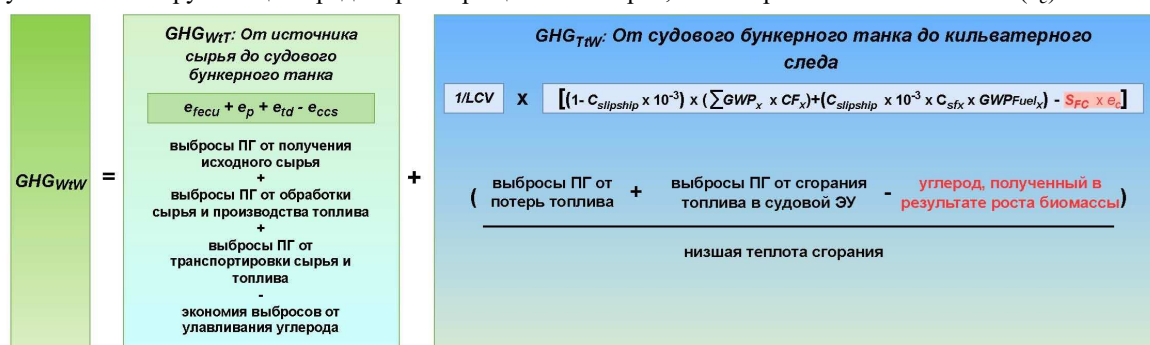


Рис. 4. Суммарное значение выбросов ПГ для топлива или его составляющих, образующихся в результате его жизненного цикла

На рис. 5 представлены значения коэффициентов углеродоемкости C_F для различных видов топлива (MDO, HFO, чистых биотоплив FAME и HVO и смеси B20 (20 % FAME и 80 % HFO) с учетом различных стадий жизненного цикла.

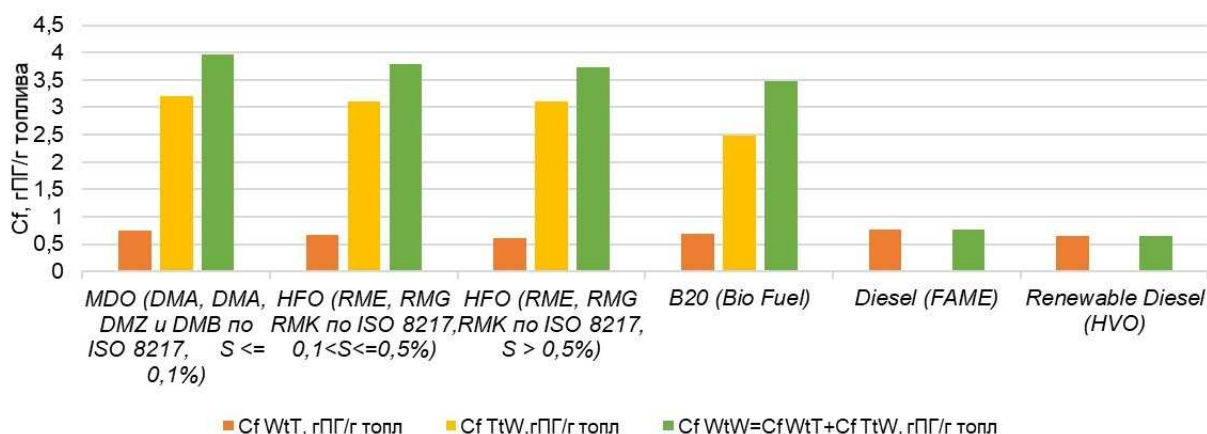


Рис. 5. Сравнение переводных коэффициентов углеродоемкости C_F различных топлив для различных стадий жизненного цикла (WtT, TtW и суммарный коэффициент для WtW)

3.4. Сертификация судового топлива.

Задачей сертификации судового топлива является подтверждение того, что сертифицируемое биотопливо отвечает требованиям, предъявляемым к экологичному топливу, использование которого не препятствует устойчивому развитию общества. Устойчивое развитие определяется как развитие, которое удовлетворяет потребности общества в настоящем времени, не ставя под угрозу способность к этому будущих поколений. В контексте судового топлива в ходе обсуждения и разработки в ИМО проекта Руководства были сформулированы следующие основные требования к экологичности судового топлива в течение жизненного цикла:

- 1) по сравнению с традиционными видами судового топлива, при использовании устойчивых судовых топлив должно образовываться *меньшее количество* ПГ в процессе их добычи, производства и применения;
- 2) использование экологичных судовых топлив не должно приводить к *увеличению выбросов* ПГ в результате использования ископаемых источников энергии, должно обеспечиваться *равновесие* между улавливаемым и накапливаемым углеродом, а также предотвращается *двойной учет* в разных секторах экономики;
- 3) используемые для производства экологичного топлива *источники* электроэнергии должны питаться от возобновляемых, ядерных или биогенных источников, а также от доступных электрических сетей в часы наименьшей их нагрузки;
- 4) производство экологичных судовых топлив не должно производиться на землях с большим содержанием углерода, а также не должно приводить к увеличению выбросов ПГ в результате изменения землепользования из-за выращивания культур для производства биотоплива;
- 5) производство экологичного судового топлива должно поддерживать и/или улучшить качество *водных ресурсов*;
- 6) производство экологичного судового топлива не должно ухудшать качество *атмосферного воздуха*;
- 7) производство экологичного судового топлива не должно ухудшать качество *почвы*;
- 8) производство экологичного судового топлива должно улучшать практики ответственного и безопасного обращения с отходами, в т.ч. химически активными;
- 9) производство экологичного судового топлива должно поддерживать и/или улучшать биоразнообразие экосистем.

В настоящий момент вопросами, связанными с подтверждением экологичности судового топлива, занимаются организации, имеющие соответствующее разрешение от Организации международной сертификации устойчивого развития и выбросов углерода (International Sustainability & Carbon Certification — ISCC), являющейся независимой многосторонней неправительственной организацией, отвечающей за разработку, надзор, пересмотр и постоянное совершенствование системы сертификации в области биотоплива. Система сертификации ISCC охватывает все устойчивое сырье, включая биомассу из сельского хозяйства, лесного хозяйства и аквакультур, биогенные отходы, небиологические возобновляемые материалы и переработанные материалы на основе углерода и продукты, полученные из них. Имея в настоящее время более 7000 действительных сертификатов в более чем 100 странах, ISCC является одной из крупнейших в мире систем сертификации. Список органов по сертификации доступен [12], среди них присутствуют представители классификационных обществ, в том числе компании Bureau Veritas Consumer Products Services, Inc., Bureau Veritas Polska Sp. z o.o, China Classification Society Certification Co. Ltd., DNV Business Assurance Sweden AB и RINA Services S.p.A.

3.5. Маркировка жизненного цикла топлива.

Руководством вводится технический инструмент для сбора и передачи информации, необходимой для оценки жизненного цикла судовых видов топлива и энергоносителей (например, электроэнергии для береговых электростанций), используемых в судовой энергоустановке, представляющий собой маркировку жизненного цикла топлива (Fuel lifecycle label, далее — FLL). Маркировка жизненного цикла топлива может быть полезна производителям, потребителям и контролирующим органам, так как содержит исчерпывающую информацию о топливе и состоит из пяти основных частей, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Маркировка жизненного цикла судового топлива

Часть	Код	Ед. измерения	Описание
A — основные характеристики топлива	A-1	—	вид топлива (для топливной смеси указываются проценты)
	A-2	—	способ получения топлива
	A-3	МДж/г топл.	LCV — низшая теплотворная способность
	A-4	% МДж _(LCV) / МДж _(LCV)	доля в топливной смеси (только для топливных смесей)
	A-5	г CO ₂ -экв. / МДж _(LCV)	количество выбросов ПГ в рамках цепочки WtT
B — углеродные единицы	B-1	г CO ₂ -экв. / г топлива	e_c — углеродные единицы, полученные в результате роста биомассы, пока методика не разработана $e_c = 0$
	B-2		e_{scu} — углеродные единицы, полученные в результате улавливания углерода, пока методика не разработана $e_{scu} = 0$
C — количество выбросов ПГ в рамках цепочки TtW	C-1	г CO ₂ -экв. / МДж _(LCV)	количество выбросов ПГ в рамках цепочки TtW (источник углерода не учитывается)
	C-2		количество выбросов ПГ в рамках цепочки TtW (источник углерода учитывается)
	C-3	—	механизм, расходующий топливо
D — выбросы ПГ в рамках цепочки WtW	D	г CO ₂ -экв. / МДж _(LCV)	количество выбросов ПГ в рамках цепочки WtW (A-5 + C-2)
E — сертификация	E	—	в этой части указаны показатели экологичности судового топлива (см. 2.4)

4. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМА ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУДОВОГО ТОПЛИВА НА РЕАЛИЗАЦИЮ ТРЕБОВАНИЙ МАРПОЛ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УГЛЕРОДОЕМКОСТИ

Несмотря на то, что в настоящий момент на расчет показателя и рейтинга эксплуатационной углеродоемкости судна могут влиять только выбросы, происходящие на судне в рамках цепочки TtW, ввиду появления на рынке новых видов топлива, в первую очередь смесей из нефтяного топлива и биодизеля, в ИМО было разработано Временное руководство по использованию судового биотоплива MEPC.1/Circ.905 [13]. Документ содержит рекомендации, направленные на снижение эксплуатационной углеродоемкости судна (СП) путем использования топливных смесей из ископаемого и растительного сырья, для которых отсутствует установленный переводной коэффициент углеродоемкости. Для этого необходимо, чтобы коэффициент выбросов парниковых газов GHG_{WtW} биотоплива на всем жизненном цикле не превышал 33 г CO₂-экв. / МДж_(LCV). Делается это путем пересчета переводного коэффициента углеродоемкости (C_F) для каждой части топливной смеси. При этом предполагается, что такое биотопливо должно иметь документальное подтверждение экологичности в рамках одной из международно признанных схем сертификации экологичного топлива. Для биотоплива, предназначенного к использованию на судах, ИМО рекомендовала на временной основе использовать одну из подобных схем, признанных Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), при понимании, что в будущем возможна разработка и признание ИМО аналогичных схем. Подобная процедура заложена в проект Пересмотренного приложения VI к МАРПОЛ, принятие которого предполагается в октябре 2025 г. на внеочередной сессии Комитета по защите морской среды ИМО.

ВЫВОДЫ

В настоящий момент сложилась ситуация, при которой биотоплива фактически имеют значительное преимущество перед другими видами судовых топлив с точки зрения их влияния на показатель и рейтинг эксплуатационной углеродоемкости судов, а соответственно, и экономической составляющей их использования. В настоящий момент возможная доля снижения количества парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу, фактически прямо пропорциональна доле биотоплива в смеси судового топлива, вплоть до 100 %. Таким образом, биотопливо фактически получило значительное конкурентное преимущество перед другими альтернативными судовыми топливами, для которых переводные коэффициенты углеродоемкости, если эти виды топлива не имеют биологического происхождения, составляют 1,375 для метанола, 1,913 для этанола и 2,75 для СПГ.

Что касается частей судовых топлив, полученных из ископаемых источников, для определения их переводного коэффициента C_F используются значения из [9] и [5], учитывающие только выбросы ПГ в процессе сжигания топлив и не учитывающие выбросы за весь их жизненный цикл. При справедливом подходе к определению выбросов парниковых газов хотелось бы видеть учет выбросов WtT также и для нефтяных топлив, что обязательно должно привести к необходимости пересмотра принятых еще в 2006 г. значений их переводных коэффициентов C_F . Подобная мера обязательно приведет к росту значений этих коэффициентов как для чистого ископаемого топлива, так и для смеси его с биотопливом. Но увеличение значения переводного коэффициента смеси будет меньше, и это значительно увеличит влияние использования биотоплива на коэффициент C_F .

В настоящий момент безусловным выгодоприобретателем этой ситуации является Европейский союз, вложивший в создание инфраструктуры выращивания и производства биотоплива большое количество ресурсов, в том числе направленных на создание нормативной базы. Последние плоды нормотворчества — поправки к Директиве ЕС № 2024/1405 [14] — расширили список источников возобновляемого сырья для производства биотоплив, теперь таковыми являются: топлива, полученные путем переработки промежуточных культур и культур, выращенных на сильно деградированных землях, спиртосодержащее сырье, цианобактерии, коммунальные сточные воды и поврежденные культуры, непригодные в качестве пищевых и кормовых ресурсов, прочие органические отходы и водоросли. При этом основные издержки от деградации пахотных земель и сокращения лесного покрова будут нести развивающиеся государства экваториальной зоны, где будет выращиваться значительная доля сырья для последующей транспортировки в ЕС и производства биотоплива с высокой добавленной стоимостью. Сейчас прогнозируется рост мощности производства жидкого биотоплива и биометана в государствах-членах ЕС от 3 до 11,6 раза в промежутке между 2023 и 2050 гг. [15]. Авторами отмечаются следующие ограничивающие факторы использования биотоплива: более высокая цена в расчете на энергию (на 20 — 150 % выше в зависимости от качества исходного сырья), ограниченность сырья и недостаток промышленных технологий.

Таким образом, в разработанном в ИМО Руководстве предпринята попытка учесть все выбросы, производимые топливом за весь его жизненный цикл, сформулированы основные принципы экологичности судового топлива, а также даны рекомендации по его маркировке, то есть задан стиль описания жизненного цикла судового топлива по принятой форме. Для этого в документе введена маркировка, которая раскрывает информацию о виде топлива, используемом для его изготовления сырье, процессе его переработки, соответствующих выбросах парниковых газов и так далее. Рассматриваемый документ определяет все элементы жизненного цикла судового топлива, подлежащие проверке и сертификации.

При этом необходимо иметь в виду, что использование механизма оценки топлива на всем жизненном цикле в рамках реализации существующих и перспективных требований МАРПОЛ в области сокращения выбросов парниковых газов с судов может привести к дискриминации одних и тех же видов углеводородного и альтернативного топлива, произведенных в различных государствах, ввиду различий в количестве выбросов на этапе «от скважины до танка».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BP Statistical Review of World Energy June 2015. [Электронный ресурс] URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf> (дата обращения 22.05.2025).
2. Resolution MEPC.377(80). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
3. Толмачев С.А. Перспективы введения мер рыночного характера по сокращению выбросов парниковых газов с судов / С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 4 — 12.
4. Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2024, DNV.
5. Resolution MEPC.352(78). 2022 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1).
6. Resolution MEPC.308(73). 2018 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships.
7. BS ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels.
8. Resolution MEPC.376(80). 2023 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels.
9. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. / подгот. Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов; ред. С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара и К. Танабе. Т. 1 — 5. — ИГЕС, 2006.
10. 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. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23 — 34. — EDN WZWOPO.
11. Толмачев С.А. Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (CII) и предлагаемые подходы по их совершенствованию / С.А. Толмачев, А.А. Серов, А.А. Михеева, Д.С. Семионичев и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 77. — С. 24 — 32. EDN FXBYEL.
12. List of Cooperating Certification Bodies. [Электронный ресурс] URL: <https://www.iscc-system.org/certification/certification-bodies/> (дата обращения 21.05.2025).
13. MEPC.1/Circ.905. Interim Guidance on the Use of Biofuels under Regulations 26, 27 and 28 of MARPOL Annex VI (DCS and CII).
14. Commission Delegated Directive (EU) 2024/1405 of 14 March 2024 amending Annex IX to Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council as regards adding feedstock for the production of biofuels and biogas.
15. Development of outlook for the necessary means to build industrial capacity for drop-in advanced biofuels / European Commission. Directorate-General for Research and Innovation, Directorate C — Clean Planet. Unit C. 2 — Clean Energy Transitions. 7 February 2024.

REFERENCES

1. BP Statistical Review of World Energy June 2015. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf> (accessed 22.05.2025).
2. MEPC.377(80). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
3. Tolmachev S.A. Perspectives of the introduction of market-based measures to reduce greenhouse gas emissions in the shipping sector. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 4 — 12. (In Russ.)
4. Maritime Forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2024, DNV.
5. Resolution MEPC.352(78). 2022 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1).
6. Resolution MEPC.308(73). 2018 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships.
7. BS ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels.
8. Resolution MEPC.376(80). 2023 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels.
9. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme; ed. by S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe. T. 1 — 5. IGES, 2006.
10. 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.)
11. Tolmachev S.A., Serov A.A., Mikheeva A.A., Semionichev D.S. et al. Consequences of applying MARPOL requirements to operational carbon intensity (CII), and approaches for their improvement. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 24 — 32. EDN FXBYEL. (In Russ.)
12. List of Cooperating Certification Bodies. URL: <https://www.iscc-system.org/certification/certification-bodies/> (accessed 21.05.2025).
13. MEPC.1/Circ.905. Interim Guidance on the Use of Biofuels under Regulations 26, 27 and 28 of MARPOL Annex VI (DCS and CII).
14. Commission Delegated Directive (EU) 2024/1405 of 14 March 2024 amending Annex IX to Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council as regards adding feedstock for the production of biofuels and biogas.
15. Development of outlook for the necessary means to build industrial capacity for drop-in advanced biofuels / European Commission. Directorate-General for Research and Innovation, Directorate C — Clean Planet. Unit C.2 — Clean Energy Transitions. 7 February 2024.



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.542 + 656.612.1
EDN FYUGRY

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФЛОТА НАЛИВНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КРУГЛОГОДИЧНОЙ НАВИГАЦИИ ПО СЕВЕРНОМУ МОРСКОМУ ПУТИ

Е.Ю. Линник, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: zjillz@yandex.ru

А.Н. Суслов, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

В условиях изменения маршрутов поставки арктической нефти, вызванного геополитическими факторами, значительно возросла актуальность развития Северного морского пути как круглогодичной транспортной артерии. Целью исследования является оценка влияния ледового класса судов и условий их эксплуатации на экономические показатели транспортировки нефти по Северному морскому пути. Методы исследования основаны на математическом моделировании годовой эксплуатации наливных судов. Новизна исследования заключается в учете сценариев ледовых условий, а также в сравнительном анализе перевозок с перевалкой и без нее. В статье представлена модель годовой эксплуатации наливных судов ледовых классов для транспортировки нефти в Азию, учитывающая ледовые и навигационные условия, характеристики маршрута и скоростные параметры судов. На основе модели рассчитаны эксплуатационные затраты на транспортировку нефти по Северному морскому пути наливными судами всех арктических ледовых классов, а также конвенциональными судами по Южному морскому пути. Определены капитальные затраты на постройку наливных судов, полная мощность, а также затрачиваемая мощность в зависимости от условий эксплуатации. Все расчетные значения получены на основе реалистичных входных данных с учетом перспективных изменений в судоходстве. Сравнительный анализ результатов расчета показал, что транспортировка с перевалкой оказывается более эффективной преимущественно для судов высоких ледовых классов, увеличивая количество доставок груза судами ледовых классов Arc7 — Arc9 в среднем на 40 % в оптимистическом и базовом сценариях ледовых условий, а в пессимистическом — на 20 — 30 %. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании решений о пополнении флота и выборе оптимальных схем транспортировки нефти в условиях изменчивой ледовой обстановки в Арктике.

Ключевые слова: Северный морской путь, транспортировка нефти, круглогодичная навигация, математическая модель, экономическая эффективность, ледовый класс, наливное судно, перевалка нефти.

Для цитирования: Линник Е.Ю. Перспективы развития флота наливных судов для обеспечения круглогодичной навигации по Северному морскому пути / Е.Ю. Линник, А.Н. Суслов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 26 — 38. — EDN FYUGRY.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE TANKER FLEET FOR YEAR-ROUND NAVIGATION VIA THE NORTHERN SEA ROUTE

E.Yu. Linnik, PhD student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: zjillz@yandex.ru

A.N. Suslov, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

In the context of changing arctic oil supply routes due to geopolitical factors, the importance of developing the Northern Sea Route as a year-round transportation artery has significantly increased. The aim of the study is to assess the impact of ice class and operational conditions of vessels on the economic performance of oil transportation via the Northern Sea Route. The research methods are based on mathematical modeling of the annual operation of tankers. The novelty of the study lies in the consideration of ice condition scenarios, as well as in the comparative analysis of transportation with and without transshipment. This article presents a model for the annual operation of ice-class tankers transporting oil to Asia, considering ice and navigational conditions, route characteristics, and vessel speed parameters. Based on the model, operating costs for oil transportation via the Northern Sea Route using tankers of all arctic ice classes, as well as conventional vessels via the Southern Sea Route, have been calculated. Capital costs for the construction of tankers, total installed power, and power consumption under various operating conditions have also been determined. All calculated values are derived from realistic input data, taking into account prospective changes in shipping. A comparative analysis of the calculation results showed that transportation with transshipment is generally more efficient for high ice-class vessels, increasing the number of cargo deliveries by Arc7 — Arc9 ice-class vessels by an average of 40 % under optimistic and baseline ice condition scenarios, and by 20 — 30 % under the pessimistic scenario. The obtained results can support decision-making on fleet replenishment and the selection of optimal oil transportation schemes under changing ice conditions in the Arctic.

Keywords: Northern Sea Route, oil transportation, year-round navigation, mathematical model, economic efficiency, ice class, tanker, oil transshipment.

For citation: Linnik E.Yu., Suslov A.N. Prospects for the development of the tanker fleet for year-round navigation via the Northern Sea Route. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 26 — 38. EDN FYUGRY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

После введения Европейским союзом в 2022 г. эмбарго на морской импорт российской нефти большая часть экспортных потоков арктической нефти, отгружаемой из Мурманска, была перенаправлена главным образом в Китай и Индию [1]. Доставка нефти из европейской части России в Азию осуществляется по Южному морскому пути (ЮМП) через Суэцкий канал или по Северному морскому пути (СМП). Объем перевозок по СМП в восточном направлении увеличился благодаря интенсификации судоходства в летне-осенний период, однако обеспечение круглогодичной навигации наливных судов остается нерешенной задачей.

Приоритетом государственной политики России в Арктике является развитие СМП как круглогодичной и конкурентоспособной транспортной артерии [2]. Перенаправление грузопотоков углеводородов в восточном направлении и интерес к СМП как стратегическому маршруту требует пополнения арктического флота наливных судов. Изучение перспектив данного вопроса включает навигационные, технические, экономические, климатические и экологические аспекты [3, 4]. Экономическая эффективность играет ключевую роль в формировании решений по развитию арктического судоходства и комплексной оценке потенциала СМП, что делает актуальной задачу оценки экономической эффективности транспортировки нефти наливными судами ледовых классов с учетом долгосрочных прогнозов ледовой обстановки.

Результаты изучения экономической эффективности перевозок нефти по СМП в Азию за последнее десятилетие нашли отражение в ряде публикаций [4 — 7]. Большинство зарубежных исследований ограничиваются анализом судов ледового класса 1А (Arc4), предназначенных для сезонной навигации, и подтверждают, что в летне-осенний период СМП является конкурентной альтернативой ЮМП. При этом вопрос организации круглогодичной навигации не рассматривается.

В центре внимания отечественных ученых традиционно находятся вопросы навигационных, конструктивных и технических возможностей организации круглогодичной навигации по СМП судов высоких ледовых классов. Однако исследований, направленных на комплексный анализ экономической эффективности круглогодичной транспортировки нефти по СМП в восточном направлении, все еще недостаточно.

В контексте анализа перспектив пополнения флота наливных судов для организации круглогодичных перевозок в восточном направлении необходимы дальнейшие исследования для определения конкретных условий и сценариев, при которых СМП может максимально эффективно использоваться в коммерческих целях.

Целью данной работы является исследование влияния ледового класса судов и условий их эксплуатации на экономические показатели транспортировки нефти в условиях климатических изменений в Арктике. Задачей, направленной на достижение поставленной цели, является разработка модели годовой эксплуатации наливных судов ледовых классов, используемых для транспортировки нефти по СМП в Азию. Модель должна учитывать влияние ледовых и навигационных условий, характеристик маршрута, скоростных параметров судов, а также иметь в качестве выходных параметров переменные и постоянные эксплуатационные затраты.

1. МОДЕЛЬ ГОДОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НАЛИВНЫХ СУДОВ

Схема взаимосвязи ключевых факторов разработанной модели годовой эксплуатации наливных судов представлена на рис. 1.

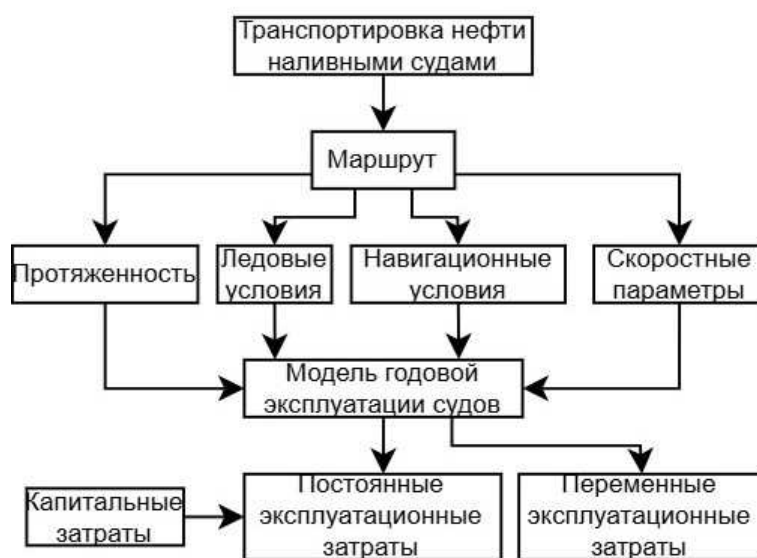


Рис. 1. Структура модели годовой эксплуатации наливных судов

В исследовании оценивается экономическая эффективность транспортировки углеводородов по СМП на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона на примере перенаправления потоков нефти с рейдовых перегрузочных комплексов Кольского залива в порт Циндао (Китай).

В рамках работы рассматриваются два сценария: эксплуатация наливных судов ледовых классов в режиме прямых рейсов между Кольским заливом и портом Циндао, а также транспортировка нефти с перевалкой в районе Петропавловска-Камчатского на конвенциональные суда для дальнейшей доставки в Циндао.

На основе анализа позиций судов в реальном времени, выполненного с использованием данных навигационного портала MarineTraffic, были выделены две основные судоходные трассы: прибрежная и высокоширотная, а также перспективная приполюсная транзитная линия. Схема судоходных трасс СМП с указанием районов акватории представлена на рис. 2: черным цветом обозначены прибрежная и высокоширотная трассы, а желтым — приполюсная транзитная линия.

Прибрежная трасса характеризуется меньшей глубиной и большей протяженностью по сравнению с высокоширотной, что ограничивает ее использование для крупнотоннажных наливных судов. Учитывая эти ограничения, настоящее исследование сосредоточено на высокоширотной трассе и перспективной приполюсной транзитной линии.

Для определения ледовых условий, складывающихся в районах эксплуатации судов, были проанализированы ледовые условия на выделенных судоходных трассах за 1998 — 2021 гг. по комплексным картам ледовой обстановки арктических морей, составленным в ФГБУ «ААНИИ» и размещенным на официальном сайте учреждения.

В 1990-х — начале 2000-х гг. наблюдались наиболее суровые ледовые условия, затем до конца 2010-х гг. происходило их постепенное облегчение, а в последние годы отмечается тенденция к усложнению. Разброс



Рис. 2. Схема судоходных трасс и районов акватории СМП:

- 1 — юго-западная часть Карского моря; 2 — северо-восточная часть Карского моря; 3 — западная часть моря Лаптевых;
4 — восточная часть моря Лаптевых; 5 — юго-западная часть Восточно-Сибирского моря;
6 — северо-восточная часть Восточно-Сибирского моря; 7 — Чукотское море

повторяемости типов ледовых условий по годам требует учета этой неопределенности, поэтому в исследовании применен сценарный подход для оценки эффективности проекта. Рассматриваются три сценария: пессимистический, отражающий похолодание и возвращение ледовой обстановки 1990-х — начала 2000-х гг.; оптимистический, воспроизводящий благоприятные для судоходства условия конца 2010-х гг.; базовый, соответствующий наиболее часто наблюдаемым ледовым условиям в каждом районе СМП.

Гидрографической особенностью арктических морей являются участки с глубинами в несколько десятков метров. Минимальная проходная глубина на высокоширотной трассе, согласно [8], составляет 17 м и зафиксирована к северу от Новосибирских островов. В данном исследовании на этой трассе рассматривается эксплуатация судов размерной группы Panamax с максимальной осадкой около 14 м.

На приполюсной транзитной линии отсутствуют ограничения по проходным глубинам. Неопределенность тарификации ледокольной проводки перспективными атомными ледоколами проекта 10510 типа «Лидер» (ЛК-120Я) затрудняет оценку экономической эффективности перевозок углеводородов по этой трассе. В данном исследовании рассмотрена эксплуатация на приполюсной транзитной линии наливных судов ледового класса Arc9, не требующих ледокольной проводки при любых ледовых условиях. Для анализа использованы суда размерных групп Suezmax и Panamax, что позволяет сравнить показатели транспортировки нефти судами Panamax на этой линии и на высокоширотной трассе.

Глубины на маршрутах между Петропавловском-Камчатским и Циндао позволяют безопасно пройти крупнотоннажным судам, а порт Циндао оснащен глубоководными терминалами. Эти факторы обусловили выбор для перевалки нефти судов Aframax ледового класса Ice3, принятых в исследовании в качестве конвенциональных.

Для сравнительной оценки эффективности наливных судов арктических ледовых классов на СМП проанализирована круглогодичная эксплуатация судов Ice3 (Panamax, Suezmax) на ЮМП. Для судов ледовых классов Arc4 — Arc6 оценена эффективность комбинированных рейсов по СМП и ЮМП для круглогодичной транспортировки углеводородов при несоответствии ледового класса критериям допуска в акваторию СМП [9]. Во время следования по ЮМП для наливных судов предполагается заход в порт Фуджейра (ОАЭ) с целью bunkеровки. Эксплуатация судов ледовых классов Arc7 — Arc9 рассмотрена в режиме круглогодичной навигации на трассах СМП.

Значения средних эксплуатационных скоростей наливных судов в условиях ледового плавания определены с учетом значений безопасных скоростей, зависящих от толщины условно ровного льда и ледового класса судна [11].

Средняя эксплуатационная скорость на чистой воде принята равной 80 % от проектной. Согласно данным Регистровых книг классификационных обществ — членов МАКО, проектная скорость большинства наливных судов ледовых классов составляет 14 — 15 уз. Для судов ледовых классов Ice3 и Arc4 — Arc7 принята проектная скорость 15 уз, а для судов ледовых классов Arc8 — Arc9, оснащенных энергетическими установками с избыточным запасом мощности на чистой воде, — 17 уз. Значения средних эксплуатационных скоростей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние эксплуатационные скорости наливных судов в узлах

Ледовый класс	Режим ледового плавания	Тип ледовых условий						Чистая вода
		Тяжелый		Средний		Легкий		
		ЛН	ЗН	ЛН	ЗН	ЛН	ЗН	
Arc9	СП	5,9		10		12		13,6
Arc8	СП	5,9	4,7					
	ПЛ	—	5,9	—		—		
Arc7	СП	4,5	2	9,5	8,5	10,8		12
	ПЛ	—	5,9	—		—		
Arc6	СП	—		5	2,9	9,5		
	ПЛ	—		—	9,5	—		
Arc5	СП	—		—		9,5	5,9	
	ПЛ	—		9,5		—		
Arc4	СП	—		—		6	2	
	ПЛ	—		5		—		
Ice3	СП	—		—		5	—	
	ПЛ	—		—		—		
Примечание. СП — самостоятельное плавание; ПЛ — под проводкой ледокола; ЛН — летняя навигация; ЗН — зимняя навигация.								

Для моделирования годовой эксплуатации наливных судов ледовых классов, совершающих круговые рейсы между Кольским заливом и портом Циндао при принятых сценариях ледовых условий, в Microsoft Excel создана дискретная временная шкала. Годовой цикл транспортировки разделен на месяцы и временные интервалы, соответствующие времени прохождения районов акватории, где ледовые условия приняты неизменными в течение месяца, а район характеризуется протяженностью и скоростью движения судна в зависимости от типа ледовых условий. Для каждого района рассчитаны затраты топлива и определена необходимость ледокольной проводки. Итоговые дискретные данные формируют основу для оценки эффективности транспортировки нефти за год для каждого сценария ледовых условий, включая количество доставок, среднюю скорость, расход топлива и объем ледокольной проводки.

Результаты моделирования годовой эксплуатации наливных судов ледовых классов на маршруте Кольский залив — Циндао без перевалки груза представлены в табл. 2. В скобках указана процентная разница при транспортировке с перевалкой.

Продолжительность одного захода в порт, независимо от его цели (загрузка, разгрузка, бункеровка), принята равной 2 суткам, а технического обслуживания и ремонта судов — 5 суткам в год.

Таблица 2

Модель годовой эксплуатации наливных судов ледовых классов между Кольским заливом и портом Циндао

Ледовый класс	Доставок груза	Всего заходов в порт	Суэцкий канал: кол-во проходов	Средняя годовая скорость, уз
Оптимистический сценарий				
Arc9 прип.	8 (38 %)	15 (40 %)	—	10,8 (–9 %)
Arc9	8 (38 %)	15 (47 %)	—	11,5 (–8 %)
Arc8	8 (38 %)	15 (47 %)	—	11,5 (–8 %)
Arc7	7 (43 %)	13 (46 %)	—	10,2 (–6 %)
Arc6	6 (50 %)	13 (38 %)	1 (0 %)	10,2 (–5 %)
Arc5	6 (33 %)	13 (38 %)	1 (0 %)	9,8 (–7 %)
Arc4	5 (20 %)	10 (30 %)	1 (0 %)	7,9 (–10 %)
Базовый сценарий				
Arc9 прип.	7 (43 %)	14 (36 %)	—	10 (–11 %)
Arc9	7 (43 %)	14 (43 %)	—	10,8 (–9 %)
Arc8	7 (43 %)	14 (43 %)	—	10,7 (–9 %)
Arc7	7 (29 %)	13 (38 %)	—	9,5 (–7 %)
Arc6	6 (33 %)	13 (31 %)	2 (0 %)	9,7 (–3 %)
Arc5	6 (17 %)	13 (38 %)	2 (0 %)	10,3 (–6 %)
Arc4	5 (20 %)	11 (18 %)	2 (0 %)	8,8 (–11 %)
Ice3	3	14	7	10,9
Ice3 пер.	19	38	—	9,3
Пессимистический сценарий				
Arc9 прип.	6 (50 %)	12 (42 %)	—	9,1 (–14 %)
Arc9	7 (29 %)	13 (31 %)	—	9,5 (–12 %)
Arc8	6 (33 %)	12 (33 %)	—	9,2 (–13 %)
Arc7	6 (17 %)	11 (27 %)	—	8,5 (–16 %)
Arc6	4 (0 %)	14 (7 %)	6 (0 %)	10,4 (–3 %)
Arc5	4 (0 %)	14 (14 %)	6 (0 %)	10,7 (–1 %)
Arc4	4 (0 %)	13 (0 %)	5 (20 %)	10,3 (0 %)

Примечание. Прип. — приполюсная транзитная линия; пер. — перевалка.

2. ВЫХОДНЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

На основе результатов моделирования (табл. 2) определяются постоянные и переменные эксплуатационные затраты. Для комплексного анализа эффективности, помимо эксплуатационных затрат, учитываются также капитальные затраты на постройку наливных судов. Структура затрат на транспортировку углеводородов наливными судами с указанием выбранного в работе способа расчета представлена в табл. 3.

2.1. Капитальные затраты и мощность судовой энергетической установки

Капитальные затраты на постройку судов рассчитывались по методике [12] на основе масс разделов нагрузки и полной мощности судовой энергетической установки. Массы элементов нагрузки раздела 01 «Корпус» определялись с учетом влияния ледового класса по методу [22], а массы прочих разделов нагрузки, входящих в водоизмещение порожнем, пересчитывались с прототипа. Для судов ледового класса Ice3 использовались данные наливного судна проекта 15781 (Ice2), для судов ледовых классов Arc4 — Arc9 — судна проекта 23130 (Arc4). Полная мощность судовой энергетической установки принималась по наибольшему из двух значений: мощности на чистой воде или мощности, необходимой для обеспечения ледопроеходимости.

Мощность наливных судов на чистой воде рассчитывалась по методу [23]. Ввиду различий в форме корпуса судов низких и высоких ледовых классов коэффициент буксировочного сопротивления и площадь смоченной поверхности определялись разными методами. Для судов ледовых классов Ice3 и Arc4 применялся метод [23], основанный на подходе Гулдхаммера — Харвальда, так как их обводы близки к судам неледового плавания. Для судов ледовых классов Arc5 — Arc9 применялся метод ФГУП «КГНЦ» [24], основанный на регрессионном анализе данных буксировочных испытаний моделей судов ледового плавания.

Таблица 3

Структура затрат на транспортировку углеводородов наливными судами

Вид	Составляющая затрат	Способ расчета
Капитальные затраты	Проектирование, подготовка производства и постройка судна	В соответствии с методикой, предложенной в [12], путем расчета по конструктивным группам с учетом среднего значения годовой инфляции в США в размере 2,9 % за 2000–2020 гг.
Постоянные эксплуатационные затраты	Содержание экипажа	Заработная плата одного члена экипажа в размере 4000 долл. США/мес. (среднее значение для моряков, занятых на нефтяных танкерах, согласно [13]). Численность экипажа судна принята 24 чел., что соответствует минимальным требованиям для круглосуточной работы с трехменным графиком вахт при совмещении профессий [14] Страховые взносы согласно ст. 425 НК РФ [15] и страхование случаев травматизма, суммарно 33 % от заработной платы Стоимость питания одного члена экипажа в размере 15 долл. США/сут на основе данных о стоимости питания экипажей морских судов, опубликованных Министерством транспорта РФ в декабре 2009 г. [16], с учетом инфляции в США за период 2009 — 2022 гг.
	Техническое обслуживание и ремонт	В размере 1,095 % капитальных затрат в год [17]
	Страхование	Страховая премия (P&I, H&M) в размере 0,343 % капитальных затрат в год [17] Страховая премия за страхование ледовых рисков в акватории СМП в размере 15 долл. США/GT в год, согласно [18] с учетом инфляции в США за период 2001 — 2022 гг.
Переменные эксплуатационные затраты	Ледокольная проводка	Прямой расчет на основании предельных тарифов на ледокольную проводку судов, оказываемую ФГУП «Атомфлот» в акватории СМП [19]
	Топливо	Прямой расчет на основании мощности, необходимой для движения судна с заданной скоростью на чистой воде или с безопасной скоростью в зависимости от типа ледовых условий и ледового класса
	Суэцкий канал: сбор за проход	Прямой расчет на основании тарифов на прохождение Суэцкого канала, опубликованных на официальном сайте Администрации Суэцкого канала
	Страхование	Страховая премия за страхование от угрозы пиратства в размере 4 долл. США/GT за один проход через Аденский залив. Это значение эквивалентно надбавке за угрозу пиратства в размере 40 долл. США/TEU, приведенной в [20]
	Портовые сборы	В размере 0,428 долл. США/GT за один заход в порт согласно [21]
Примечание. Затраты, изначально рассчитанные в долларах США приведенными методами, конвертированы в рубли по среднему курсу 67 руб./долл. США согласно данным ЦБ РФ за 2022 г.		

Для определения минимальной мощности судовой энергетической установки, необходимой для обеспечения ледопроеходимости в соответствии с ледовым классом судна, применялась формула, установленная Правилами РС [25], учитывающая угол наклона форштевня, ширину корпуса и водоизмещение. Для оценки реальной мощности в ледовых условиях, необходимой для прогнозирования расхода топлива, для судов всех ледовых классов было выполнено определение ледового сопротивления в зависимости от условий эксплуатации.

Сопротивление под проводкой ледокола и при самостоятельном ледовом плавании в летне-осенний период рассчитано по формуле из [26], описывающей движение судна в сплоченных мелкобитых льдах. Для самостоятельного ледового плавания в зимне-весенний период применен метод расчета сопротивления при непрерывном движении в сплошных льдах [27].

Мощность на чистой воде при движении судна в грузу определялась при осадке по проектную ватерлинию, а в балластном переходе — при осадке в балласте, при этом составляя в среднем 60 % от мощности при движении в грузу. При ледовом плавании мощность судовой энергетической установки всегда определялась при осадке по проектную ватерлинию.

В табл. 4 представлены основные технико-экономические характеристики судов, включая значения мощности на чистой воде (в грузу) и при различных ледовых условиях, применяемые для оценки расхода топлива.

Таблица 4

Основные технико-экономические характеристики судов

Параметр	Ice3	Arc4	Arc5	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9	Ice3	Arc9
	Panamax							Suezmax	
DW , т	66876	65062	64238	61873	60117	48897	44770	154599	112231
GT_R	36205	36205	36205	36205	36205	36205	36205	74800	74800
Δ_0 , т	16057	17871	18695	21060	22816	24798	28924	28114	51254
K , млн руб.	6025	7062	7389	8272	9013	9675	11290	10114	19203
P , кВт	13807	16068	20576	25545	33211	34027	53178	17850	74111
$P_{\text{чист}}$, кВт	7844	7844	9365	9365	9365	13054	13054	11798	21780
$P_{\text{ЛНСП}}$, кВт (легкие)	—	6873	5090	5390	6255	6054	6054	—	12785
$P_{\text{ЗНСП}}$, кВт (легкие)	—	4918	4417	5084	6510	6545	6545	—	10606
$P_{\text{ЛНСП}}$, кВт (средние)	—	—	—	6506	8043	7698	7698	—	16206
$P_{\text{ЗНСП}}$, кВт (средние)	—	—	—	6496 (1)	14249	14619	14619	—	22673
$P_{\text{ЗНПЛ}}$, кВт (средние)	—	8714	6703	7097 (2 — 7)	—	—	—	—	—
$P_{\text{ЗНСП}}$, кВт (тяжелые)	—	—	—	—	14328 (1)	18637 (1) 23026 (2, 7)	21341 (1) 26335 (2 — 7)	—	32268 (1) 39197 (2 — 7)
$P_{\text{ЗНПЛ}}$, кВт (тяжелые)	—	—	—	—	27578 (2 — 7)	25983 (3 — 6)	—	—	—

П р и м е ч а н и е. DW — дедвейт, рассчитанный с учетом массы ледовых усилений корпуса и главной энергетической установки в зависимости от ледового класса судна; GT_R — уменьшенная валовая вместимость для расчета тоннажных сборов нефтеналивных судов с танками изолированного балласта, рассчитанная в соответствии с Правилами обмера морских судов РС [28]; Δ_0 — водоизмещение судна порожнем; K — капитальные затраты на постройку наливных судов; P — полная мощность судовой энергетической установки; $P_{\text{чист}}$ — мощность на чистой воде; $P_{\text{ЛНСП}}$ — мощность при самостоятельном плавании в летне-осенний период навигации; $P_{\text{ЗНСП}}$ — мощность при самостоятельном плавании в зимне-весенний период навигации; $P_{\text{ЗНПЛ}}$ — мощность при плавании под проводкой ледокола в зимне-весенний период навигации.
Цифры в скобках обозначают районы акватории СМП, для которых рассчитана мощность.

Для оценки соответствия расчетных значений капитальных затрат и полной мощности судовой энергетической установки контрольным значениям были выполнены расчеты этих величин для контрольных судов согласно принятым методикам.

В качестве контрольных значений капитальных затрат принята оценочная стоимость строительства наливных судов: 142 млн долл. США (Arc7) и 112 млн долл. США (Arc5) водоизмещением 70 тыс. т [29], а также 124 млн долл. США (Arc6) дедвейтом 69 тыс. т [30]. Расчетные капитальные затраты отклоняются от контрольных на 6,6 % (Arc5), 5,9 % (Arc6) и 12 % (Arc7).

Погрешность определения расчетной полной мощности судовой энергетической установки составила для судов ледового класса Arc7 — 5,4 % («Борис Соколов»), 1 % («Енисей») и 18,7 % (суда серии «Штурман»); для судов ледового класса Arc6 — 2,4 % («Василий Динков») и 4,8 % («Михаил Ульянов»).

Отклонения расчетных значений капитальных затрат и полной мощности судовой энергетической установки от контрольных значений в пределах 1 — 12 % находятся в допустимых границах для инженерно-экономических расчетов. Более высокое отклонение (18,7 %) для судов серии «Штурман» объясняется их уменьшенной осадкой.

При анализе совокупных затрат на транспортировку капитальные затраты учитываются в виде ежегодного возврата их части, включая возврат части затрат на вложенный капитал и части амортизационных отчислений.

При выборе схемы долгосрочного финансирования экстремальные колебания процентных ставок не рассматривались, поскольку в условиях их резкого роста развитие капиталоемких проектов, включая судостроение, существенно замедляется или приостанавливается из-за высокой стоимости привлеченного капитала.

С учетом данных об условиях кредитования в сфере судостроения, представленных в отчетах АО «ОСК» за 2016 — 2020 гг., в качестве расчетной схемы долгосрочного финансирования принят рублевый банковский кредит со ставкой 11,5 % годовых и сроком возврата 20 лет в период эксплуатации судна. Предусматривается применение мер государственной поддержки, включающих субсидирование 25 % капитальных затрат на строительство судов в соответствии с [31]. Оставшиеся 75 % покрываются за счет собственных средств судовладельца (30 %) и банковского кредита (45 %).

Возврат капитальных затрат, вложенного капитала и амортизационных отчислений осуществляется в течение срока полезной эксплуатации судна, принятого равным 20 годам, при этом ежегодный возврат рассчитывался по следующей формуле:

$$K_{\text{annual}} = (xK + A)/20,$$

где $x = 1,58$ — коэффициент возврата капитальных затрат с учетом принятой схемы долгосрочного финансирования и мер государственной поддержки;

$A = K - \Delta_0 C_{\text{scrap}} 10^{-6}$ — амортизационные отчисления, млн руб.;

C_{scrap} — ставка за тонну металлолома, составляющая 26 595 руб./т по состоянию на 2020 г. [32].

2.2. Эксплуатационные затраты

Для оценки расхода топлива движение судов ледовых классов описывалось совокупностью затрачиваемой мощности (табл. 4) и времени в пути, которое рассчитывалось на основе эксплуатационной скорости (табл. 1) и протяженности судоходных трасс.

Средний удельный расход топлива судовых дизельных двигателей принят на уровне $0,18 \cdot 10^{-3}$, т/(кВт·ч) на основе данных [33] для судов, построенных после 2000 г. Суточный расход топлива в порту принят равным 19,3 т согласно [6], этот же показатель использован для периода технического обслуживания и ремонта судна.

В связи с ожидаемым запретом на остаточные виды топлива в Арктике [34, 35] для перехода по СМП принято использование низкосернистого судового дистиллятного топлива (LSMGO), а по ЮМП — низкосернистого мазута (VLSFO). Средние цены на эти виды топлива, рассчитанные на основе данных Marine Bunker Exchange на момент начала исследования (12.10.2022), составили 1030 долл. США/т для LSMGO и 714 долл. США/т для VLSFO.

Затраты на ледокольную проводку рассчитаны исходя из ее минимального объема, определенного на основе ледовых условий и критериев допуска судов в акваторию СМП [9], что обусловлено ограниченным числом ледоколов.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ

Для поиска путей снижения совокупной стоимости транспортировки проведен анализ процентной структуры годовых эксплуатационных затрат с учетом ежегодного возврата капитальных затрат, затрат на вложенный капитал и амортизационных отчислений для судов, перевозящих нефть до порта Циндао без перевалки или до перевалочного пункта в районе Петропавловска-Камчатского. На рис. 3 представлен график, иллюстрирующий распределение этих затрат по категориям.

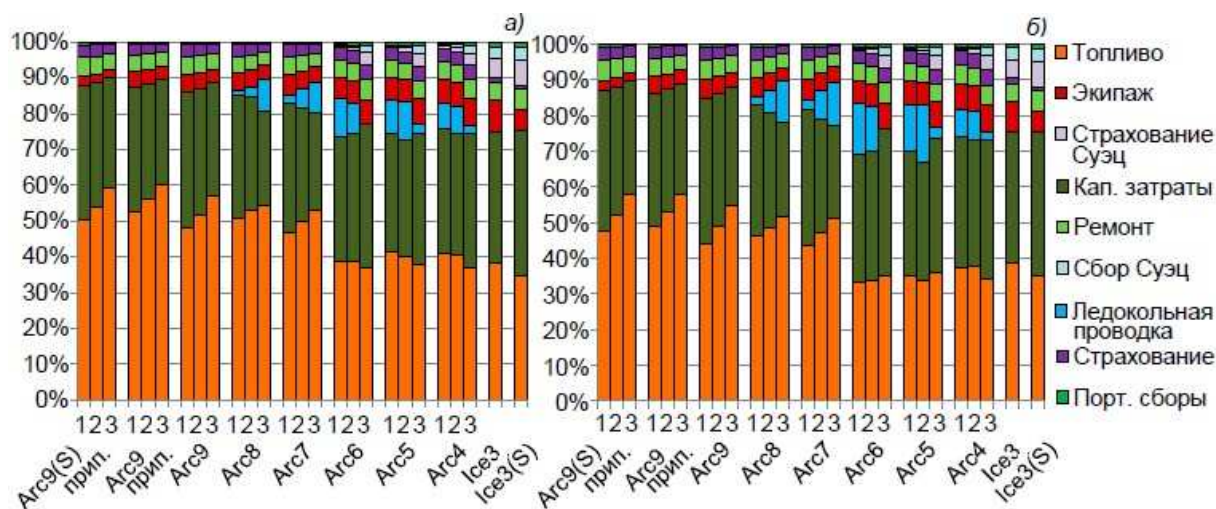


Рис. 3. Процентная структура годовых эксплуатационных затрат и ежегодного возврата капитальных затрат, затрат на вложенный капитал и амортизационных отчислений судов размерных групп Panamax и Suezmax (S):

a — без перевалки; *б* — с перевалкой; 1 — оптимистический сценарий; 2 — базовый сценарий; 3 — пессимистический сценарий

Представление данных в графическом формате вместо точных числовых значений обусловлено стратегической оценкой проекта, где важнее выявление структуры затрат и их влияния на эффективность, чем детализация показателей. Такой подход обеспечивает универсальность анализа в условиях неопределенности входных данных для реализации реального проекта.

Топливные затраты являются основным компонентом годовых эксплуатационных затрат. При транспортировке нефти без перевалки они составляют около 40 % для судов ледовых классов Ice3, Arc4 — Arc6 и 50 — 60 % для судов ледовых классов Arc7 — Arc9. В случае транспортировки с перевалкой доля топливных затрат снижается в среднем на 3 — 5 % для судов всех ледовых классов.

Снижение доли топливных затрат и рост числа доставок судами ледовых классов Arc7 — Arc9 на 40 % в оптимистическом и базовом сценариях и на 20 — 30 % в пессимистическом (табл. 2) указывает, что транспортировка нефти с перевалкой повышает эффективность использования судов высоких ледовых классов.

Доля капитальных затрат для судов ледовых классов Ice3, Arc4 — Arc6 в среднем сопоставима с затратами на топливо. Для судов ледовых классов Arc7 — Arc9 топливные затраты превышают капитальные в 1,5 раза.

Доля затрат на ледокольную проводку варьируется от 1 — 10 % при транспортировке без перевалки, до 2 — 16 % с перевалкой, что сопоставимо с расходами на экипаж, ремонт и страхование судов. Для судов ледовых классов Arc4 — Arc6, выполняющих комбинированные рейсы по СМП и ЮМП, доля затрат на ледокольную проводку выше в оптимистическом и базовом сценариях из-за ограничений их эксплуатации в тяжелых ледовых условиях. Для судов классов Arc7 — Arc8, эксплуатируемых круглогодично на СМП, доля этих затрат максимальна в пессимистическом сценарии.

В пессимистическом сценарии у судов Arc6 отсутствовали затраты на ледокольную проводку, так как, согласно [9], при тяжелых ледовых условиях они не допускаются на СМП даже под проводкой ледокола, а в условиях средней тяжести могут двигаться самостоятельно.

Суда размерной группы Suezmax демонстрируют схожую структуру затрат с судами размерной группы Panamax своего ледового класса, с незначительным снижением доли топливных затрат и увеличением доли капитальных затрат.

Анализ эксплуатационных затрат указывает на необходимость повышения топливной эффективности и оптимизации ледопроеходимости судов как на этапе их проектирования (включая обоснованный выбор ледового класса), так и в ходе их эксплуатации. В процессе эксплуатации снижение затрат на топливо может быть достигнуто за счет оптимизации скорости движения судов. Кроме того, согласование скидок на тарифы на ледокольную проводку (допускается политикой ФГУП «Атомфлот» [19]) может позволить увеличить объем проводки без пропорционального роста затрат на нее, позволяя судам дольше следовать за ледоколом и снижать расход топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлена модель годовой эксплуатации наливных судов ледовых классов, используемых для транспортировки нефти по СМП в Азию. На ее основе проведен расчет постоянных и переменных эксплуатационных затрат на транспортировку нефти наливными судами во всем диапазоне арктических ледовых классов по СМП, а также конвенциональными наливными судами по ЮМП. Для комплексного анализа эффективности были определены капитальные затраты на постройку наливных судов. Расчетные значения указанных величин получены на основе реалистичных входных данных с учетом перспективных изменений в судоходстве.

Данное исследование направлено на оценку влияния ледового класса судов и особенностей их эксплуатации на экономическую эффективность транспортировки нефти. Результаты исследования показали:

- 1) транспортировка нефти с перевалкой способствует более эффективному использованию потенциала судов высоких ледовых классов, существенно увеличивая количество доставок груза судами ледовых классов Arc7 — Arc9 и обеспечивая снижение доли топливных затрат, что указывает на целесообразность использования перевалки для повышения экономической эффективности транспортировки нефти по СМП;

- 2) для дальнейшего исследования вопросов обеспечения круглогодичной навигации по трассам СМП приоритетное внимание следует уделить наливным судам ледовых классов Arc7 — Arc9 как наиболее перспективным для пополнения флота;

3) для поддержания рентабельности СМП необходимы меры государственной поддержки, включая субсидии на строительство флота, скидки на ледакольную проводку и льготные режимы налогообложения.

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании решений о пополнении флота и выборе оптимальных схем транспортировки нефти при разработке стратегий перевозок в условиях изменчивой ледовой обстановки в Арктике.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на анализ долгосрочной экономической эффективности круглогодичной транспортировки нефти по СМП на протяжении жизненного цикла судна с учетом временной стоимости денег. Кроме того, важным направлением является оценка способности флота наливных судов ледовых классов обеспечивать стабильный вывоз сырьевой базы в условиях зимне-весеннего периода навигации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Как вырос экспорт российской нефти и СПГ. [Электронный ресурс] URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/kitai-zakupaet-novye-sorta-iz-ef-eksport-rossiiskoi-nefti-v-2022-vyros-na-8-spg-44> (дата обращения 20.05.2025).
2. Указ Президента РФ от 31 июля 2022 г. № 512 «Об утверждении Морской доктрины Российской Федерации».
3. Таровик О.В. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев, А.А. Кондратенко // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 86 — 101.
4. Wang D. Feasibility of the Northern Sea Route for oil shipping from the economic and environmental perspective and its influence on China's oil imports / D. Wang, R. Ding, Y. Gong, R. Wang et al. // Marine Policy. — 2020. — Vol. 118. — P. 104006.
5. Faury O. The Northern Sea Route competitiveness for oil tankers / O. Faury, P. Cariou // Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2016. — Vol. 94. — P. 461 — 469.
6. Zhang Y. Shipping efficiency comparison between Northern Sea Route and the conventional Asia-Europe shipping route via Suez Canal / Y. Zhang, Q. Meng, S.H. Ng // Journal of Transport Geography. — 2016. — Vol. 57. — P. 241 — 249.
7. Штрек А.А. Оценка возможности вывоза нефти из района Хатанги по СМП танкерами класса Aframax / А.А. Штрек // Offshore Russia. — 2018. — №1 (19). — С. 24 — 27.
8. Афонин А.Б. Разработка методов оценки проходных глубин на трассах северного морского пути в зависимости от подробности съемки рельефа дна / А.Б. Афонин, Е.О. Ольховик, А.Л. Тезиков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — №4 (38). — С. 62 — 68.
9. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути».
10. Апполонов Е.М. Развитие методов определения ледовых нагрузок и требований к конструкциям ледовых усилений / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Арктика: экология и экономика. — 2020. — №1 (37). — С. 65 — 81.
11. Тряскин В.Н. Методические рекомендации для обоснования допустимых условий эксплуатации судна во льдах / В.Н. Тряскин, М.А. Кутейников, С.О. Рудь, Н.А. Крупина и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 11 — 22.
12. Иконников А.Ф. Оценка стоимости судов: уч. пос. / А.Ф. Иконников, Е.В. Маслюк. — Калининград: БИЭФ, 2004. — 107 с.
13. Про зарплат в танкерном флоте. [Электронный ресурс] URL: <https://seanews.ru/2020/06/23/ru-pro-zarplaty-v-tankernom-flote/> (дата обращения 20.05.2025).
14. Приказ Министерства транспорта РФ от 23 ноября 2020 г. № 504 «Об утверждении Положения о минимальном составе экипажей самоходных транспортных судов».
15. Федеральный закон от 05.08.2000 № 117-ФЗ «Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая)». [Электронный ресурс] URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 07.08.2024).
16. Проект постановления Правительства Российской Федерации «О расходах на рацион питания экипажей морских и речных судов, за исключением судов рыбопромыслового флота». [Электронный ресурс] URL: <https://www.mintrans.gov.ru/documents/3/263> (дата обращения 20.05.2025).
17. Hino M. Progress of Maritime Shipping Industry and Current Situation / M. Hino; Financial Department of Ehime Bank. — 2011. (На яп. языке.)
18. Kitagawa H. The Northern Sea Route, the shortest sea route linking East Asia and Europe / H. Kitagawa. — Tokyo: Ship and Ocean Foundation, 2001. — 238 p.
19. Приказ Федеральной службы по тарифам от 4 марта 2014 г. № 45-т/1 «Об утверждении тарифов на ледакольную проводку судов, оказываемую ФГУП "Атомфлот" в акватории Северного морского пути».
20. Upadhyaya S. Piracy in the Gulf of Aden: Naval challenges / S. Upadhyaya // Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India. — 2010. — Vol. 6, No. 2. — P. 133 — 147.
21. Furuichi M. Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez Canal Route / M. Furuichi, N. Otsuka // Maritime Economics & Logistics. — 2015. — Vol. 17, No. 1. — P. 9 — 31.
22. Сулов А.Н. Метод определения массы корпуса наливных судов ледового плавания на начальных стадиях проектирования / А.Н. Сулов, Е.Ю. Линник // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 2-2 (56). — С. 15 — 21.
23. Kristensen H.O. Prediction of resistance and propulsion power of ships. Project no. 2010-56 / H.O. Kristensen, M. Lützen // Emissionsbeslutningsstottesystem. — 2012. — Work Package 2, Report no. 04.
24. Косоротов А.В. Метод оценки буксировочного сопротивления современных ледоколов и судов ледового плавания на чистой воде / А.В. Косоротов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 1 (391). — С. 29 — 41.
25. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2022.

26. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
27. Lindquist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships // POAC'89. — 1989.
28. Правила обмера морских судов / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2022.
29. Чижков Ю.В. Арктическая морская транспортная система / Ю.В. Чижков. — СПб.: Медиапайр, 2021. — 96 с.
30. «Роснефть» переплатит за танкер для перевозки нефти: СМИ. [Электронный ресурс] URL: www.eadaily.com/ru/news/2018/12/24/rosneft-pereplatit-za-tanker-dlya-perevozki-nefti-smi (дата обращения 20.05.2025).
31. Постановление Правительства РФ от 4 декабря 2019 г. № 1584 «Правила предоставления субсидий из федерального бюджета российским организациям на финансовое обеспечение части затрат, связанных со строительством крупнотоннажных судов».
32. Консолидированная финансовая отчетность за 2020 год по МСФО. [Электронный ресурс] URL: <https://www.scf-group.com/investors/disclosure/financialstatementsinrubles/?year=2020> (дата обращения 20.05.2025).
33. Winther M. Fuel consumption and emissions from navigation in Denmark from 1990-2005 — and projections from 2006-2030. Technical Report No. 650 / M. Winther // National Environmental Research Institute. — 2007.
34. 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.
35. Resolution MEPC.329(76) 2021 Amendments to the Annex of the International convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto.

REFERENCES

1. Kak vyros eksport rossiiskoi nefiti i SPG [How Russian oil and LNG exports have grown]. URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/kitai-zakupayet-novye-sorta-iz-rf-eksport-rossiiskoi-nefti-v-2022-vyros-na-8-spg-44> (accessed 20.05.2025).
2. Ukaz Prezidenta RF ot 31.07.2022 № 512 "Ob utverzhdenii Morskoi doktriny Rossiiskoi Federatsii" [Decree of the President of the Russian Federation No. 512 of Jul 31, 2022 "On the approval of the Maritime Doctrine of the Russian Federation"].
3. Tarovik O.V., Topazh A.G., Krest'yantsev A.B., Kondratenko A.A. Arctic marine transport system simulation: Multidisciplinary approach fundamentals and practical experience. *Arctic: Ecology and Economy*. 2017. No. 1 (25). P. 86 — 101. (In Russ.)
4. Wang D., Ding R., Gong Y., Wang R. et al. Feasibility of the Northern Sea Route for oil shipping from the economic and environmental perspective and its influence on China's oil imports. *Marine Policy*. 2020. Vol. 118. P. 104006.
5. Faury O., Cariou P. The Northern Sea Route competitiveness for oil tankers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2016. Vol. 94. P. 461 — 469.
6. Zhang Y., Meng Q., Ng S.H. Shipping efficiency comparison between Northern Sea Route and the conventional Asia-Europe shipping route via Suez Canal. *Journal of Transport Geography*. 2016. Vol. 57. P. 241 — 249.
7. Shtrek A.A. Otsenka vozmozhnosti vyvoza nefiti iz rayona Khatangi po SMP tankerami klassa Aframax [Assessment of the possibility of oil export from the Khatanga region via the NSR by Aframax-class tankers]. *Offshore Russia*. 2018. No. 1 (19). P. 24 — 27.
8. Afonin A.B., Ol'hovik E.O., Tezikov A.L. Development of the assessment methods of anadromous depths on the Northern Sea Route depending on the detail of survey of the bottom relief. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin of Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping]*. 2016. No. 4 (38). P. 62 — 68. (In Russ.)
9. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 18.09.2020 № 1487 "Ob utverzhdenii Pravil plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti" [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1487 of September 18, 2020 "On the approval of the Rules of navigation in the Northern Sea Route water area"].
10. Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Development of methods for determining ice loads and requirements for ice reinforcement structures. *Arctic: Ecology and Economy*. 2020. No. 1 (37). P. 65 — 81. (In Russ.)
11. Tryaskin V.N., Kuteynikov M.A., Rud S.O., Krupina N.A. et al. Methodological recommendations for justification of allowable conditions for operating of ships in ice. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 11 — 22. (In Russ.)
12. Ikonnikov A.F., Maslyuk E.V. Otsenka stoimosti sudov. Uchebnoe posobie [Assessment of ship cost: a study guide]. Kaliningrad: BIEF, 2004. 107 p.
13. Pro zarplaty v tankernom flote [About salaries in the tanker fleet]. URL: <https://seanews.ru/2020/06/23/ru-pro-zarplaty-v-tankernom-flote/> (accessed 20.05.2025).
14. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 23.11.2020 № 504 "Ob utverzhdenii Polozheniya o minimal'nom sostave ekipazhei samokhodnykh transportnykh sudov" [Order No. 504 of November 23, 2020 of the Ministry of Transport of the Russian Federation "On the approval of the Regulation on the minimum safe manning of self-propelled transport vessels"].
15. Federal'nyi zakon ot 05.08.2000 № 117-FZ "Nalogovyi kodeks Rossiiskoi Federatsii (chast' vtoraya)" [Federal Law N 117-FZ of 05.08.2000 "Tax Code of the Russian Federation (Part Two)"]. URL: <http://www.consultant.ru> (accessed 07.08.2024).
16. Proekt postanovleniya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii "O raskhodakh na ratsion pitaniya ekipazhey morskikh i rechnykh sudov, za isklyucheniem sudov rybopromyslovogo flota" [Draft resolution of the Government of the Russian Federation on expenses for the diet of crews of sea and river vessels, except for fishing fleet vessels]. URL: <https://www.mintrans.gov.ru/documents/3/263> (accessed 20.05.2025).
17. Hino M. Progress of maritime shipping industry and current situation / Financial Department of Ehime Bank. 2011. (In Japanese.)
18. Kitagawa H. The Northern Sea Route, the shortest sea route linking East Asia and Europe. Tokyo: Ship and Ocean Foundation, 2001. 238 p.
19. Prikaz Federal'noi sluzhby po tarifam ot 4 marta 2014 g. № 45-t/1 "Ob utverzhdenii tarifov na ledokol'nuyu provodku sudov, okazyvaemuyu FGUP "Atomflot" v akvatorii Severnogo morskogo puti". Order No. 45-t/1 of March 4, 2014 of the Federal Tariff Service "On the Approval of Tariffs for Icebreaker Assistance Provided by FSUE "Atomflot" in the Water Area of the Northern Sea Route".
20. Upadhyaya S. Piracy in the Gulf of Aden: Naval challenges. *Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India*. 2010. Vol. 6, No. 2. P. 133 — 147.
21. Furuichi M., Otsuka N. Proposing a common platform of shipping cost analysis of the Northern Sea Route and the Suez Canal Route. *Maritime Economics & Logistics*. 2015. Vol. 17, No. 1. P. 9 — 31.
22. Suslov A.N., Linnik E.Y. Method for determining the weight of the hull of ice-going tankers at the initial stages of design. *Marine Intellectual Technologies*. 2022. No. 2-2(56). P. 15 — 21. (In Russ.)

23. Kristensen H.O., Lützen M. Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ships. Project no. 2010-56. *Emissionsbeslutningsstøttesystem*. 2012. Work Package 2, Report no. 04.
24. Kosorotov A.V. Towing resistance assessment method for modern icebreakers and ice-going vessels in open water. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. No. 1 (391). P. 29 — 41. (In Russ.)
25. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII: Machinery Installations / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022.
26. Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Ryvlin A.Y. Soprotivleniye l'da dvizheniyu sudna [Ice resistance of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1968. 238 p.
27. Lindquist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. *Proceedings of POAC'89*. 1989.
28. Rules for the tonnage measurement of sea-going ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022.
29. Chizhkov Yu.V. Arkticheskaya morskaya transportnaya sistema [Arctic Maritime Transport System]. St. Petersburg: Mediapapir, 2021. 96 p.
30. "Rosneft" pereplatit za tanker dlya perevozki nefii: SMI ["Rosneft" to overpay for oil tanker: Media reports]. URL: <https://www.eadaily.com/ru/news/2018/12/24/rosneft-pereplatit-za-tanker-dlya-perevozki-nefti-smi> (accessed 20.05.2025).
31. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 04.12.2019 № 1584 "Pravila predostavleniya subsidii iz federal'nogo byudzheta rossiiskim organizatsiyam na finansovoe obespechenie chasti zatrat, svyazannykh so stroitel'stvom krupnotonnazhnykh sudov" [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1584 of December 4, 2019 "Rules for Providing Subsidies from the Federal Budget to Russian Organizations for Financial Support of Part of the Costs Associated with the Construction of Large-Capacity Ships"].
32. Konsolidirovannaya finansovaya otchetnost' za 2020 god po MSFO [Consolidated financial statements for 2020 under IFRS]. URL: <https://www.scf-group.com/investors/disclosure/financialstatementsinrubles/?year=2020> (accessed 20.05.2025).
33. Winther M. Fuel consumption and emissions from navigation in Denmark from 1990-2005 — and projections from 2006-2030. Technical Report No. 650. *National Environmental Research Institute*. 2007.
34. 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.)
35. Resolution MEPC.329(76) 2021 Amendments to the Annex of the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 531.391.1 + 532.5.011
EDN GIZBFY

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВОЛН ПРИ ДВИЖЕНИИ НЕКОТОРЫХ ТЕЛ ПРОСТОЙ ФОРМЫ В СВОБОДНОМ ПОТОКЕ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Е.Ю. Чебан, д-р техн. наук, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

А.И. Кожевников, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nkolonget@ro.ru

Д.В. Никущенко, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: dmitry@nikushchenko.ru

В статье рассматриваются особенности волнообразования при движении со скоростями от 7 м/с до 11,7 м/с тел различной формы: шара, эллипсоида, модифицированного тела Вигли и продольного цилиндра с обтекателями с $L/B = 1, 2, 4, 6, 8, 16$ при изменении осадок от 0,465 м до 0,865 м. Представлены результаты численного моделирования с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarineTM. Приведены зависимости коэффициентов полного сопротивления и высот генерируемых волн от чисел Фруда. Показано влияние основных размеров и формы тел на коэффициент полного сопротивления и генерируемых высот волн, а также нелинейность процесса волнообразования при изменении размеров тел и осадок. Полученные результаты будут использованы для исследований в области снижения волнового сопротивления большегрузного катамарана за счет интерференции волновых систем, создаваемых его корпусами и устанавливаемым в междукорпусном пространстве дополнительным телом, образующим с судном единый гидродинамический комплекс.

Ключевые слова: волнообразование, вычислительная гидродинамика, волновое сопротивление, эллипсоид, движение тел в неограниченном потоке, тело Вигли, большегрузный катамаран, корабельные волны.

Для цитирования: Чебан Е.Ю. Оценка параметров волн при движении некоторых тел простой формы в свободном потоке численными методами / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников, Д.В. Никущенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 39 — 51. — EDN GIZBFY.

A STUDY OF SOME SIMPLE-SHAPE BODIES WAVE GENERATION DURING MOTION IN THE UNRESTRICTED FLOW

E.Yu. Cheban, DSc, Volga State University of Water Transport, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

A.I. Kozhevnikov, PhD student, Volga State University of Water Transport, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5, e-mail: nkolonget@ro.ru

D.V. Nikushchenko, DSc, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: dmitry@nikushchenko.ru

The article considers the features of wave formation during movement at speeds from 7 m/s to 11.7 m/s of bodies of various shapes: a sphere, an ellipsoid, a modified Wigley hull and a longitudinal cylinder with fairings with $L/B = 1, 2, 4, 6, 8, 16$ and a range of draft from 0.465 m to 0.865 m. The results of numerical modeling using the NUMECA/FineMarineTM software package are presented. The dependences of the coefficients of total resistance and heights of generated waves on the Froude numbers are presented. The influence of the main dimensions and shape of bodies on the coefficient of total resistance and generated wave heights is shown,

as well as the nonlinearity of the wave formation process when changing the dimensions of bodies and drafts. The results obtained will be used for research in the field of reducing the wave resistance of a heavy-duty catamaran due to the interference of wave systems created by its hulls and an additional body installed in the interhull space, forming a general hydrodynamic complex with the vessel.

Key words: *ship's wave, computational fluid dynamics (CFD), wave resistance, ellipsoid, unlimited flow, Wigley hull, large-cargo catamarans, wave interference, wave height.*

For citation: Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Nikushchenko D.V. A study of some simple-shape bodies wave generation during motion in the unrestricted flow. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 39 — 51. EDN GIZBFY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения скорости перевозок грузов в прибрежной морской зоне и на внутренних водных путях является использование накатных судов смешанного плавания катамаранного типа грузоподъемностью более 5000 т.

Гидродинамическое взаимодействие корпусов судов катамаранного типа приводит к изменению вызванных скоростей их обтекания, что существенно сказывается на структуре волнообразования и волновом сопротивлении. Процесс волнового взаимодействия зависит от числа Фруда и взаимного расположения корпусов. При этом может наблюдаться как значительный рост, так и снижение волнового сопротивления по сравнению с суммарным волновым сопротивлением изолированных корпусов, что обусловлено процессами трансформации волн в междукорпусном пространстве.

Снижение высот волн в междукорпусном пространстве может быть достигнуто за счет размещения там дополнительного тела (или тел), входящего в единый гидродинамический комплекс вместе с корпусами катамарана (рис. 1). Итоговая интерференционная волновая картина для такого комплекса будет напрямую зависеть от положения, осадки, размеров и формы используемого тела. Оптимизация этих параметров может позволить существенно снизить волновое сопротивление. Данный тезис подтверждается, например, работой [1] А. Mandru и F. Pasuragu, посвященной улучшению гидродинамических характеристик катамарана путем установки тела эллиптической формы между корпусами. Эксперименты проводились в опытовом бассейне с моделью в масштабе 1:32 в диапазоне чисел Фруда от 0,1 до 0,8 для трех различных глубин и двух положений вдоль корпуса (нос и корма), с центром тела в диаметральной плоскости судна. По результатам исследований было установлено, что в диапазоне чисел Фруда 0,4 — 0,6 полученные значения коэффициентов сопротивления для всех вариантов размещения тела меньше, чем в случае без его использования.

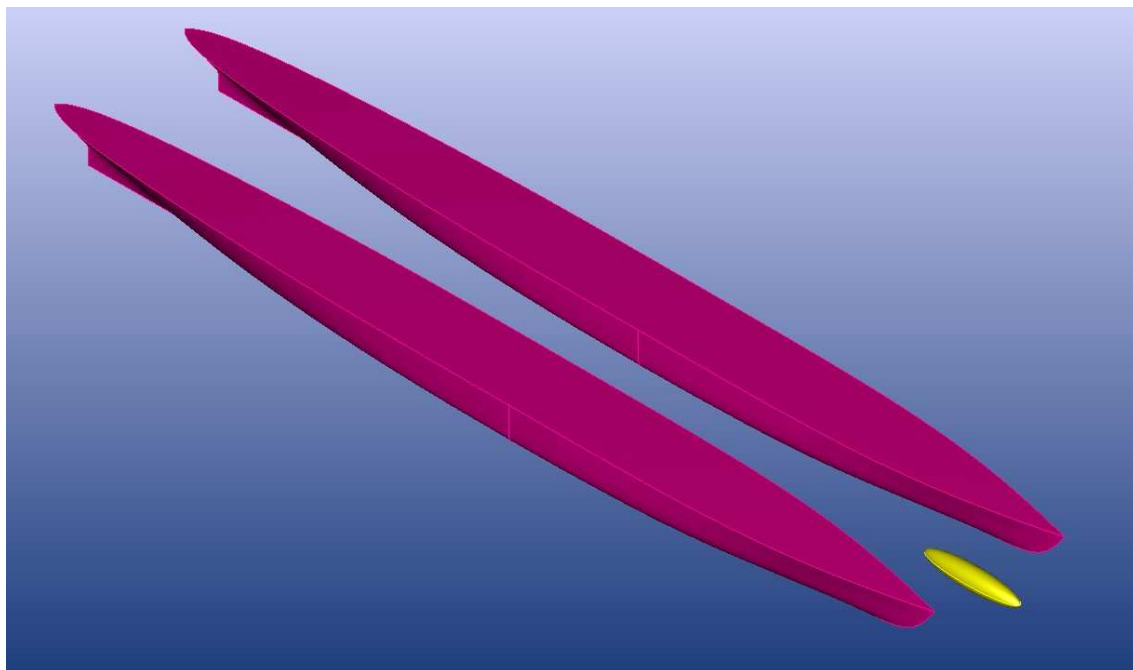


Рис. 1. Твердотельная геометрия катамарана с поплавком-бульбом

Ряд работ посвящен схожим исследованиям, проведенным с использованием численных методов. Так, G.K. Saha, K. Suzuki и H. Kai в статье [2] привели результаты расчетов, согласно которым корпус катамарана с установленным в междукорпусном пространстве телом при $Fr=0,45$ позволил снизить волновое сопротивление более чем на 65 %, а при $Fr=0,5$ — на 50 % по отношению к первоначальному значению для корпуса катамарана без тела. В работе [3] D.B. Danisman с применением искусственной нейронной сети провел аналогичные исследования, подтвержденные впоследствии экспериментом, в результате которых было отмечено снижение волнового сопротивления на 15 % для числа Фруда 0,6.

Приведенные результаты исследований не охватывают диапазоны скоростей, характерных для большегрузных речных катамаранов, основная скорость движения которых соответствует диапазону чисел Фруда от 0,181 до 0,303. В решении задачи снижения волнового сопротивления такого типа судов могут помочь результаты волновых картин тел различных форм, планируемых к установке в междукорпусном пространстве. В виду меньших размеров, чем корпуса судна, значения чисел Фруда для некоторых таких тел соответствуют значениям критических скоростей или даже превышают их.

Среди исследований волнового сопротивления простых тел в первую очередь необходимо выделить теоретические работы Т.Н. Havelock [4, 5], в которых волновое сопротивление сферы и эллипсоида определялось с помощью интеграла Мичелла. Волновое сопротивление эллипсоида и сферы с учетом мелководья теоретически исследовалось М. Kinoshita и Т. Inui [6]. В статье [7] исследовались двумерные тела с целью определения минимального сопротивления для диапазона чисел Рейнольдса от 20 до 105, что позволило оценить влияние ламинарно-турбулентного перехода.

В работе G.P. Benham и др. [8] на основе экспериментов в опытовом бассейне исследовано влияние асимметрии тел на их волновое сопротивление. В этой же работе представлен модифицированный интеграл Мичелла, позволяющий учесть влияние пограничного слоя. Показано, что асимметрия может иметь как положительное, так и отрицательное влияние на сопротивление в зависимости от глубины потока и числа Фруда.

Однако приведенные работы в большей степени посвящены исследованию сопротивления тел с целью его минимизации и не дают информации о параметрах образующихся при их движении волн, которая необходима для оценки возможности их использования в качестве поплавков-бульбов катамаранов. Кроме того, диапазоны чисел Фруда не отвечают скоростям движения большегрузных катамаранов.

С другой стороны, появление дополнительного элемента корпуса катамарана повлечет за собой введение требований к его конструкции, размещению и т.д., регулируемых классификационными обществами, в том числе Российским морским регистром судоходства [9]. Для разработки подобных требований необходимы данные о гидродинамических характеристиках поплавков-бульбов, в том числе параметры генерируемых ими волн.

Таким образом, целью настоящей работы является оценка зависимости параметров корабельных волн от скорости движения и размеров тел простой формы в безграничном потоке.

Представленные результаты исследований являются продолжением работы [10].

1. ОБЩИЙ ПОДХОД К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ ПРОСТЫХ ТЕЛ

Численное моделирование с использованием коммерческих программных продуктов позволяет существенно сэкономить время и ресурсы, при этом гибкость и удобство задания параметров позволяет быстрее проанализировать полученные результаты. В настоящей работе для исследования волнообразования при движении тел простой формы на глубокой воде в свободном потоке использовался программный комплекс NUMECA/FineMarineTM, результаты решения которого хорошо согласуются с экспериментальными данными [11, 12].

Исследования проводились при различных осадках для четырех типов форм тел, симметричных относительно диаметральной плоскости (рис. 2): шара, эллипсоида, модифицированного тела Вигли, отраженного относительно палубы, а также цилиндрического тела с обтекателями.

Варьируемые в ходе моделирования размерения исследуемых тел и скорости их движения представлены в табл. 1. Параметры тел выбирались с учетом дальнейшей возможности их использования для снижения волнового сопротивления большегрузного катамарана [13].

Необходимо отметить, что движение поплавков-бульбов происходит при повышенных по сравнению с катамараном числах Фруда и Рейнольдса (табл. 2 и 3), что приводит к сложным гидродинамическим явлениям, которые необходимо учитывать при построении сетки, задании размеров расчетной области и граничных условий.

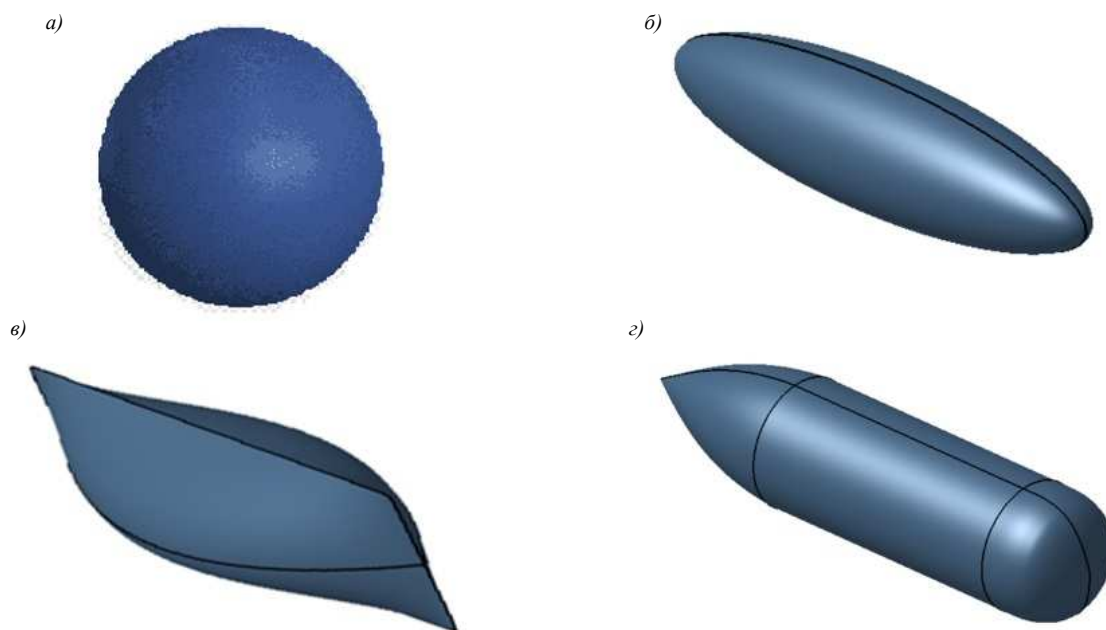


Рис. 2. Твердотельная геометрия исследуемых форм тел:
 а — шар; б — эллипсоид; в — модифицированное тело Вигли; г — цилиндр с обтекателями

Таблица 1

Основные размеры исследуемых тел и их скорости движения

Форма	L	L/B	B/T	Скорость, v , (м/с)
Шар	1,73	1	2	
Эллипсоид Модифицированное тело Вигли Цилиндр с обтекателями	3,64; 7,30; 14,60; 29,20	2; 4; 8; 16	3,72; 3,06; 2,60; 2,26; 2,00	

Таблица 2

Числа Фруда при движении тел

Длина, L , м	Скорость, м/с						
	7,0	7,5	8,1	8,6	9,17	9,7	11,7
1,73	1,70	1,82	1,97	2,09	2,23	2,35	2,84
3,64	1,17	1,26	1,36	1,44	1,53	1,62	1,96
7,3	0,83	0,89	0,96	1,02	1,08	1,15	1,38
14,6	0,58	0,63	0,68	0,72	0,77	0,81	0,98
29,2	0,41	0,44	0,48	0,51	0,54	0,57	0,69

Таблица 3

Числа Рейнольдса при движении тел

Длина, L , м	Скорость, м/с						
	7,0	7,5	8,1	8,6	9,17	9,7	11,7
1,73	$7,99 \cdot 10^6$	$8,56 \cdot 10^6$	$9,25 \cdot 10^6$	$9,82 \cdot 10^6$	$10,47 \cdot 10^6$	$11,08 \cdot 10^6$	$13,36 \cdot 10^6$
3,64	$16,82 \cdot 10^6$	$18,02 \cdot 10^6$	$19,46 \cdot 10^6$	$20,66 \cdot 10^6$	$22,03 \cdot 10^6$	$23,31 \cdot 10^6$	$28,11 \cdot 10^6$
7,30	$33,73 \cdot 10^6$	$36,14 \cdot 10^6$	$39,03 \cdot 10^6$	$41,44 \cdot 10^6$	$44,19 \cdot 10^6$	$46,74 \cdot 10^6$	$56,38 \cdot 10^6$
14,60	$67,46 \cdot 10^6$	$72,28 \cdot 10^6$	$78,06 \cdot 10^6$	$82,88 \cdot 10^6$	$88,37 \cdot 10^6$	$93,48 \cdot 10^6$	$112,75 \cdot 10^6$
29,20	$134,92 \cdot 10^6$	$144,55 \cdot 10^6$	$156,12 \cdot 10^6$	$165,76 \cdot 10^6$	$176,74 \cdot 10^6$	$186,96 \cdot 10^6$	$225,50 \cdot 10^6$

Размеры расчетной области и граничные условия выбирались в соответствии с рекомендациями [14 — 16]. В виду симметричности исследуемых тел для уменьшения затрат времени моделировалась только половина тела, рассеченного по диаметральной плоскости с граничным условием «симметрия» (равенство нулю нормальных и касательных составляющих скорости). Ширина расчетной области выбиралась исходя из ранее выполненных исследований [12, 13] с учетом отсутствия трансформации волн на стенках расчетной области и составила $2L_{OA}$ (L_{OA} — длина тела между перпендикулярами). Выполнялось моделирование для глубокой воды, в связи с чем не учитывалось взаимодействие тела и дна водоема, поэтому глубина расчетной области составила $1,5L_{OA}$.

Расположение граничных условий на гранях расчетной области приведено на рис. 3 и в табл. 4.

При моделировании использовалась неструктурированная расчетная сетка, построенная в подпрограмме HEXPRESSTM, с адаптацией по свободной поверхности жидкости и поверхности тела. Параметры сетки определялись по результатам исследования сеточной сходимости.

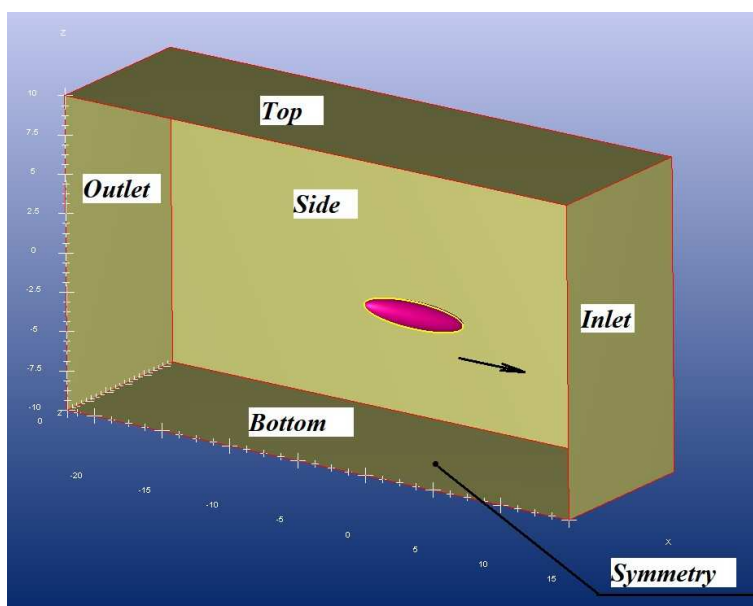


Рис. 3. Общий вид расчетной области

Таблица 4

Граничные условия на гранях расчетной области

Грани	Тип граничного условия
Верх и дно (Top and bottom)	"Prescribed pressure" > "Updated hydrostatic pressure"
Выход-вход-боковая грань (Outlet, Side, Inlet)	"Far field" (velocity components equal to zero)
Плоскость симметрии (Mirror)	"Mirror" (symmetry)
Корпус катера	all solids — "Wall function"

В статье [17] показано, что при повышении числа Фруда угол расхождения волн существенно уменьшается, что было учтено в области изменения волновой поверхности с помощью дополнительного измельчения сетки вблизи тела в форме сектора. Примеры общего вида сетки приведены на рис. 4, а ее параметры — в табл. 5.

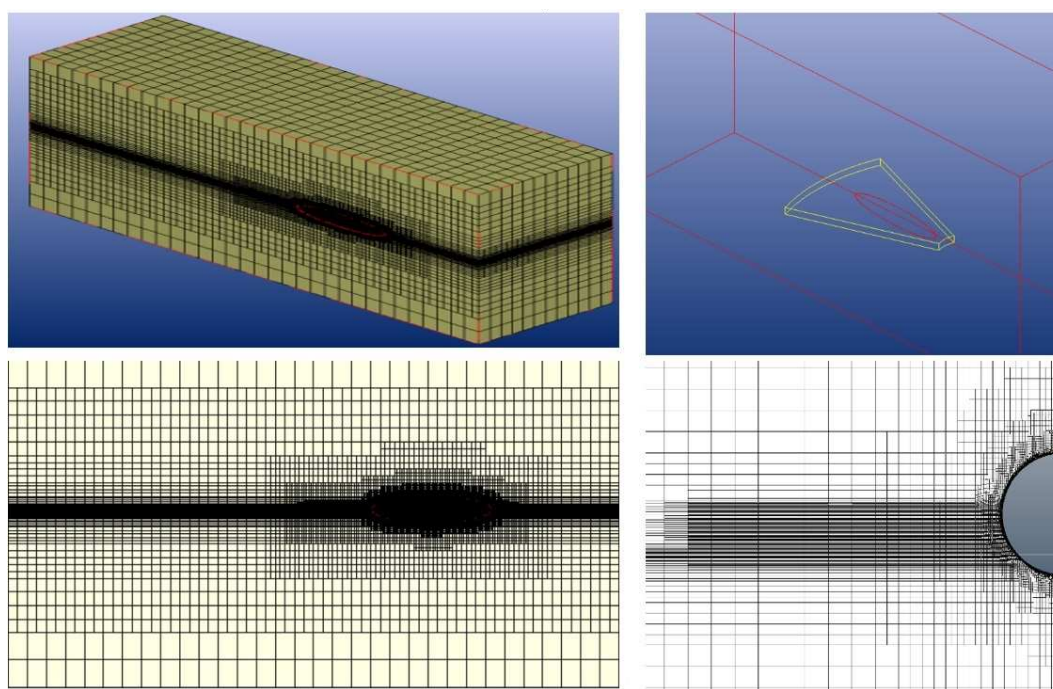


Рис. 4. Пример общего вида расчетной сетки

Таблица 5

Параметры расчетной сетки

Форма тела	Размеры начальной области сетки, м (количество ячеек, шт.)	Адаптация геометрии корпуса	Высота первой ячейки пограничного слоя при $y^+ = 70$ (м)
Шар	32×12×12 (4608)	6	0,000273323
Эллипсоид:			
7,30 м	32×12×12 (4608)	6	0,000258228
14,60 м	32×12×8 (3072)	7	0,000395679
29,20 м	38×12×10 (4560)	7	0,000188729
Модифицированное тело Вигли:			
3,64 м	32×12×12 (4608)	6	0,000236882
7,30 м	32×12×12 (4608)	6	0,000258322
14,60 м	32×12×12 (4608)	7	0,000395424
29,20 м	32×12×12 (4608)	7	0,000679766
Цилиндр с обтекате- лями:			
3,64 м	32×12×12 (4608)	7	0,000283323
7,30 м	30×12×12 (4320)	7	0,000310056
14,60 м	30×12×12 (4320)	6	0,000338118
29,20 м	20×12×12 (2880)	6	0,000368721

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе численного моделирования в общей сложности было выполнено и обработано около 200 вычислительных экспериментов, а также построено более 50 зависимостей с целью создания базы данных по гидродинамическим характеристикам и генерируемым волнам от тел различной формы. Часть материалов, заслуживающих обсуждения, приведена ниже. Так, на рис. 5 приведены зависимости коэффициента полного сопротивления тел от числа Фруда при одинаковой осадке 0,865 м.

Стоит отметить, что модифицированное тело Вигли ввиду меньшей площади смоченной поверхности обладает наименьшим значением коэффициента сопротивления практически во всем диапазоне чисел Фруда и при всех длинах, за исключением $L/B=4$ (14,6 м) (рис. 5в), при которой данные значения имеют наибольшую величину по отношению к остальным телам.

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента сопротивления от числа Фруда для модифицированного тела Вигли и эллипсоида длиной 14,6 м и 7,3 м во всем диапазоне исследуемых осадок.

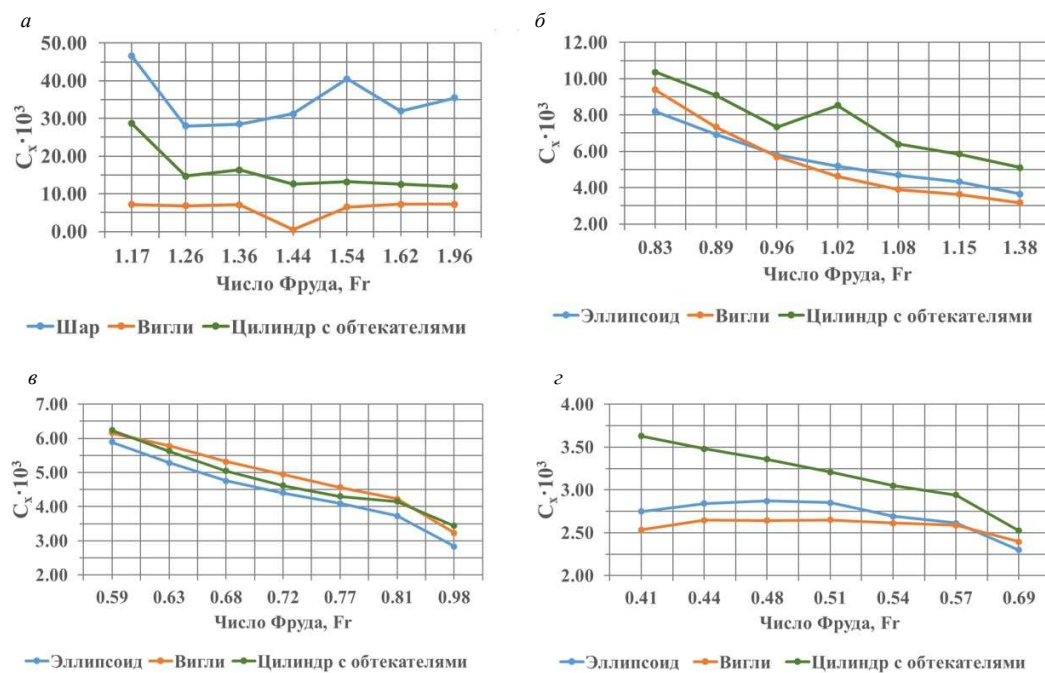


Рис. 5. Коэффициенты сопротивления тел при осадке 0,865 м различной длины:
а — 3,64 м, б — 7,3, в — 14,6, г — 29,2 м

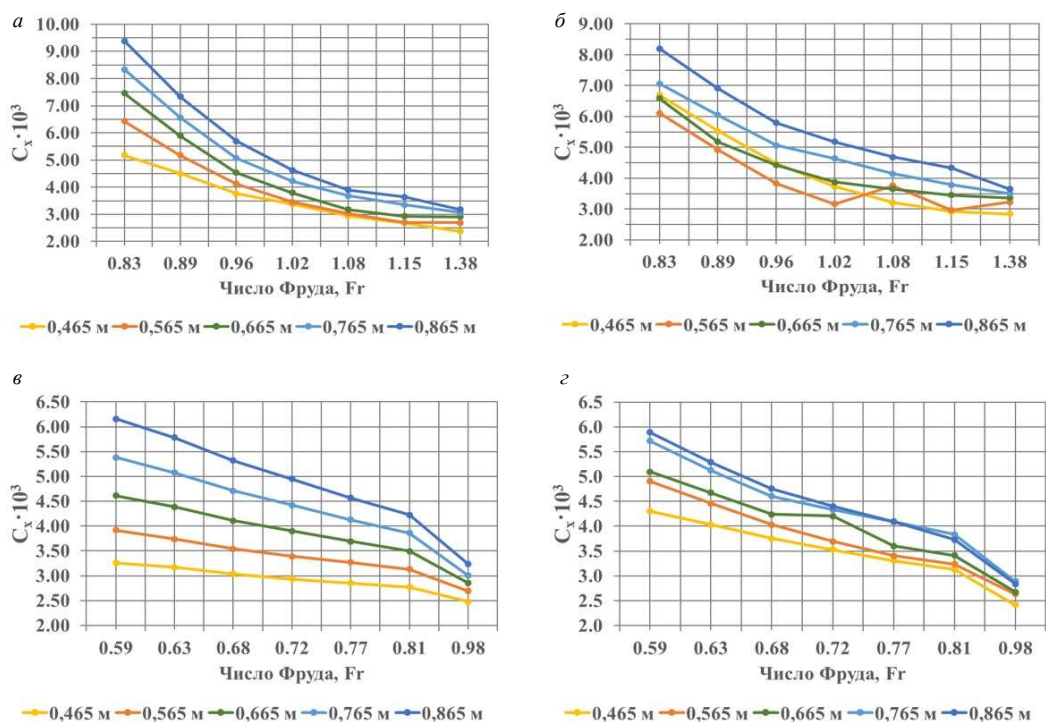


Рис. 6. Коэффициенты сопротивления при различных осадках для тел различной формы и длины:
а — модифицированное тело Вигли $L=7,3$ м; б — эллипсоид $L=7,3$ м;
в — модифицированное тело Вигли $L=14,6$ м; г — эллипсоид $L=14,6$ м

Наблюдается общая тенденция увеличения коэффициентов полного сопротивления с увеличением погружения тела, за исключением эллипсоида длиной 7,3 м. Для данного тела наименьшее значение коэффициента полного сопротивления достигается при осадке 0,565 м, однако при скоростях, соответствующих числам Фруда 1,08 и 1,38, сопротивление остается высоким.

На рис. 7 приведены значения высот волн в корме и носу для тел различных форм и длины при одинаковой осадке 0,865 м.

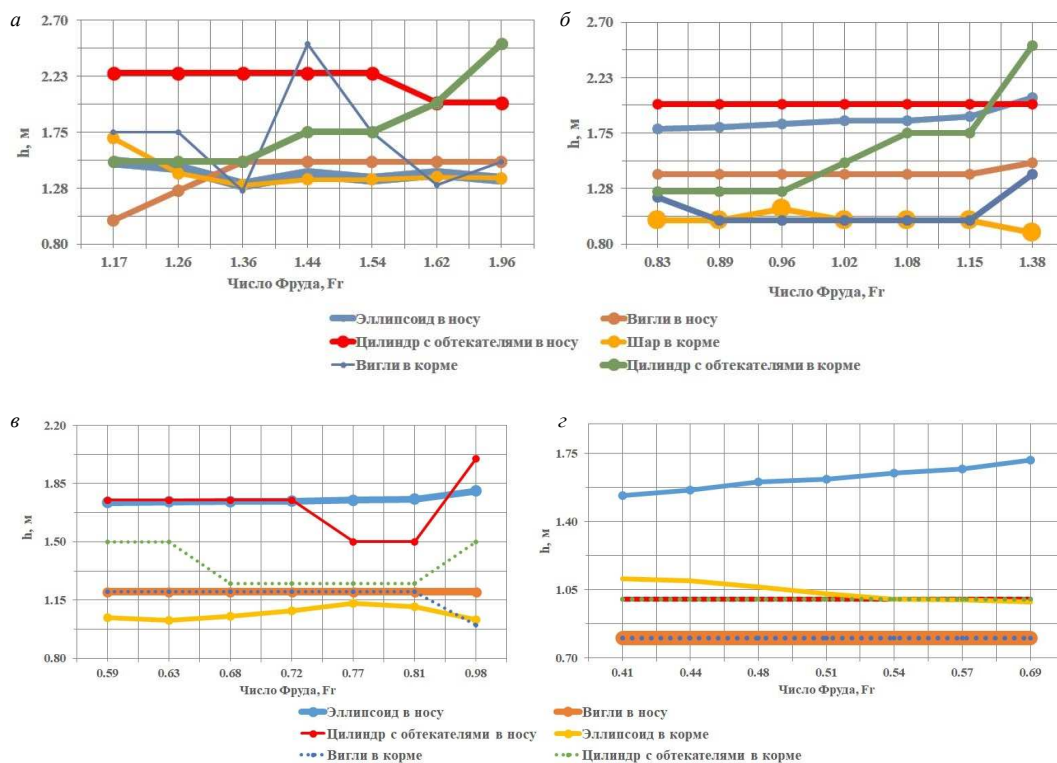


Рис. 7. Высоты волн при осадке 0,865 м для тел различной формы и длины:
а — 3,64 м, б — 7,3, в — 14,6, г — 29,2 м

Из рассмотрения графиков на рис. 7 видно, что самые высокие волны в основном генерируются цилиндром с обтекателями при всех длинах, за исключением $L/B = 16$ (29,2 м). Для модифицированного тела Вигли и цилиндра с обтекателями длиной 3,64 м при числах Фруда 1,44 и 1,96 соответственно наблюдается резкий скачок высоты волны в корме, превышающий по величине высоты волн, генерируемых другими телами. Однако для тела формы Вигли высоты волн в носу имеют среднее значение. Цилиндр с обтекателями генерирует волну такой же высоты при длине 7,3 м и числе Фруда 1,38.

Анализ зависимостей на рис. 8 позволяет установить, что наибольшие высоты волн в носу генерируются эллипсоидом при осадке $T=0,865$ м во всем исследуемом диапазоне чисел Фруда. Модифицированное тело Вигли, в свою очередь, при $L=14,6$ м является источником волн такого же размера при осадке 0,765 м, причем при осадке 0,865 м высоты волн имеют постоянное значение. Максимальные высоты волн наблюдаются у эллипсоида.

На рис. 9 — 11 приведены волновые поверхности при движении различных тел. Совместный анализ рис. 9 и рис. 5б показывает более сильные возмущения в кормовой части у тела формы цилиндра с обтекателями, а также заливание водой, по сравнению с остальными телами, что способствует увеличению площади смоченной поверхности, волнового сопротивления и, соответственно, самого коэффициента полного сопротивления. Протяженность волнового следа при этом короче у цилиндра с обтекателями рис. 9а.

Рис. 10 позволяет наблюдать динамику изменения волновой поверхности при движении эллипсоида и тела Вигли с $L=7,3$ м в зависимости от их погружения. Высоты генерируемых волн при погружении эллипсоида на 0,565 м выше, чем при 0,465 м, что приводит к увеличению волнового сопротивления и, как следствие, коэффициента полного сопротивления, что и видно на графиках рис. 6б.

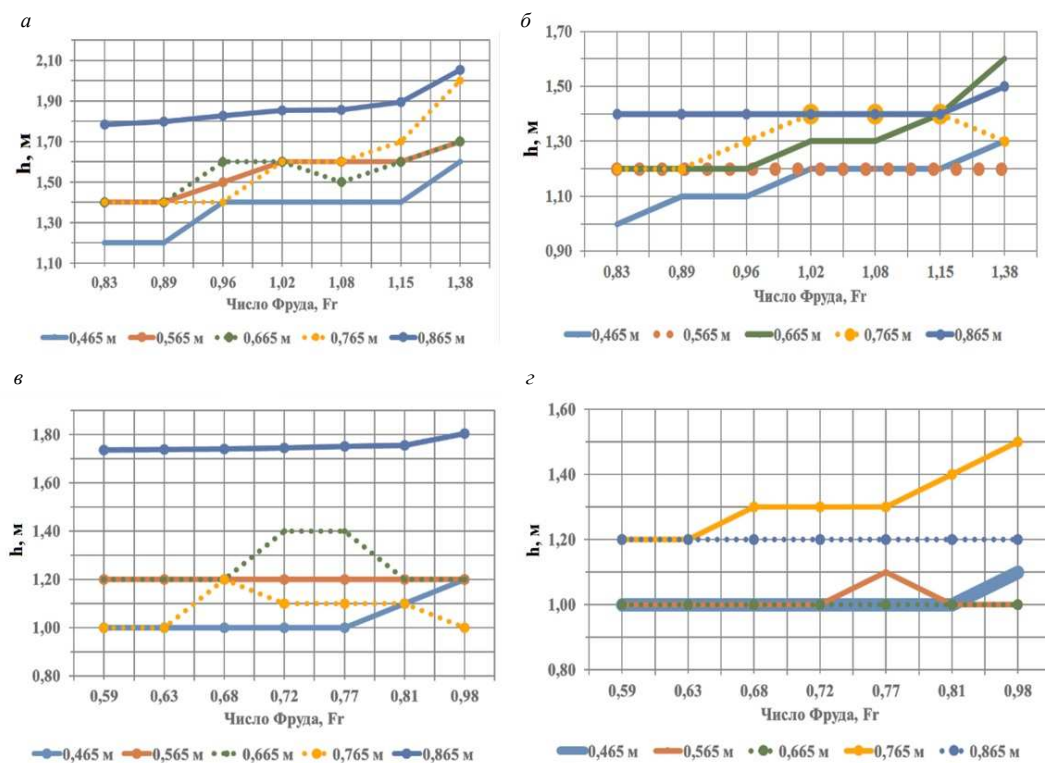


Рис. 8. Высоты волн в носу для тел различной формы и длины:
 а — эллипсоид $L=7,3$ м; б — модифицированное тело Вигли $L=7,3$ м;
 в — эллипсоид $L=14,6$ м; з — модифицированное тело Вигли $L=14,6$ м

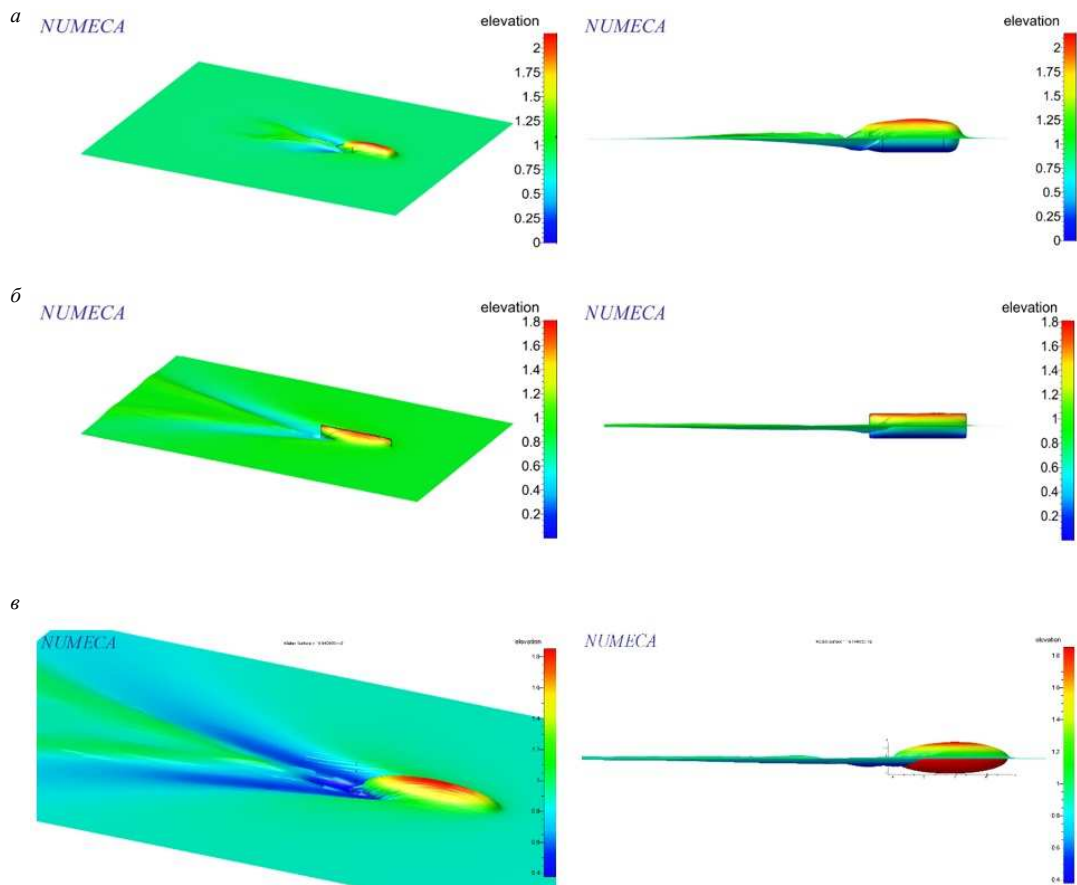


Рис. 9. Волновая поверхность при движении различных тел длиной 7,3 м со скоростью 8,6 м/с ($Fr=1,02$):
 а — цилиндр с обтекателями; б — модифицированное тело Вигли; в — эллипсоид

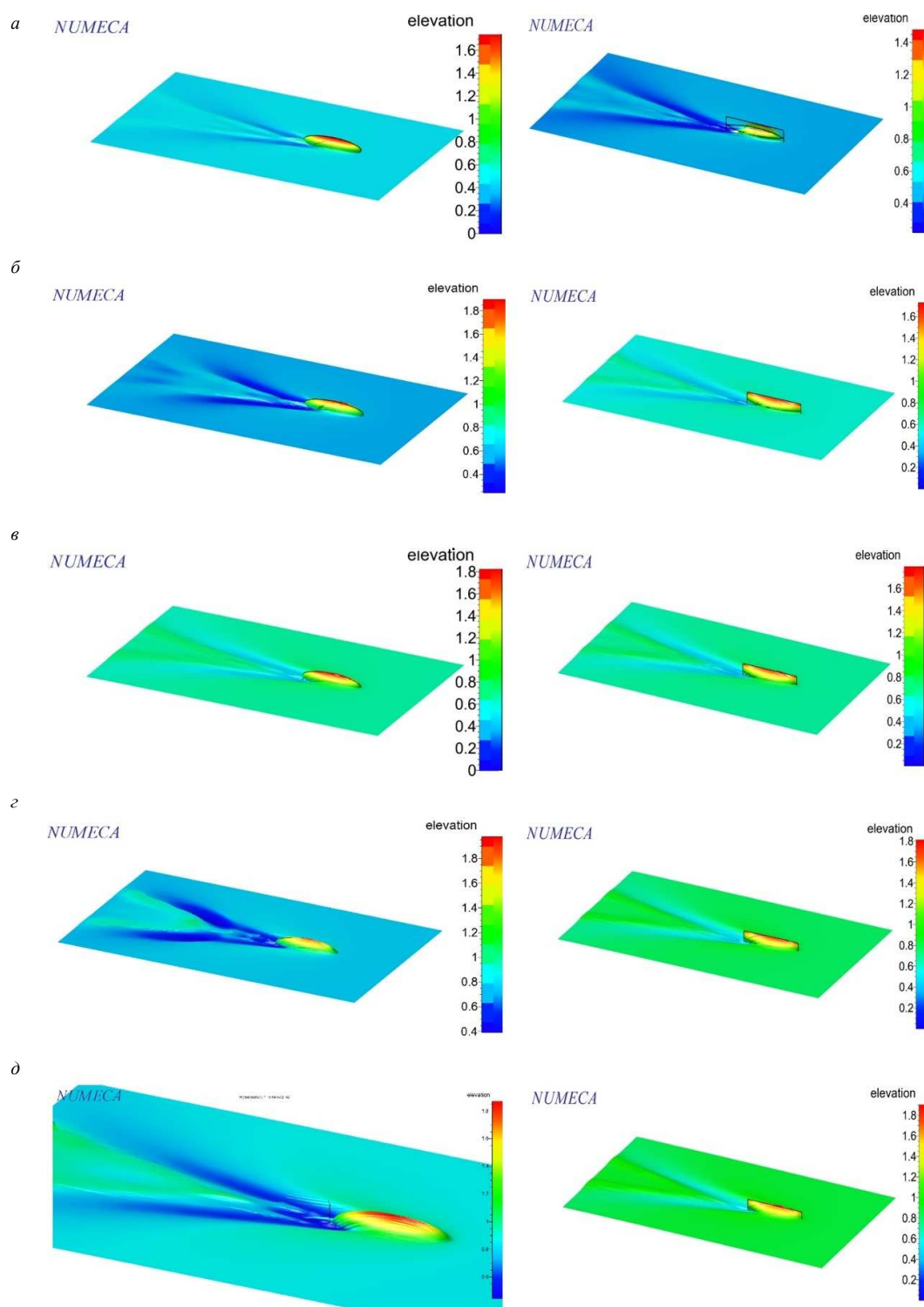


Рис. 10. Волновая поверхность тел (слева эллипсоид, справа модифицированное тело Вигли) с одинаковой длиной 7,3 м и скоростью движения 9,17 м/с ($Fr=1,08$) при различных осадках: а — 0,465 м, б — 0,565, в — 0,665, г — 0,765, д — 0,865 м

На рис. 11 представлена волновая поверхность при движении тел различной формы со скоростью 8,6 м/с (соответствует большому числу $Fr=1,44$) и осадке 0,865 м. Для модифицированного тела Вигли наблюдается максимально высокая величина высоты волны в корме и впадина по отношению к другим телам. Сравнительный анализ высот волн, генерируемых такими телами, приведен на рис. 7а. Однако коэффициент сопротивления у тела Вигли имеет наименьшую величину (рис. 5а).

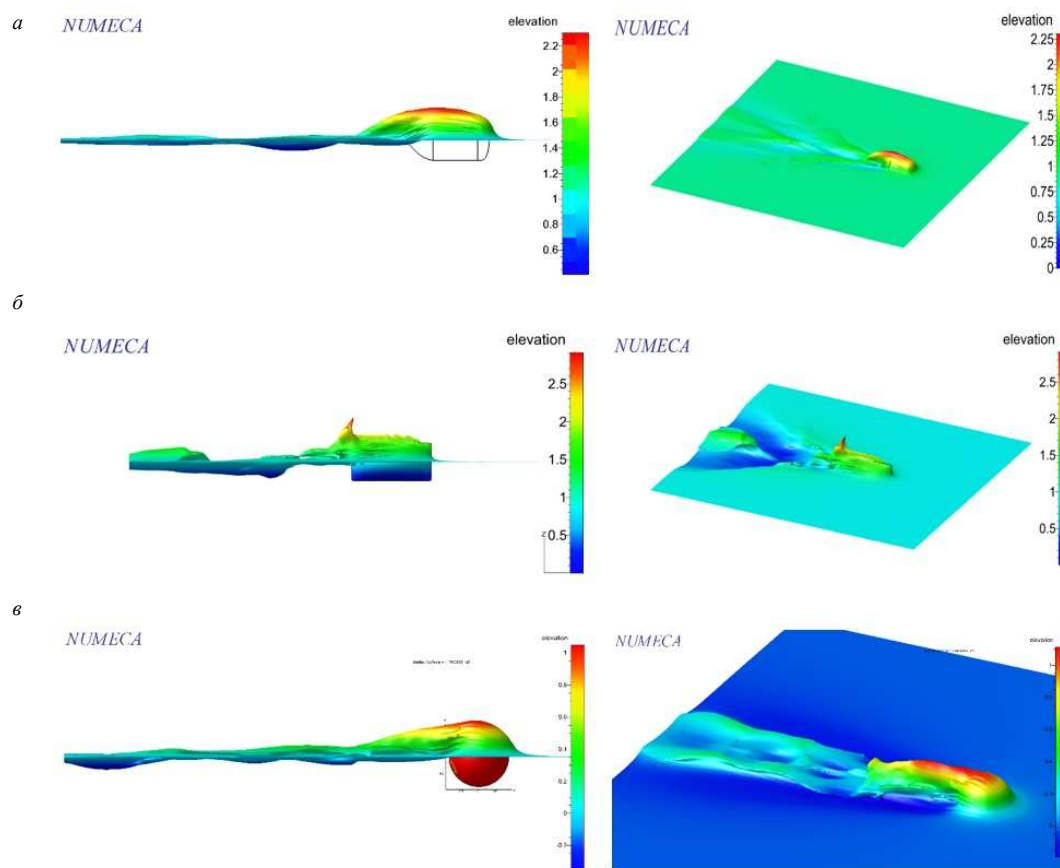


Рис. 11. Волновая поверхность тел различной формы с одинаковой длиной 3,64 м, скоростью движения 8,6 м/с ($Fr=1,44$) и осадке 0,865 м:
 а — цилиндр с обтекателями; б — модифицированное тело Вигли; в — шар

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты численного моделирования волнообразования простых тел эллипсоида, модифицированного (отраженного по палубе) тела Вигли, шара и цилиндра с обтекателями с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarineTM. В ходе вычислительных экспериментов изменялись длины тел, их осадки и скорости движения от 7 м/с до 11,7 м/с. Получены зависимости коэффициентов полного сопротивления и высот генерируемых волн от чисел Фруда. Показано влияние главных размерений и формы тел на коэффициент полного сопротивления и параметры генерируемых волн, а также нелинейность процесса волнообразования при изменении размеров или осадки.

Выявлено, что в диапазоне скоростей от 7 м/с до 11,7 м/с при осадке 0,865 м наименьшим коэффициентом волнового сопротивления при длине тел 3,64 м обладает тело формы Вигли, а при 14,6 м — эллипсоидной формы. При длинах 7,3 м и 29,2 м наименьшее среднее значение данного коэффициента достигается телом формы Вигли. Установлено, что для тела Вигли и эллипсоида для длин 7,3 м и 14,6 м с ростом погружения увеличивается величина коэффициента полного сопротивления, однако для эллипсоида данная средняя величина при погружении 0,565 м меньше, чем при 0,465 м. Выявлено, что максимальные высоты волн, равные 2,4 м, достигаются в корме при погружении 0,865 м тел формы Вигли с длиной 3,64 м и цилиндра с обтекателями с длинами 3,64 м и 7,3 м. Показана нелинейность генерируемых волн телами различных форм и размеров, что, в свою очередь, подтверждает необходимость модификации тел — не только главных размерений, но и формы — для достижения необходимых величин волн.

Полученные результаты будут использованы для разработки методики выбора оптимальной формы и размеров поплавка-бульба, устанавливаемого в междукорпусном пространстве судов катамаранного типа для снижения волнового сопротивления за счет интерференции волновых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandru A. Experimental study on catamaran hydrodynamics / A. Mandru, F. Pacuraru // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 916. — P. 012060. — DOI 10.1088/1757-899X/916/1/012060.
2. Saha G.K. Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on the center plane of the catamaran / G.K. Saha, K. Suzuki, H. Kai // Marine Science and Technology. — 2005. — Vol. 10, No. 1. — P. 32 — 40. — DOI 10.1007/s00773-004-0186-6.
3. Danisman D.B. Numerical and experimental investigation of the effect of bow flare angle on the resistance and seakeeping performance of catamarans / D.B. Danisman // Ocean Engineering. — 2014. — Vol. 91. — P. 227 — 234.
4. Havelock T.H. The wave resistance of a spheroid / T.H. Havelock // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. — 1931. — Vol. 131, No. 817. — P. 275 — 285.
5. Havelock T.H. The wave resistance of an ellipsoid / T.H. Havelock // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. — 1931. — Vol. 132, No. 820. — P. 480 — 486.
6. Kinoshita M. Wave-making resistance of a submerged spheroid, ellipsoid and a ship in a shallow sea / M. Kinoshita, T. Inui // Journal of Zosen Kiokai. — 1953. — Vol. 1953, Issue 75. — P. 119 — 135.
7. Huan J. Design of minimum drag bodies in incompressible laminar flow / J. Huan, V. Modi // Inverse Problems in Engineering. — 1996. — Vol. 3, No. 4. — P. 233 — 260. — DOI 10.1080/174159796088027626.
8. Benham G.P. Wave drag on asymmetric bodies / G.P. Benham, J.P. Boucher, R. Labbé, M. Benzaquen et al. // Journal of Fluid Mechanics. — 2019. — Vol. 878. — P. 147 — 168.
9. Петров А.А. Оценка ходкости судна на открытой воде после демонтажа носового бульба / А.А. Петров, А.А. Рябова, Ф.С. Рябов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 27 — 36. — EDN IEHYBY.
10. Чебан Е.Ю. Особенности волнообразования некоторых тел простой формы при больших числах Фруда // Транспорт. Горизонты развития — 2023: м-лы междунар. науч.-практ. форума / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников, С.В. Бушков; ФГБОУ ВО «ВГУВТ». — 2023. [Электронный ресурс] URL: http://вф-река-море.рф/2023/PDF/3_15.pdf.
11. Чебан Е.Ю. Предварительная оценка гидродинамических характеристик большегрузного катамарана на мелководье с помощью численных методов / Е.Ю. Чебан, Д.В. Никущенко, Т.В. Старкова, Д.О. Жигалов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 23 — 34. — EDN ZFDNTR.
12. Чебан Е.Ю. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Е.Ю. Чебан, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин, О.В. Мартымянова и др. // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3-1 (61). — С. 210 — 219. — DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. — EDN PERDQG.
13. Чебан Е.Ю. Исследование волнообразования поплавков-бульбов большегрузного катамарана / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников // Транспорт. Горизонты развития: труды 4-го Междунар. науч.-пром. форума, Нижний Новгород — Новосибирск — Владивосток — Самара, 23–26 апреля 2024 года. — Нижний Новгород: ВГУВТ, 2024. — С. 104. — EDN XPGFRW.
14. User Manual FINE™/Marine v8.2, Documentation v8.2 NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
15. Никущенко Д.В. Численные методы в механике жидкости: уч. пос. / Д.В. Никущенко. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2025. — 144 с.
16. Чебан Е.Ю. Исследование волнообразования поплавков для использования в качестве бульбов большегрузных катамаранов / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников // Научные проблемы водного транспорта. — 2024. — № 78. — С. 84 — 96. — DOI 10.37890/jwt.vi78.456. — EDN NZMKRT.
17. Tuck E.O. Wave patterns and minimum wave resistance for high-speed vessels / E.O. Tuck, D.C. Scullen, L. Lazauskas // 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 8–13 July. — 2002.

REFERENCES

1. Mandru A., Pacuraru F. Experimental study on catamaran hydrodynamics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 916. P. 012060. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012060.
2. Saha G.K., Suzuki K., Kai H. Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on the center plane of the catamaran. *Marine Science and Technology*. 2005. Vol. 10, No. 1. P. 32 — 40. DOI: 10.1007/s00773-004-0186-6.
3. Danisman D.B. Numerical and experimental investigation of the effect of bow flare angle on the resistance and seakeeping performance of catamarans. *Ocean Engineering*. 2014. Vol. 91. P. 227 — 234.
4. Havelock T.H. The wave resistance of a spheroid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1931. Vol. 131, No. 817. P. 275 — 285.
5. Havelock T.H. The wave resistance of an ellipsoid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1931. Vol. 132, No. 820. P. 480 — 486.
6. Kinoshita M., Inui T. Wave making resistance of a submerged spheroid, ellipsoid and a ship in a shallow sea. *Journal of Zosen Kiokai*. 1953. Vol. 1953, Issue 75. P. 119 — 135.
7. Huan J., Modi V. Design of minimum drag bodies in incompressible laminar flow. *Inverse Problems in Engineering*. 1996. Vol. 3, No. 4. P. 233 — 260. DOI 10.1080/174159796088027626.
8. Benham G.P., Boucher J.P., Labbé R., Benzaquen M. et al. Wave drag on asymmetric bodies. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 878. P. 147 — 168.
9. Petrov A.A., Ryabova A.A., Ryabov Ph.S. Assessment of the propulsion qualities of a ship in the open water after dismantling the bulbous bow. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 27 — 36. EDN IEHYBY. (In Russ.)
10. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Bushkov S.V. Peculiarities of wave formation of some bodies of simple shape at large Froude numbers. *Transport. Gorizonty razvitiya — 2023 [Transport. Development Horizons: International Scientific and Industrial Forum]*. Volga State University of Water Transport. 2023. URL: http://вф-река-море.рф/2023/PDF/3_15.pdf. (In Russ.)
11. Cheban E.Yu., Nikushchenko D.V., Starkova T.V., Zhigalov D.O. Preliminary estimation of hydrodynamic parameters of a large cargo catamaran in shallow water using numerical methods. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 23 — 34. EDN ZFDNTR. (In Russ.)

12. Cheban E.Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Martemianova O.V. et al. Study of wave formation of a large cargo catamaran for inland waterways by numerical methods. *Marine Intellectual Technologies*. 2023. No. 3-1(61). P. 210 — 219. DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. EDN PERDQG. (In Russ.)
13. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I. Investigation of wave formation of bulbous floats of a heavy-duty catamaran. *Transport. Gorizonty razvitiya — 2024 [Transport. Development Horizons: Proceedings of the 4th International Scientific and Industrial Forum]*. Nizhny Novgorod — Novosibirsk — Vladivostok — Samara, April 23 — 26, 2024. Nizhny Novgorod: VGUVT, 2024. P. 104. EDN XPGFRW. (In Russ.)
14. User Manual FINE™/Marine v8.2, Documentation v8.2 NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
15. Nikushchenko D.V. Chislennyye metody v mekhanike zhidkosti [Computational techniques in fluid mechanics]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2025. 144 p.
16. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I. The study of float wave formation for the usage as heavy-duty catamaran bulbs. *Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]*. 2024. No. 78. P. 84 — 96. DOI 10.37890/jwt.vi78.456. EDN NZMKRT. (In Russ.)
17. Tuck E.O., Scullen D.C., Lazauskas L. Wave patterns and minimum wave resistance for high-speed vessels. *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan, 8–13 July 2002.

УДК 629.12.073
EDN HVQQRH

КРАТКИЙ ОБЗОР КРИТЕРИЕВ МОРЕХОДНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ НЕКОТОРЫМ ИЗ НИХ ПРОЕКТАМИ СУДОВ АО «ЦМКБ «АЛМАЗ»

Н.Ю. Часовников, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: n.chasovnikov@yandex.ru

М.О. Франк, инженер-конструктор 2 кат., АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз», 196128 Россия, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 50, e-mail: frankmo@almaz-kb.ru

Эксплуатация судна сопряжена с воздействием на него различных внешних сил, в том числе морского волнения, в условиях которого судно испытывает качку. Безопасность такой эксплуатации обеспечивается выполнением специальных требований или требований классификационных обществ. Однако их всецелое выполнение не гарантирует приемлемых с точки зрения качки условий обитания на борту человека и пассажиров. Во второй половине XX в. были инициированы исследования, направленные на установление предельных значений некоторых параметров качки, превышение которых снижает эффективность работы экипажа, в том числе приводит к морской болезни. Результаты исследований позволили сформировать набор так называемых критериев мореходности (seakeeping criteria), вошедших в специализированные стандарты, из которых наиболее известны NORDFORSK, NATO STANAG 4154 и USCGC. Несмотря на значительное влияние состояния человека на эффективность эксплуатации судна, применение критериев мореходности при проектировании судов в отечественной практике весьма ограничено. В настоящей статье приведен краткий обзор формирования критериев мореходности и соответствующих стандартов, а также результаты проверки удовлетворения некоторым из них проектами судов АО «ЦМКБ «Алмаз».

Ключевые слова: качка, критерии мореходности, ускорения от качки, обитаемость, морская болезнь.

Для цитирования: Часовников Н.Ю. Краткий обзор критериев мореходности и результаты проверки удовлетворения некоторым из них проектами судов АО «ЦМКБ «Алмаз» / Н.Ю. Часовников, М.О. Франк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025. № 79. С. 52 — 61. — EDN HVQQRH.

A BRIEF OVERVIEW OF THE SEAKEEPING CRITERIA AND THE RESULTS OF CHECKING THE SATISFACTION OF SOME OF THEM BY THE PROJECTS OF THE VESSELS OF JSC CMDDB ALMAZ

N.Yu. Chasovnikov, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Technical Marine University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: n.chasovnikov@yandex.ru.

M.O. Frank, 2 cat. Design Engineer, JSC Central Marine Design Bureau Almaz, 196128 Russia, St. Petersburg, Varshavskaya ul., 50

The operation of the vessel involves managing the influence of various external forces, including sea waves, that lead to ship motions. The safety of such operation is ensured by meeting special requirements or requirements of classification societies. At the same time, their full implementation does not guarantee acceptable living conditions for crew members or passengers on board in view of motions. For this purpose, in the second half of the 20th century, studies were initiated aimed at determining the limit values of certain parameters of ship motions, exceeding which reduces the efficiency of the crew, including those leading to motion sickness. The results of the research made it possible to develop a set of so-called seakeeping criteria to be included in relevant specialized standards. NORDFORSK, NATO STANAG 4154 and USCGC are the most widely used. Despite the significant human influence on the efficiency of ship operation, the application of seakeeping criteria in the design of ships in Russian practice is very limited. This article provides a brief overview of the formation of seakeeping criteria and relevant standards, as well as the results of applying some of them to the vessels, designed by JSC CMDDB Almaz.

Key words: ship motions, seakeeping criteria, acceleration, habitability, seasickness.

For citation: Chasovnikov N.Yu., Frank M.O. A brief overview of the seakeeping criteria and the results of checking the satisfaction of some of them by the projects of the vessels of JSC CMDDB Almaz. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 52 — 61. EDN HVQQRH. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация судна проходит в условиях морского волнения. Безопасность такой работы обеспечивается характеристиками мореходности, закладываемыми в проект судна в зависимости от требований, устанавливаемых в Техническом задании (ТЗ) на его создание. Как правило, данные требования определяют вводимый в класс судна знак ограничения района плавания, регламентирующий предельную эксплуатационную высоту волны в соответствии с требованиями классификационных обществ, например п. 2.2.5 ч. 1 «Классификация» Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (далее — Правила) [1]. Исходя из класса судна, Правилами предъявляются требования к его корпусу, устройствам, оборудованию, снабжению, надводному борту, остойчивости и т.д. В особых случаях в ТЗ могут содержаться дополнительные требования к характеристикам мореходности, обусловленные работой специального оборудования, например спуско-подъемного устройства, промыслового оборудования и т.п.

При этом полное удовлетворение требованиям Правил, обеспечивающих безопасность судна, не может гарантировать приемлемые условия обитания (здесь и далее с точки зрения умеренности (плавности) качки) экипажа и пассажиров. Так, избыточная остойчивость приводит к резкой качке, что отражается в ее малом периоде и, как следствие, вызванных ею значительных вертикальных ускорениях. Развитие безэкипажной навигации для некоторых типов судов может исключить необходимость обеспечения приемлемых условий нахождения экипажа на судне. Однако полное исключение пребывания человека на борту морского судна вряд ли возможно, а пребывание в качестве пассажира требует определенного уровня комфорта.

В свете изложенного видится достаточно важным добиваться таких характеристик мореходности, которые, с одной стороны, удовлетворяют требованиям Правил, а с другой, обеспечивают приемлемые условия пребывания человека на борту. Для этого во второй половине XX в. за рубежом были инициированы исследования влияния параметров качки на человека по результатам которых сформирован перечень параметров качки (в большей степени влияющих на пребывание человека на борту) и определены их предельные значения. Данный перечень в зарубежной литературе и стандартах предлагается как «критерии мореходности» (seakeeping criteria), по которым оценивается умеренность качки судов.

Целью настоящей работы является краткий обзор стандартов, нормирующих соответствующие критерии (параметры качки), при которых обеспечиваются приемлемые условия работы экипажа и отдыха пассажиров. С использованием известных методов расчета качки и абсолютных ускорений характерных точек определены соответствующие параметры для некоторых судов разработки АО «ЦМКБ «Алмаз» и выполнена проверка удовлетворения полученных значений некоторым критериям мореходности.

КРАТКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КРИТЕРИЕВ МОРЕХОДНОСТИ

Влияние движения судна на волнении на состояние человека исследуется достаточно давно. Одним из первых известных исследований можно считать натурные испытания морских судов (два траулера, пассажирский лайнер, два пассажирско-грузовых судна, танкер и балкер для перевозки руды) в начале второй половины XX в., проводившиеся в течение 10 лет. В результате исследования впервые был разработан набор критериев, представляющих собой предельные значения ряда параметров мореходности: заливание, слеминг, вертикальные ускорения и т.д. [2, 3].

Полученные результаты послужили формированию общего подхода к оценке мореходности судов и легли в основу существующих стандартов. Сегодня наибольшее распространение получили стандарты NORDFORSK, NATO STANAG 4154 и USCGC [2, 4]. При этом они не являются требованиями, а созданы для оценки мореходности судов, в том числе при сопоставлении проектов судна для определения его наилучшего варианта, и носят рекомендательный характер.

Критерии мореходности стандарта NORDFORSK были разработаны на основе имевшихся к 1986 г. исследований, а также результатов натурных испытаний. К достоинствам стандарта NORDFORSK можно отнести большое количество типов судов (грузовые суда, военные корабли, катера, рыболовные и оффшорные суда). Также в стандарт введены критерии, представляющие собой предельные значения вертикальных и поперечно-горизонтальных ускорений, учитывая разделение работы экипажа судна на категории (легкая ручная работа, тяжелая ручная работа, интеллектуальная работа) и наличие пассажиров [2 — 4].

Началом формирования критериев мореходности стандарта NATO STANAG 4154 считается проведенное в 1986 г. совещание подгруппы 5 NG-6 в рамках Североатлантического договора, на котором были

определены трудности флота в определении условий, при которых обеспечивается эффективная работа экипажа, в том числе в условиях качки корабля, исходя из физиологических и когнитивных возможностей человека. Позднее исследования влияния качки корабля на человека проводила рабочая группа, состоявшая из инженеров, ученых и врачей, на базе Национальной биодинамической лаборатории Университета Нового Орлеана. Для этого была создана экспериментальная установка, позволявшая имитировать качку корабля, и отобраны добровольцы из состава ВМС. С использованием результатов проведенных исследований, а также исследований по данному направлению до 1997 г., были сформированы критерии мореходности, вошедшие в стандарт NATO STANAG 4154 «Общие процедуры обеспечения мореходности в процессе проектирования судов», принятый 13 декабря 2000 г. Стандарт был пересмотрен и выпущен в новой редакции 22 февраля 2018 г. [2, 4, 6].

Критерии мореходности стандарта USCGC сформированы в 1993 г. в рамках исследований мореходности трех катеров береговой охраны США: 110-футового патрульного катера класса «Island», 82-футового патрульного катера класса «Point» и 47-футового спасательного катера. Целью исследований было определить время работы катеров, в пределах которого параметры их мореходности удовлетворяли критериям, учитывая при этом ветро-волновые особенности районов их эксплуатации. Фундаментом для формирования критериев USCGC послужили набор критериев, выработанных при создании стандарта NATO STANAG 4154, и результаты собственных исследований, например результаты эксплуатации патрульных 50-футовых катеров быстрого реагирования Navy Swift, а также 82-футовых и 95-футовых катеров USCG в время патрулирования у берегов Южного Вьетнама [2, 7].

Стандарты NORDFORSK (для морских судов, кораблей и катеров), NATO STANAG 4154 (для морских судов и кораблей) и USCGC (для катеров) нормируют предельные значения следующих параметров мореходности: амплитуда бортовой качки, амплитуда килевой качки (только NATO STANAG 4154 и USCGC), вертикальные ускорения, поперечно-горизонтальные ускорения, частота заливания верхней палубы, частота слеминга и частота оголения гребных винтов (только NATO STANAG 4154).

В стандартах NATO STANAG 4154 и USCGC дополнительно содержатся критерии motion sickness incidence (MSI — частота случаев укачивания, приводящих к болезни движения) и motion induced interruptions (МИ — частота прерываний, вызванных движением). Критерий (индекс) MSI, предложенный O'Halon и McCauley в 1974 г. [8], отражает количество людей, выраженное в процентах от их общего количества на борту, и воздействие вертикальных ускорений, при которых возникает болезнь движения (тошнота). Критерий (индекс) МИ, предложенный R. Graham, отражает частоту появления события в минуту, когда человек прерывает работу ввиду необходимости восстановления равновесия, потерянного после воздействия качки. Достаточно подробно об этих критериях писал С.Г. Живица [4].

Еще одним критерием, отражающим воздействие качки на человека, является motion induced fatigue (MIF — усталость, вызванная движением). Под усталостью в данном случае следует понимать снижение работоспособности (утомляемость) человека под воздействием качки. В отличие от MSI и МИ, отражающих прямую физическую реакцию на воздействие качки, MIF значительно сложнее поддается изучению, так как учитывается не только физическое состояние, но и когнитивные функции. Одно из первых исследований MIF, спонсированное так называемой группой ABCD (США, Великобритания, Канада и Нидерланды), было реализовано специально созданной рабочей группой по изучению эффективности работы человека в море. В данном исследовании был реализован подход исключительно к физическому состоянию человека, выраженному в количестве потребляемого кислорода. В результате было установлено, что способность организма потреблять кислород при выполнении работ в условиях качки снижается. Несмотря на важность и имеющиеся исследования, MIF все еще мало изучен и не используется в качестве критерия мореходности [9, 10].

В табл. 1 приведена сводная таблица критериев мореходности стандартов NORDFORSK (для трех типов судов), NATO STANAG 4154 и USCGC. Как указано ранее, в NORDFORSK также предложены критерии (табл. 2), удовлетворение которых обеспечивает малое влияние качки на работу экипажа, учитывая разделение работы на категории, и на пассажиров [4]. С другими известными источниками, содержащими критерии мореходности, можно ознакомиться в [2].

Удовлетворение критериям мореходности, содержащимся в приведенных стандартах, позволяет на этапе проектирования обеспечить значения проектных характеристик судов, кораблей и катеров, приемлемые с точки зрения обитаемости экипажа и пассажиров. Тем не менее, исходя из обзора отечественной литературы, объем исследований и применение соответствующих критериев в отечественной практике при проектировании судов весьма ограничены. При этом попытки применить критерии мореходности, выраженные в предельных значениях ускорений, существуют. Как и в случае формирования критериев стандарта USCGC, на их основе производится оценка эффективности эксплуатации судов [5, 11].

Таблица 1

Критерии мореходности стандартов NATO STANAG 4154, USCGC и NORDFORSK [2 — 4]

Параметр		NATO STANAG 4154 [6]	USCGC [7]	NORDFORSK ⁵⁾ [2, 4]		
		Корабль	Скоростные катера (до 35 м)	Судно	Корабль	Скоростные катера (до 35 м)
Амплитуда бортовой качки (RMS ¹⁾)		4,0°	4,0°	6,0°	4,0°	4,0°
Амплитуда килевой качки (RMS)		1,5°	3,0°	—	—	—
Амплитуда вертикальных ускорений (RMS), м/с ²	Ходовая рубка	0,200g	0,200g	0,150g	0,200g	0,275g
	Верхняя палуба в корме (рабочая зона)	—		—	—	—
	Носовой перпендикуляр	0,275g	—	0,275g/0,050g ²⁾	0,275g	0,650g
Амплитуда поперечно-горизонтальных ускорений (RMS), м/с ²		Ходовая рубка	0,100g	0,100g	0,100g	0,100g
Оголение винта, раз в час		90	—	—	—	—
Заливание, раз в час ⁶⁾		30	20	0,05 (вероятность)	0,05 (-/-)	0,05 (-/-)
Слеминг, раз в час ⁷⁾		20	30	20/6 ³⁾	20	20
МП, раз в мин		1,0	2,1	—	—	—
MSI, % за 30 мин		2,5 % ⁴⁾	5,0 %	—	—	—

¹⁾Исходные значения амплитуд бортовой и килевой качки, а также вертикальных и поперечно-горизонтальных ускорений, в USCGC приведены в SSA (significant single amplitude), а в NORDFORSK и NATO STANAG 4154 — в RMS (root mean square). Для удобства в таблице приведены значения в RMS.

²⁾В числителе указано значение для судов длиной равной или менее 100 м, в знаменателе — равной или более 330 м. Для судов, длина которых более 100 м, но менее 330 м, значение параметра определяется линейной интерполяцией.

³⁾В числителе указано значение для судов длиной равной или менее 100 м, в знаменателе — равной или более 300 м. Для судов, длина которых более 100 м, но менее 300 м, значение параметра определяется линейной интерполяцией.

⁴⁾В исходной редакции — 20 % за 4 часа.

⁵⁾Критерии мореходности для рыболовных и офшорных судов приведены в [2].

⁶⁾В строке «Заливание, раз в час» для стандарта NORDFORSK приведены значения вероятности возникновения заливания (с англ. critical probability).

⁷⁾В строке «Слеминг, раз в час» в исходной версии стандарта NORDFORSK приведены значения вероятности возникновения слеминга.

Таблица 2

Критерии мореходности стандарта NORDFORSK для экипажа и пассажиров [4]

Описание деятельности экипажа/пассажиров	Амплитуда вертикальных ускорений, м/с ² (RMS)	Амплитуда поперечно-горизонтальных ускорений, м/с ² (RMS)	Амплитуда бортовой качки (RMS)
Легкая ручная работа людей, привычных к качке; неприемлемо при длительной качке	0,20g	0,10g	6,0°
Тяжелый ручной труд людей, привычных к качке (например, на рыболовном судне или судне снабжения)	0,15g	0,07g	4,0°
Интеллектуальная работа для людей, не полностью адаптированных к качке (например, научный персонал на исследовательском судне). Допустимо в течение длительного времени для экипажа. Допустимо в течение 30 мин для пассажиров, непривычных к качке	0,10g	0,05g	3,0°
Допустимо в течение двух часов для пассажиров, непривычных к качке. Вызывает симптомы морской болезни (тошноты) примерно у 10 % непривычных к качке взрослых пассажиров	0,05g	0,04g	2,5°
Допустимо для пассажиров на круизных лайнерах и пожилых людей. Приближается к порогу, ниже которого морская болезнь маловероятна	0,02g	0,03g	2,0°

ПРОВЕРКА УДОВЛЕТВОРЕНИЯ НЕКОТОРЫМ КРИТЕРИЯМ МОРЕХОДНОСТИ ПРОЕКТОВ СУДОВ АО «ЦМКБ «АЛМАЗ»

Для проверки удовлетворения критериям мореходности на этапе проектирования судна необходимо определить значения параметров его качки. Для этого при отсутствии результатов модельных мореходных испытаний в опытовом бассейне может быть использован действующий руководящий документ РД 5.1003-80 «Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов», регламентирующий расчет качки водоизмещающих судов [6]. Для определения абсолютных вертикальных и поперечно-горизонтальных ускорений произвольной точки судна может быть использован метод, изложенный в [4] и [12].

С использованием указанных методов расчета качки и абсолютных ускорений точки были выполнены соответствующие расчеты для научно-исследовательских судов, спроектированных за последние 15 лет в АО «ЦМКБ «Алмаз». Длина судов составляет от 60 до 120 м. Результаты получены для состояния нагрузки, соответствующей среднему эксплуатационному значению (около 50 % запасов). Следует отметить, что все рассмотренные суда оборудованы скуловыми килями.

В качестве расчетного использован спектр нерегулярного двухмерного ветрового волнения согласно [6] интенсивностью от двух до восьми баллов (высота волны 3%-й обеспеченности от 1,25 м до 11,0 м) развивающегося, развитого и затухающего типов.

Учитывая назначение судов, в настоящей статье приводятся результаты удовлетворения следующим критериям мореходности: амплитуды вертикальных и поперечно-горизонтальных ускорений, при которых обеспечиваются приемлемые условия выполнения тяжелого ручного труда и интеллектуальной работы в соответствии с табл. 2.

В соответствии с этим, определены амплитудно-частотные характеристики линейных перемещений, скоростей и ускорений для следующих характерных точек: носовой перпендикуляр на уровне верхней палубы, ходовой мостик в ДП (место размещения рулевого), ходовой мостик у борта, центральный пост управления (ЦПУ) и центр рабочей палубы (для всех случаев находится в диапазоне от 18 до 16 теоретических шпангоутов).

Учитывая то, что в отечественном судостроении принято отражать амплитуды 3%-й обеспеченности или 46%-й обеспеченности (средние амплитуды), амплитуды RMS были пересчитаны. Для этого, в соответствии с [12], значения из табл. 2 необходимо умножить на коэффициент равный 2,64 или 1,25 соответственно. В настоящей статье приводятся значения средних амплитуд.

На рис. 1 приведены результаты расчета амплитуд вертикальных ускорений для рассмотренных судов (условные индексы: а), б), в), г), д)). На рис. 2 приведены результаты расчета амплитуд поперечно-горизонтальных ускорений. Для удобства на соответствующих графиках уровни ускорений (средние амплитуды), соответствующие принятым типам работ и значениям табл. 2, выделены цветами: оранжевый — «Интеллектуальный труд», красный — «Тяжелый ручной труд».

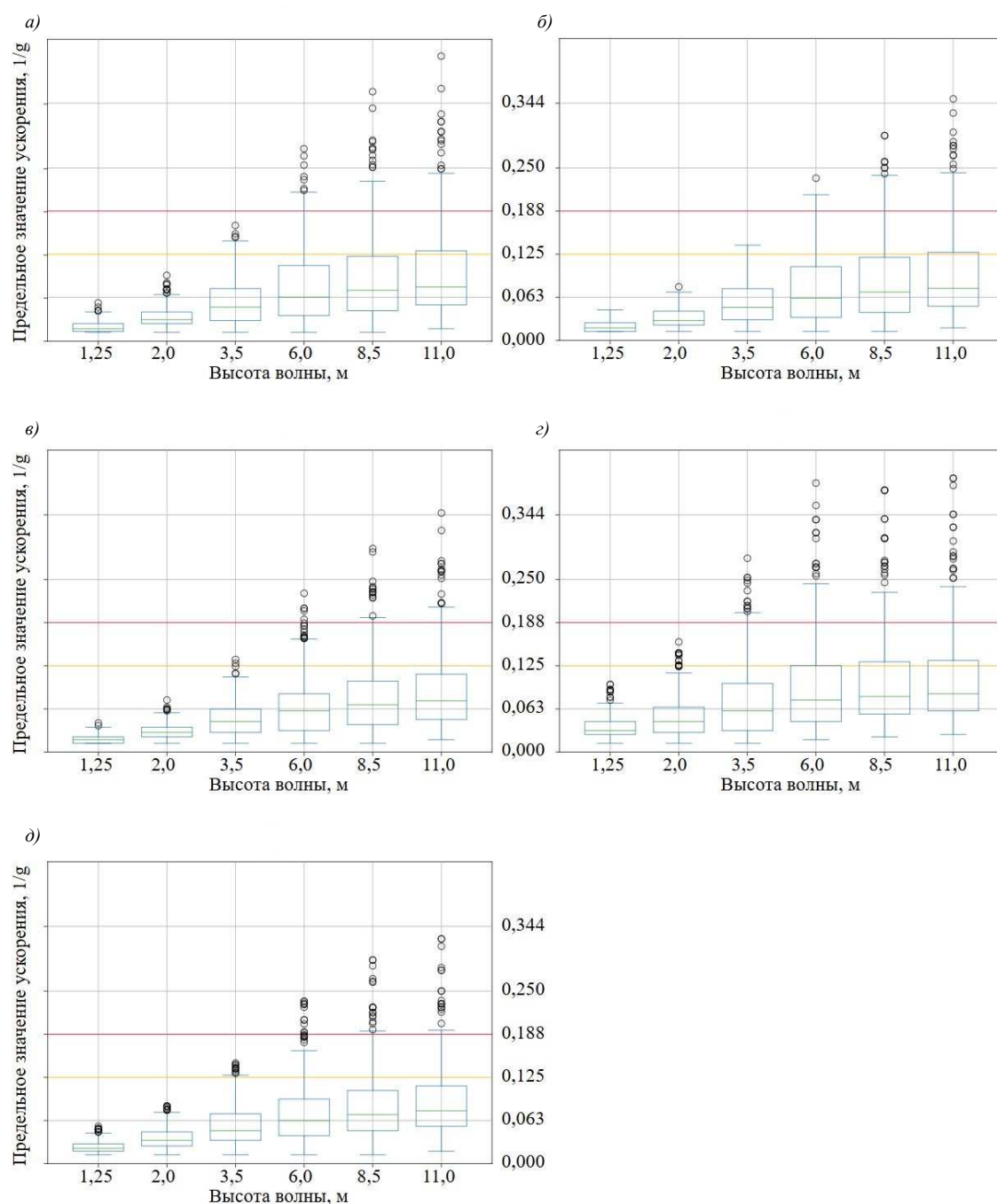


Рис. 1. Средние значения амплитуды вертикальных ускорений:

а) — судно «а»; б) — судно «б»; в) — судно «в»; г) — судно «г»; д) — судно «д».

Для каждого значения высоты волны представлены: медиана (зеленая линия), 1-й и 3-й квартили и предельные минимальное и максимальное значения амплитуды вертикальных ускорений.

Значения определены на основании расчетов вертикальных ускорений в 5 точках по каждому судну, для 4 значений скорости хода и 5 значений курсового угла направления действия волнения.

Желтая линия — величина критериального значения ускорения, соответствующего «Интеллектуальному труду».

Красная линия — величина критериального значения ускорения, соответствующего «Тяжелому ручному труду».

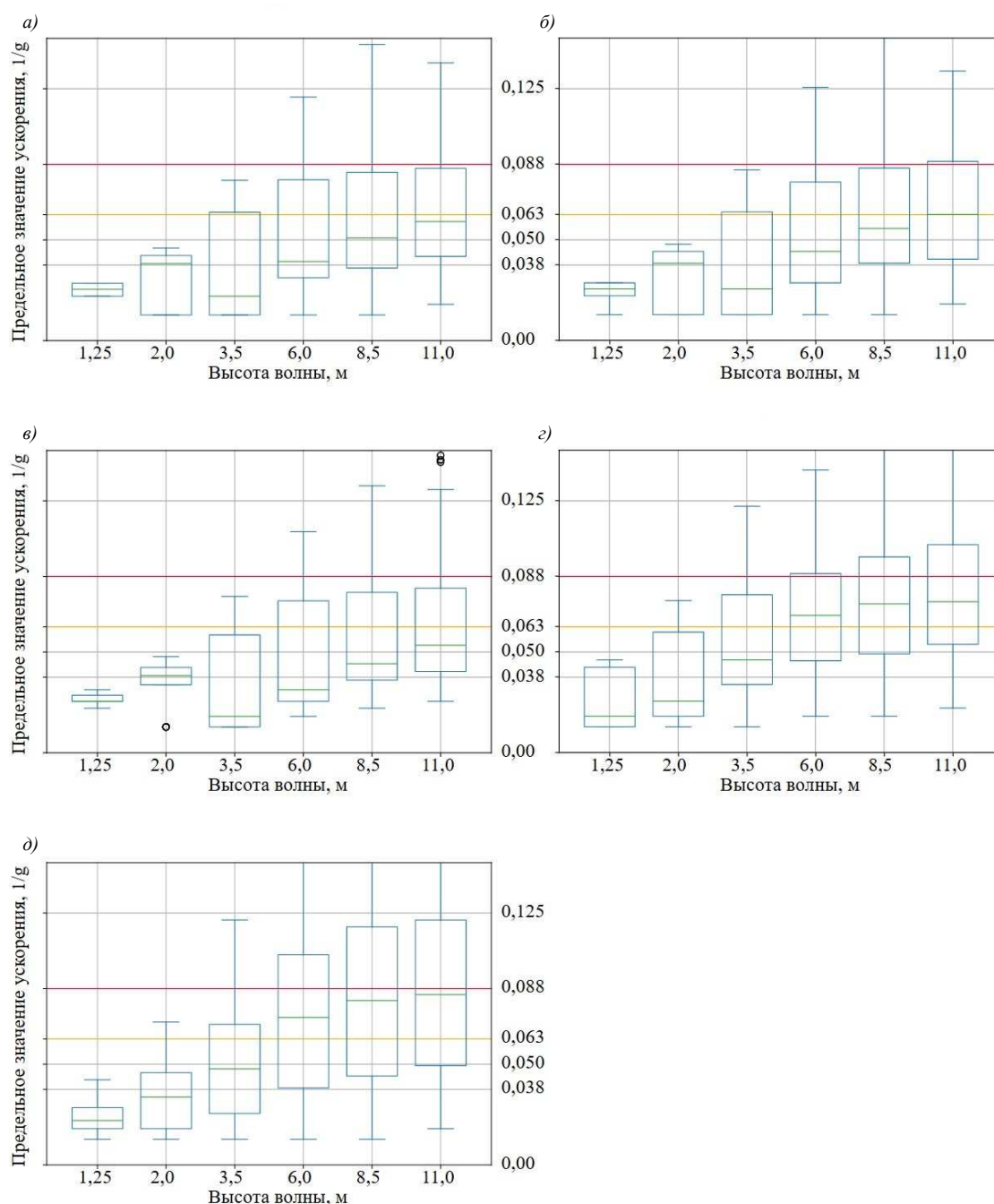


Рис. 2. Средние значения амплитуды поперечных ускорений

Анализируя представленные графики, можно сделать следующие выводы:

а) вертикальные ускорения: амплитуды вертикального ускорения всех судов, кроме судна «г», не превышают критериального значения для «Интеллектуального труда» (0,125g) при высоте волны 2,0 м (4 балла). Аналогично и для критериального значения «Тяжелый ручной труд» (0,188g) в условиях волнения 3,5 м (5 баллов). Более высокие значения амплитуды вертикального ускорения для судна «г» объясняются его меньшими главными размерениями по сравнению с остальными рассмотренными судами. Длина судна «г» соответствует минимальному значению рассмотренного диапазона длины;

б) поперечно-горизонтальные ускорения: амплитуды поперечно-горизонтального ускорения всех судов, кроме «г» и «д», не превышают критериального значения для «Интеллектуального труда» (0,125g) при высоте волны 2,0 м (4 балла). Аналогично и для критериального значения «Тяжелый ручной труд» (0,188g)

в условиях волнения 3,5 м (5 баллов). Более высокие значения амплитуды вертикальных ускорений для судов «г» и «д» также объясняются меньшими главными размерениями по сравнению с остальными рассмотренными судами.

Полученные результаты подтверждают правильность принятых значений главных кораблестроительных характеристик рассмотренных проектов судов АО «ЦМКБ «Алмаз», при которых обеспечиваются приемлемые условия работы экипажа для решения соответствующих задач в спецификационных пределах. Учитывая, что интенсивность волнения более 5 баллов в мореходной практике является значительной, мореходность рассмотренных судов можно считать в полной мере удовлетворительной.

На рис. 3 приведено графическое отображение относительного количества дней, при которых высота волны 3%-й обеспеченности составляет менее 2,0 и 4,0 м, в зависимости от сезона года для центральной части Баренцева моря, в соответствии с [13]. Обобщая результаты рис. 1 и 2 и основываясь на данных рис. 3, видно, что достигнутые показатели мореходности обеспечивают выполнение поставленных перед судами и их экипажем задач.

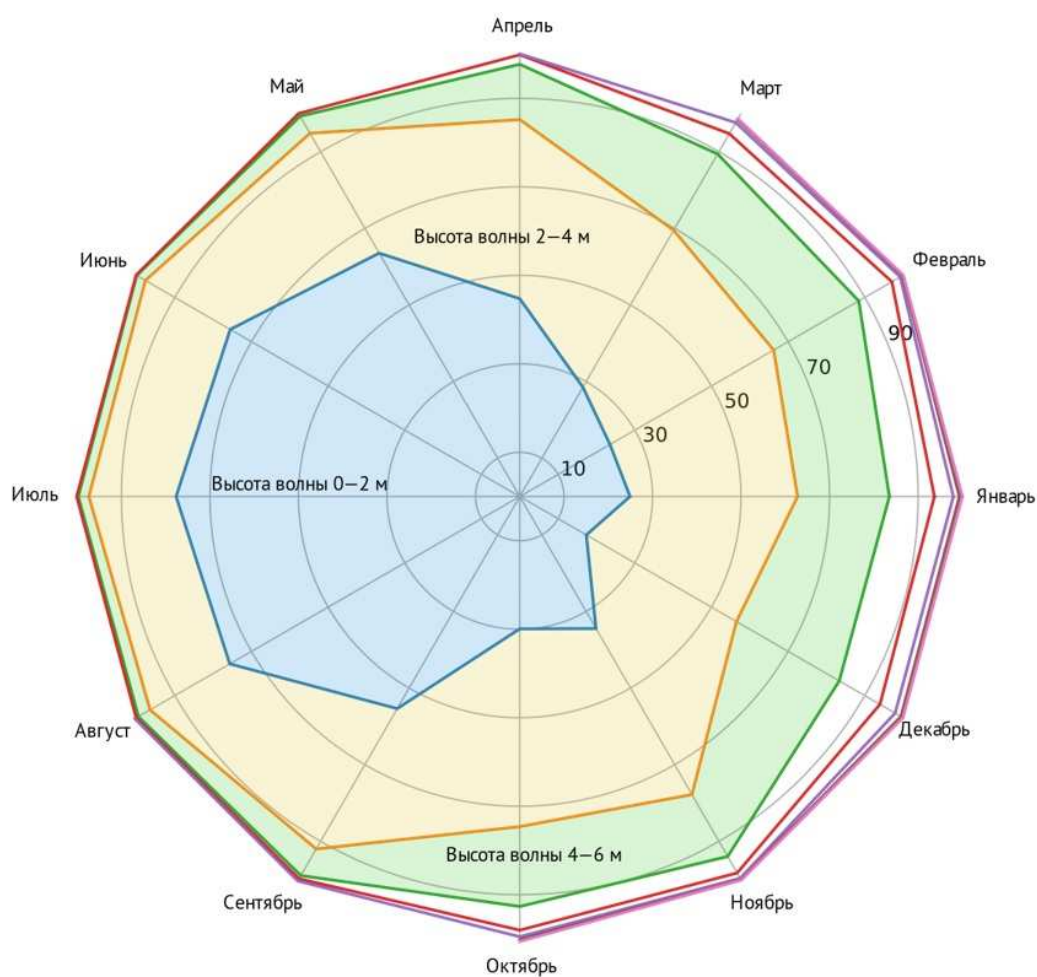


Рис. 3. Графическое отражение относительного количества дней, при которых высота волны 3%-й обеспеченности составляет менее 2,0 м, 4,0 м и более, в зависимости от сезона года для Баренцева моря (осредненное по районам)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании проекта любого судна первостепенной задачей является определение таких значений кораблестроительных характеристик, при которых обеспечивается его эффективная и безопасная эксплуатация, в том числе в условиях качки. При этом полное удовлетворение требованиям классификационных обществ, обеспечивающих безопасность судна, не может гарантировать приемлемые условия обитания экипажа и пассажиров. Одним из таких условий является наличие удовлетворительных значений параметров качки (мореходности). Для этого во второй половине XX в. инициированы исследования по определению предельных значений параметров качки, превышение которых влечет за собой снижение эффективности работы экипажа, в том числе из-за возникновения морской болезни. В результате проведенных исследований были сформированы так называемые критерии мореходности, вошедшие в соответствующие стандарты.

Сегодня наибольшее распространение получили стандарты NORDFORSK (для морских судов, кораблей и катеров), NATO STANAG 4154 (для морских судов и кораблей) и USCGC (для катеров). В них приведены предельные значения следующих параметров мореходности: амплитуда бортовой качки, амплитуда килевой качки (только NATO STANAG 4154 и USCGC), вертикальные ускорения, поперечно-горизонтальные ускорения, частота заливания верхней палубы, частота слеминга и частота оголения гребных винтов (только NATO STANAG 4154). Дополнительно в некоторых из них содержатся специально разработанные критерии MSI и MII.

В отечественной практике, несмотря на важность обеспечения приемлемых условий обитания экипажа (с точки зрения качки), объем исследований и, соответственно, применение указанных критериев при проектировании судов весьма ограничены.

В настоящей статье приведена проверка выполнения требований стандартов в части параметров мореходности, при которых обеспечиваются приемлемые условия работы экипажа и пассажиров, проектами научно-исследовательских судов АО «ЦМКБ «Алмаз». Проверка позволила подтвердить правильность принятых значений их главных кораблестроительных характеристик, при которых обеспечиваются приемлемые условия работы экипажа для решения соответствующих задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I. Классификация / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025. — 25 — 34 с.
2. Zu M. Seakeeping criteria revisited / M. Zu, K. Garne, A. Rosen // *Ocean Engineering*. — 2024. — Vol. 297. — P. 116785.
3. Karppinen T. Seakeeping performance assessment of ships // T. Karppinen, T. Aitta. — Technical Research Centre of Finland, 1986.
4. Живица С.Г. Ускорения от качки и их учет при оценке мореходности судна / С.Г. Живица // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 68/69. — С. 20 — 33.
5. Pattison J.H. Human performance factors and measures in hull form selection / J.H. Pattison, D.J. Sheridan. — Paper presented at the RTO AVT Symposium on “Habitability of Combat and Transport Vehicles: Noise, Vibration and Motion”, Prague, Czech Republic, 4 — 7 October 2004, and published in RTO-MP-AVT-110. — P. 34-1 — 34-24.
6. NATO — STANAG 4154. Common procedures for seakeeping in the ship design process. [Электронный ресурс] URL: <https://standards.globalspec.com/std/14248310/stanag-4154> (дата обращения 01.11.2024).
7. Baitis A.E. Seakeeping criteria for 47-ft, 82-ft, and 110-ft U.S. Coast Guard Cutters / A.E. Baitis, C.J. Bennett, W.G. Meyers, W.T. Lee. — 1986.
8. O'Halon J.F. Motion sickness incidence as a function of frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion / J.F. O'Halon, M.E. McCauley // *Aerospace Medicine*. — 1974. — Vol. 45, No. 4. — P. 366 — 369.
9. Dobie T.G. The importance of the human element in ship design / T.G. Dobie. — Paper presented at the Ship Structure Symposium, Arlington VA, June 13, 2020.
10. Wertheim A.H. Working in a moving environment / A.H. Wertheim // *Ergonomics*. — 1999. — Vol. 41, No. 12. — P. 1845 — 1858.
11. Монсеева М.Э. О совместности требований к остойчивости, непотопляемости и бортовой качке промысловых судов / М.Э. Монсеева. — Калининград: КТИРПИХ, 1973.
12. Бородай И.К. Качка судов на морском волнении / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. — Л.: Судостроение, 1969. — 431 с.
13. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2003. — С. 81 — 92.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025. P. 25 — 34.
2. Zu M., Garm K., Rosen A. Revised criteria of marine management. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 297. P. 116785.
3. Karppinen T., Aitta T. Assessment of seaworthiness characteristics of ships. Technical Research Center of Finland, 1986.
4. Zhivitsa S.G. Accelerations due to ship motion in waves and their consideration in ship seakeeping assessment. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2022. No. 68/69. P. 20 — 33. (In Russ.)
5. Pattison J.H., Sheridan D.J. Human performance factors and measures in hull form selection. — Paper presented at the RTO AVT Symposium on "Habitability of Combat and Transport Vehicles: Noise, Vibration and Motion", Prague, Czech Republic, 4 — 7 October 2004, and published in RTO-MP-AVT-110. P. 34-1 — 34-24.
6. NATO — STANAG 4154. General procedures for ensuring seaworthiness in the ship design process. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14248310/stanag-4154> (accessed 01.11.2024).
7. Baitis A.E., Bennett K.J., Meyers W.G., Lee W.T. Navigation criteria for 47-foot, 82-foot and 110-foot vessels of the United States Coast Guard. 1986.
8. O'Halon J.F., McCauley M.E. Motion sickness incidence as a function of frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion. *Aerospace Medicine*. 1974. Vol. 45, No. 4. P. 366 — 369.
9. Dobie T.G. The importance of the human factor in ship design. — Report presented at the Symposium on Shipbuilding, Arlington, Virginia, June 13, 2020.
10. Wertheim A.H. Work in a moving environment. *Ergonomics*. 1999. Vol. 41 (12). P. 1845 — 1858.
11. Moiseeva M.E. O sovместimosti trebovaniy k ostoichivosti, nepotoplyaemosti i bortovoi kachke promyslovyykh sudov [On the compatibility of requirements for stability, unsinkability and on-board rolling of fishing vessels]. Kaliningrad: KTIRPiH, 1973.
12. Borodai I.K., Netsvetaev Yu.A. Kachka sudov na morskoy volnenii [The rocking of ships on the waves of the sea]. L.: Sudostroenie, 1969.
13. Reference data on wind and wave climate of the Barents Sea, the Sea of Okhotsk and the Caspian Sea / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2003. P. 81 — 92.

УДК 629.5.01
EDN FWGEIP

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ФИДЕРНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО СУДНА

Ю.П. Буров, ст. инженер-инспектор, Российский морской регистр судоходства, Новороссийский филиал, 353900 Россия, г. Новороссийск, ул. Мира, 4, e-mail: burov.y.p@rs-class.org

Возможность перевозки широкого спектра грузов делает контейнеровозы одним из наиболее перспективных типов судов в современном морском торговом флоте. При этом неуклонно растет не только их количество, но и контейнеровместимость самых больших представителей этого типа. Целью настоящего исследования является анализ основных характеристик контейнерных судов и получение для них функциональных зависимостей, применение которых позволит на начальной стадии проектирования определить значения главных размерений. Для построения искомых выражений предлагается обратиться к имеющейся статистике, отражающей основные характеристики введенных в эксплуатацию контейнерных судов и провести подробный анализ имеющихся данных. Отдельный интерес вызывает исследование зависимостей характеристик контейнерных судов определенной дедвейтной группы, что позволяет приводить более точные расчетные функции под конкретное техническое задание. Актуальность, всесторонность и сложность исследуемого вопроса обуславливают его перспективность и востребованность в современном судостроении.

Ключевые слова: контейнерное судно, функциональная зависимость, длина судна, ширина судна, контейнеровместимость, дедвейт, мировой торговый флот.

Для цитирования: Буров Ю.П. Взаимосвязь элементов и характеристик фидерного контейнерного судна / Ю.П. Буров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 62 — 73. — EDN FWGEIP.

STUDY OF FUNCTIONAL DEPENDENCIES OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF A CONTAINER SHIP

Yu.P. Burov, Senior Engineer Surveyor, Novorossiysk branch of Russian Maritime Register of Shipping, 353900 Russia, Novorossiysk, ul. Mira, 4, e-mail: burov.y.p@rs-class.org

The ability to transport a wide range of cargoes makes container ships one of the most promising types of vessels in the modern merchant marine fleet. At the same time, not only their number is steadily increasing, but also the container capacity of the largest representatives of this type. The purpose of this study is to analyze the main characteristics of container ships and obtain functional dependencies for them, the application of which will allow determining the values of the main dimensions at the initial design stage. To find the desired expressions, it is proposed to refer to the available statistics reflecting the main characteristics of commissioned container ships and to conduct a detailed analysis of the available data. Of particular interest is the study of the dependencies of the characteristics of container ships of a certain deadweight group, which makes it possible to provide more accurate calculation functions for a specific technical specification. The relevance, comprehensiveness and complexity of the issue under study determine.

Key words: container ship, functional dependence, ship length, ship width, container capacity, deadweight, world merchant fleet.

For citation: Burov Yu.P. Study of functional dependencies of the main characteristics of a container ship. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 62 — 73. EDN FWGEIP. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование контейнерного судна представляет собой сложный инженерный процесс, требующий учета множества факторов, таких как грузоподъемность, мореходные качества и экономическая эффективность. Одной из ключевых задач является определение главных размерений судна — длины, ширины, высоты борта и осадки, которые напрямую влияют на его эксплуатационные качества. Современные методы проектирования предполагают использование математического моделирования и компьютерных технологий, позволяющих оптимизировать характеристики судна, однако даже с учетом современных инструментов существует необходимость глубокого понимания специфики эксплуатации судов в различных условиях, что можно получить на основе анализа существующего флота.

На сегодняшний день имеется большое количество работ на тему исследования зависимостей главных размерений контейнерного судна. Так, в источнике [1] приведены графики функций длины, высоты борта и ширины судна от контейнеровместимости. Из более современных трудов можно также выделить работы [2 — 4].

Однако, в отличие от вышеприведенных источников, целью настоящего исследования является получение именно тех функциональных зависимостей, которые впоследствии могут быть применены на начальной стадии проектирования судна для определения оптимальных значений главных размерений конкретных классов контейнерных судов. Для построения искомых функций предлагается обратиться к имеющейся статистике, описывающей основные характеристики уже введенных в эксплуатацию контейнерных судов, и провести подробный анализ имеющихся данных. Стоит отметить, что при текущей постановке задачи важен не только вид самой математической зависимости, но и корректный выбор зависимых переменных. При этом особый интерес вызывает исследование поведения таких зависимостей в рамках одной дедвейтной группы контейнерных судов.

Многие типы судов способны при определенных случаях загрузки нести на своем борту контейнеры, причем иногда количество такого груза сопоставимо с контейнеровместимостью самих контейнерных судов. В настоящей работе рассматриваются контейнерные суда, имеющие в символе класса словесную характеристику «container ship» и предназначенные в соответствии с ч. 1 Правил классификации и постройки морских судов РС [5] для перевозки контейнеров международного образца, а в трюмах таких судов оборудованы ячеистые направляющие конструкции. Для обеспечения оперативности процесса погрузки-разгрузки такие суда имеют широкое раскрытие главной палубы и высокий центр тяжести из-за наличия большого количества контейнеров на открытой палубе. Данные особенности требуют от судна достаточного запаса прочности и остойчивости, что регламентируется специальными требованиями к контейнерным судам со стороны классификационных обществ [6].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Контейнерные суда успешно эксплуатируются уже в течение многих десятилетий, что позволило накопить большой объем статистической информации по ним. На основе базы данных, имеющейся в открытом доступе в сети Интернет [7], проведена выборка значений основных характеристик из 53 судов разной контейнеровместимости. В процессе выбора судна для построения функциональной зависимости применялись следующие критерии: равномерное распределение точек графика в исследуемом диапазоне, наличие достоверных и точных данных (информация минимум из двух проверенных источников), различные годы и места постройки судов.

Рис. 1 отображает графическую зависимость длины судна от его контейнеровместимости: ось x — контейнеровместимость судна, измеряемая в 20-футовых контейнерах международного образца (TEU); ось y — габаритная длина судна (м). Настоящая и все последующие функциональные зависимости реализованы с помощью программного комплекса «Statistica» [8].

В настоящий момент наибольшие контейнерные суда имеют длину почти 400 м, а их контейнеровместимость превысила 24 000 TEU, что наглядно демонстрирует рис. 1. Следует отметить, что при высокой контейнеровместимости (более 18 000 TEU) ок. 400 м — максимальная длина. Если проанализировать список крупнейших контейнеровозов в мире, то можно четко определить, что их длина 400 м или немного меньше, а ширина около 60 м. Такие габариты — сегодняшний предел для контейнерных судов. Существует большое количество причин таким ограничениям.

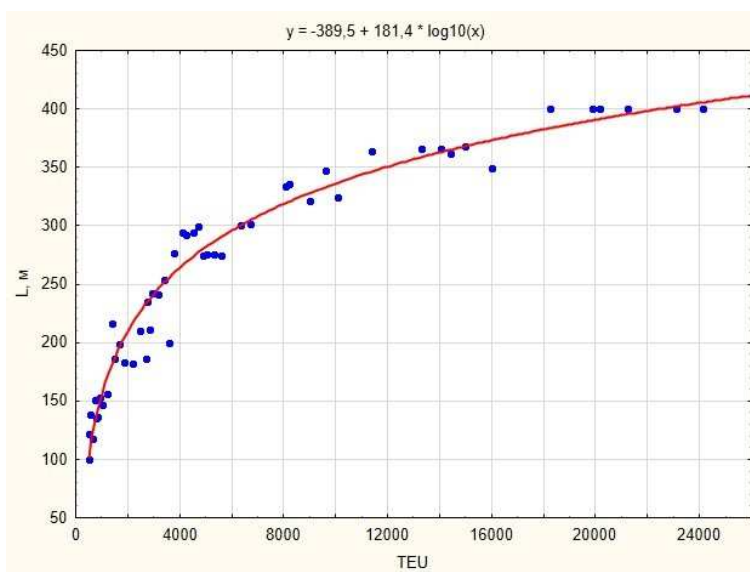


Рис. 1. Зависимость длины судна от контейнеровместимости

Если построить суда с большими размерениями, то они будут выходить за рамки даже самых крупных портов мира, а модернизация портовой инфраструктуры является очень дорогостоящим и болезненным процессом. Эффект от увеличения грузоподъемности судов будет намного меньше, нежели вложенные средства на модернизацию портовой инфраструктуры. Увеличение размеров судна также резко сокращает возможность прохода через шлюзы и каналы, включая Суэцкий и Панамский, которые имеют ограничения по размеру. Критичным в данном случае может оказаться и увеличение осадки судна. Самые большие контейнерные суда в некоторых портах «уже фактически сидят так глубоко в воде, что касаются дна и скользят по илу, а не плавают над ним» [9]. Другая проблема заключается в том, как очень длинные и широкие суда справляются с морским волнением. Когда волны проходят по длине очень большого контейнеровоза, его нос и корма могут выходить из воды всякий раз, когда пик волны находится в средней части судна, что оставляет часть носа и кормы без поддержки водой. Такие явления представляют опасность для целостности конструкции корпуса судна и могут привести к возникновению недопустимых напряжений. Также массивные контейнеровозы имеют очень большие люки на палубах, а следовательно, их общая структура слабее, чем у некоторых других судов, и более подвержена кручению или скручиванию, что негативно сказывается на мореходных качествах.

Вышеперечисленными проблемами перечень не исчерпывается, ведь большие суда вдобавок требуют огромных объемов топлива и размещения большого количества груза ярусами, часты случаи потерь контейнеров при переходе. Все вышеизложенное позволяет утверждать, что длина около 400 м и ширина около 60 м — оптимальные характеристики самых больших контейнерных судов на настоящий момент с технической и экономической точек зрения.

Зависимость ширины судна от контейнеровместимости изображена на рис. 2. В данном случае функция очень схожа с предыдущей, что позволяет сделать выводы о тесной взаимосвязи ширины и длины судна: изменение одного параметра непременно приводит к изменению другого. Рис. 3 показывает устойчивую линейную зависимость полного дедвейта судна от количества контейнеров, а на рис. 4 изображена функция скорости от контейнеровместимости судна.

На рис. 1 — 5 представлены зависимости основных характеристик судна от его контейнеровместимости, однако полученные графики отображают результаты для всех дедвейтных групп контейнерных судов, от фидерных до больших контейнерных, и не всегда учитывают особенность конкретной группы.

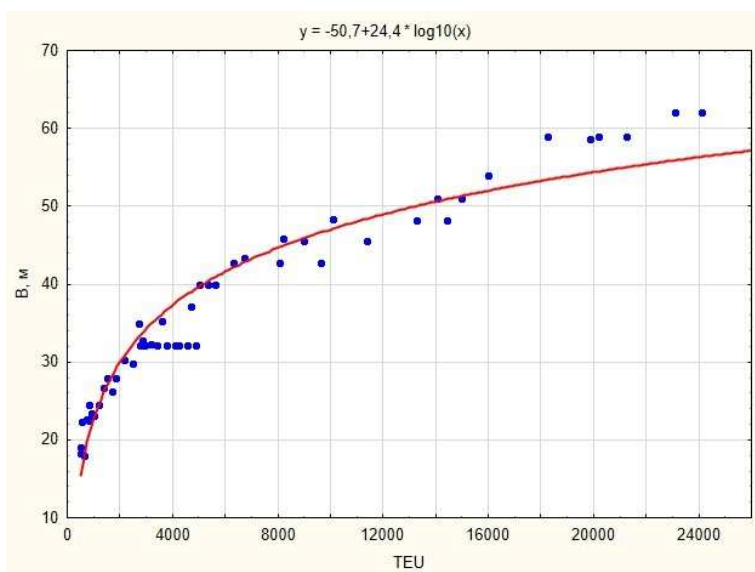


Рис. 2. Зависимость ширины судна от контейнеровместимости

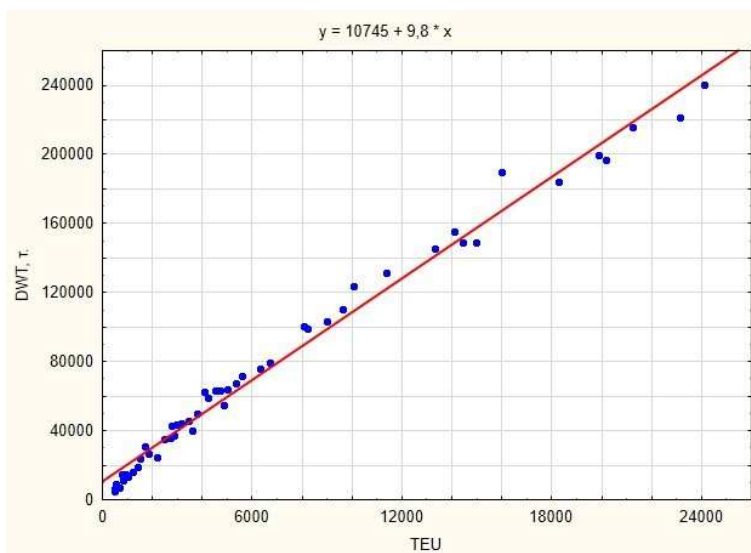


Рис. 3. Зависимость дедвейта судна от контейнеровместимости

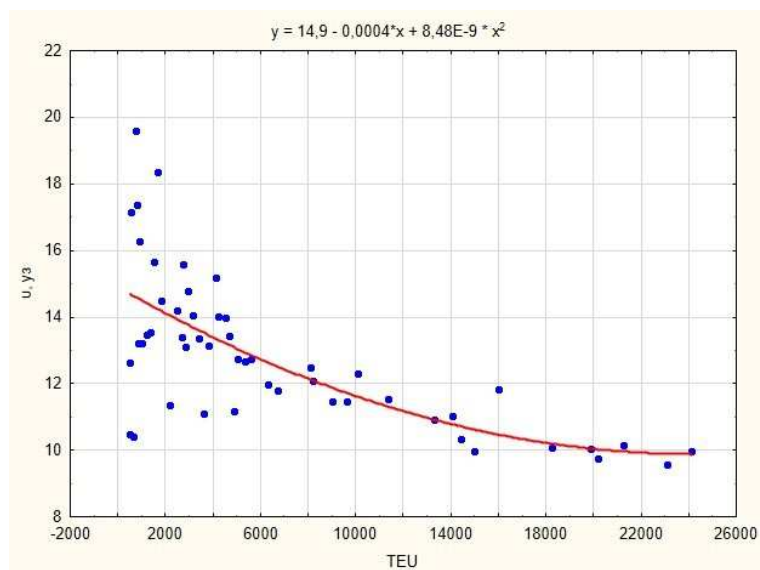


Рис. 4. Зависимость скорости судна от контейнеровместимости

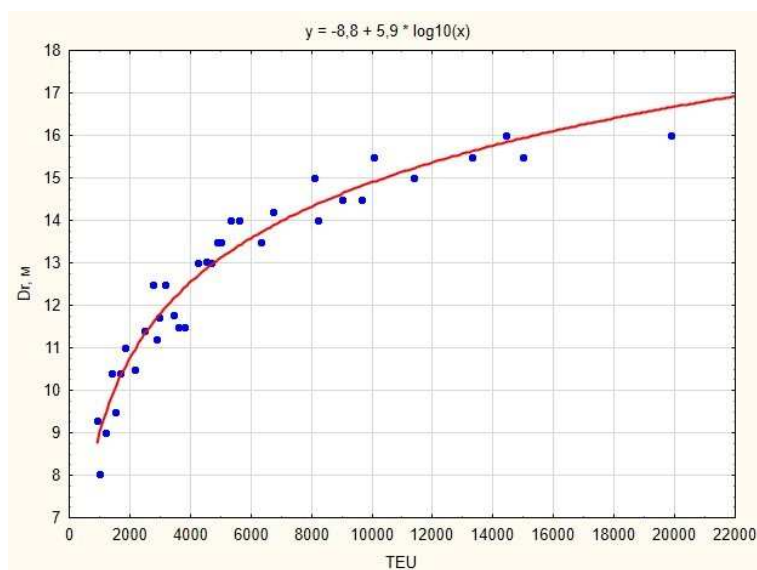


Рис. 5. Зависимость осадки судна от контейнеровместимости

В современной научной литературе нет однозначного деления контейнерных судов на группы по контейнеровместимости. К фидерным контейнерным судам относят суда вместимостью от 800 до 3500 TEU [10], от 260 до 2500 TEU [11], от 1000 до 2800 TEU [12]. В источнике [13] также приведена одна из возможных классификаций контейнерных судов на подтипы. Объектом дальнейшего исследования будут фидерные контейнерные суда, максимальная контейнеровместимость которых в рамках настоящего исследования принята до 3000 TEU (рис. 6).



Рис. 6. Фидерное контейнерное судно контейнеровместимостью 2500 TEU¹

В работе [14] исследуется эффективность фидерных контейнерных судов в среднесрочной (15 лет) перспективе. При такой постановке вопроса большую точность в расчетах на начальной стадии проектирования показали бы именно функции зависимости, построенные на основе статистики фидерных контейнерных судов.

Фидерные контейнерные суда являются одним из наиболее востребованных типов судов в мире благодаря ряду преимуществ [15]: меньшее время доставки груза за счет сокращения времени погрузки-разгрузки судна, малые размеры, а следовательно, возможность зайти в любой порт, отсутствие зависимости погрузки судна от прихода-отхода других судов.

¹Изображение из открытого источника в сети интернет: https://cargo-vessels-international.at/html/container_2_000-3_000_teu_gear1.html.

Важным фактором, обуславливающим необходимость применения специализированных для конкретного класса судна зависимостей, является в том числе схожесть условий эксплуатации. Например, длина эксплуатационной линии больших контейнерных судов достигает больше 10 000 морских миль, в то время как у фидерных контейнеровозов она ограничивается 2000 — 3000 морских миль. Вид энергетической установки, степень автоматизации, архитектурно-конструктивный тип, количество членов экипажа и многие другие технические характеристики судна оказывают непосредственное влияние на его главные размерения с самого начального этапа проектирования. Так, в работе [16] приводится пример влияния условий эксплуатации на проектные характеристики навалочных судов, то есть исследуется вопрос, который актуален и для контейнерных судов. В рамках настоящего исследования искомые зависимости и степень влияния на них тех или иных условий эксплуатации будут освещены путем построения функции в рамках одной дедевной группы — фидерных контейнерных судов. Для построения зависимостей характеристик фидерных судов применена выборка из 20 судов контейнеровместимостью от 500 до 3000 TEU.

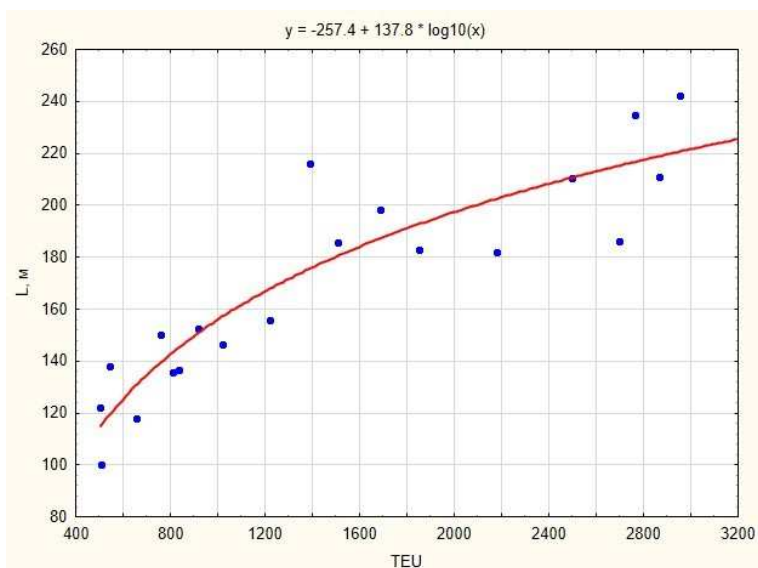


Рис. 7. Зависимость длины фидерных контейнерных судов от контейнеровместимости

На рис. 7 изображена зависимость длины фидерных контейнерных судов от контейнеровместимости. Данная функция по своему типу не отличается от полученной ранее аналогичной зависимости для всех классов судов, однако имеет ярко выраженный более острый угол наклона к оси X и больший разброс значений длины судна. Такие результаты объясняются большим разнообразием рассматриваемых судов и возможностью варьировать их характеристики и архитектурно-конструктивный тип ввиду небольших размеров. Другими словами, если большие контейнерные суда представляют схожие по своим характеристикам и параметрам проекты, имеют полные обводы, типовые размеры и расположения грузовых трюмов, то фидерные контейнерные суда могут значительно отличаться друг от друга по этим характеристикам.

Рис. 8, 9 отображают зависимость ширины и дедвейта фидерного контейнерного судна от его контейнеровместимости. Функции аналогичны полученным ранее, однако содержат более точное математическое описание зависимости исследуемых характеристик.

С использованием методов регрессионного анализа получены математические зависимости рассмотренных выше величин:

- формулы (1) — (5) для всех типов контейнеровозов:

$$L = -389,5 + 181,4 \cdot \log_{10}(\text{TEU}), \quad (1)$$

$$B = -50,7 + 24,4 \cdot \log_{10}(\text{TEU}), \quad (2)$$

$$DWT = 10745 + 9,8 \cdot \text{TEU}, \quad (3)$$

$$v = 14,9 - 0,0004 \cdot \text{TEU} + 8,48 \cdot 10^{-9} \cdot \text{TEU}^2, \quad (4)$$

$$Dr = -8,8 + 5,92 \cdot \log_{10}(\text{TEU}), \quad (5)$$

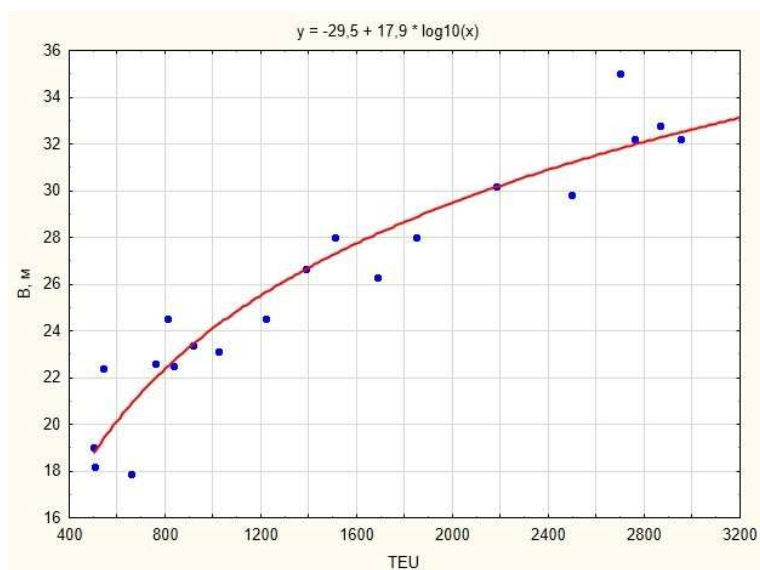


Рис. 8. Зависимость ширины фидерных контейнерных судов от контейнеровместимости

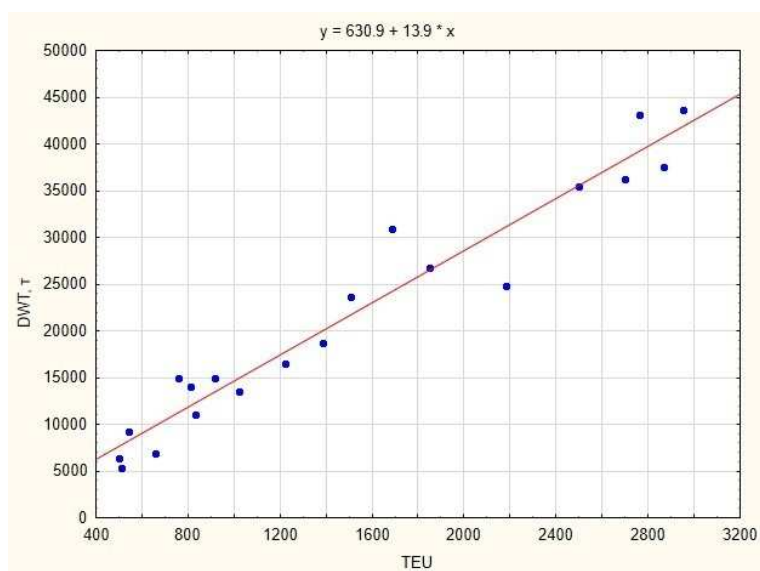


Рис. 9. Зависимость дедвейта фидерных контейнерных судов от контейнеровместимости

• формулы (6) — (10) для фидерных контейнерных судов:

$$L = -257,4 + 137,8 \cdot \log_{10}(\text{TEU}), \quad (6)$$

$$B = -29,5 + 17,9 \cdot \log_{10}(\text{TEU}), \quad (7)$$

$$DWT = 630,9 + 13,9 \cdot \text{TEU}, \quad (8)$$

$$v = 14,5 - 8,8E5 \cdot \text{TEU}, \quad (9)$$

$$Dr = -10,5 - 6,4 \cdot \log_{10}(\text{TEU}). \quad (10)$$

Полученные графики на рис. 7 — 11 более точно описывают характеристики фидерных контейнерных судов. Для оценки степени точности необходимо провести проверочные расчеты по функциям.

В табл. 1 приведены характеристики контейнерных судов с контейнеровместимостью до 3000 TEU. Для большей информативности приведены IMO номера судов, участвующих в расчетах. Все эти суда, согласно общепринятой классификации, относятся к фидерным. Стоит отметить, что характеристики данных судов не были включены в построение раннее полученных зависимостей, что обеспечивает независимость настоящих практических расчетов.

Таблица 1

Характеристики контейнерных судов

№	Имя	IMO	L , м	B , м	TEU	DWT, т
1	EMMA	9124574	113,0	16,4	510	5660
2	IBERIAN EXPRESS	9167851	128,5	22,4	749	11117
3	KOTA RAJIN	9296286	145,9	22,6	910	13212
4	HUMACAO	6708379	213,5	27,5	1258	22582
5	CARIBIA EXPRESS	7383877	204,0	30,8	1560	27795
6	MSC CLORINDA	7820394	221,7	32,3	1948	30714
7	MSC HOBART	9077288	187,5	28,4	2004	33523
8	HYUNDAI PROGRESS	9158563	182,4	30,2	2181	24766
9	MAERSK BAHRAIN	7361219	239,0	30,6	2328	37129
10	KOTA PERMATA	9342695	222,0	30,0	2824	39446

В табл. 2 приведены итоговые расчеты в соответствии с полученными зависимостями, где Δ_{L1} , Δ_{B1} , Δ_{DWT1} — погрешность в расчетах в соответствии с общими функциями для всех классов контейнерных судов (рис. 1 — 3), а Δ_{L2} , Δ_{B2} , Δ_{DWT2} — соответствующие расчеты по графикам рис. 7 — 9 специально для фидерных контейнерных судов.

Таблица 2

Расчет характеристик контейнерных судов

№	Δ_{L1} , %	Δ_{L2} , %	Δ_{B1} , %	Δ_{B2} , %	Δ_{DWT1} , %	Δ_{DWT2} , %
1	10,0	2,4	6,3	15,6	178,1	36,4
2	2,7	7,9	13,2	2,0	62,7	0,7
3	0,9	3,0	4,9	3,8	48,8	0,5
4	19,1	20,5	9,3	5,5	2,2	19,8
5	7,0	10,5	11,7	10,3	6,3	19,7
6	6,5	11,6	8,5	9,0	2,9	9,8
7	11,7	5,4	5,2	4,2	9,4	15,0
8	18,5	11,1	1,9	0,2	29,7	25,0
9	7,4	13,6	2,9	0,7	9,6	11,1
10	6,5	1,7	11,7	7,6	2,6	1,1
Δ_{CP}	9,0	8,8	7,6	5,9	35,2	13,9

Анализ полученных данных показывает, что погрешности при расчете длины судна практически идентичны: 9,0 % против 8,8 %, а при расчете ширины судна точность вычислений выше на 1,7 % у функции для фидерных судов. Совсем критичную разницу погрешности демонстрируют в третьем случае — по дедвейту судна, где общая функция показала погрешность 35,2 %, а специализированная — всего 13,9 %.

Результаты расчетов дают разную степень погрешности итоговых вычислений. Функциональные зависимости демонстрируют относительно невысокую для начального этапа проектирования степень погрешности при расчете длины и ширины судна, однако погрешность при расчете дедвейта значительно выше. Данный факт объясняется тем, что дедвейт и контейнеровместимость судна хоть и связанные между собой величины, но не являются однозначно определяющими друг друга. Иначе говоря, судно с большей контейнеровместимостью не всегда будет иметь больший дедвейт, потому что контейнеровместимость — это «объем грузовых пространств» контейнерного судна вместе с открытыми пространствами (палубой), а дедвейт — это в основном масса груза, который может быть размещен в контейнерах. Соотношение «контейнеровместимость/дедвейт» является одной из основных характеристик контейнерного судна и на начальном этапе проектирования может быть определено с погрешностью. Чем меньше размеры судна, тем больше бывает такая погрешность, потому что суда с небольшими размерами (к которым относятся фидерные контейнеровозы) больше подвержены всевозможным модернизациям, переоборудованиям, вследствие которых может меняться как контейнеровместимость, так и дедвейт судна в процессе проектирования.

С этой точки зрения важным вопросом при проектировании контейнерного судна является расчетная масса загруженного контейнера. Это позволит в рамках настоящего и последующих исследований принимать термин «средняя масса контейнера», то есть допущение, что все контейнеры имеют одинаковую массу.

На рис. 10 полученная зависимость массы контейнера от контейнеровместимости судна демонстрирует явную тенденцию к снижению средней массы одного контейнера с ростом размеров судна. Полученные результаты подтверждают изложенный ранее тезис: заявленное увеличенное количество контейнеров не отображает качественного увеличения соотношения «дедвейт/контейнеровместимость» судна, а лишь увеличение объема грузовых пространств судна. Иначе говоря, контейнерные суда лишь в редких случаях могут нести на борту заявленное максимальное количество контейнеров, поскольку высока вероятность превышения дедвейта судна.

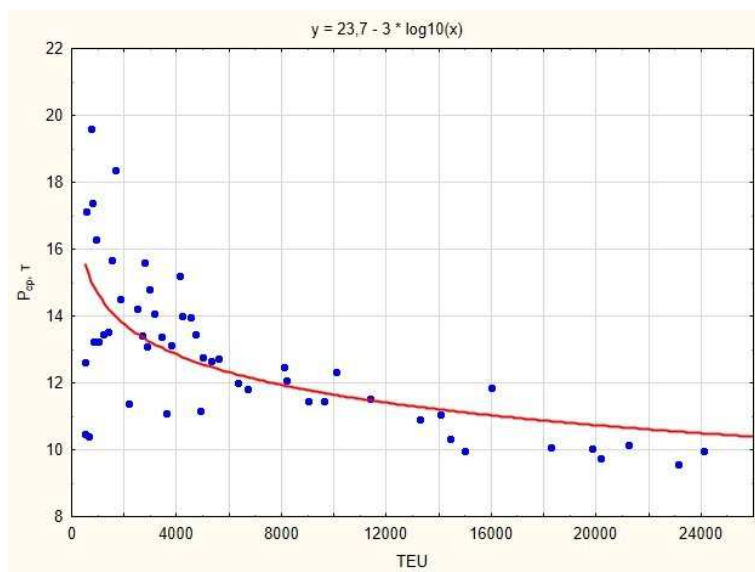


Рис. 10. Зависимость массы контейнера от контейнеровместимости судна

Приближенная оценка массы одного контейнера (τ) при проектировании может быть получена по уравнению для контейнерных судов:

$$P_{\text{ср}} = 23,7 - 3 \cdot \log_{10}(\text{TEU}) \pm 1,26. \quad (11)$$

Рис. 11 представляет собой график зависимости массы контейнера от контейнеровместимости фидерного судна. Как видно из построенных точек значений, контейнеровместимость судов, на основе которых была реализована функция, варьируется в пределах 11 — 18 т, что и приводит к широкому разбросу значений. Функция рис. 11 имеет вид:

$$P_{\text{ср}} = 14,4 + 0,0004 \cdot \text{TEU} \pm 1,79. \quad (12)$$

Важным вопросом в процессе построения зависимостей является анализ полученных функций. Один из самых распространенных показателей в таких случаях — коэффициент детерминации, определяющий степень зависимости между переменными. Значения коэффициента находятся в диапазоне от 0 до 1: чем он ближе к 1, тем сильнее зависимость между переменными. Как правило, значения коэффициента выше 0,7 демонстрируют достаточную степень наличия зависимости, если значение меньше, функция характеризуется слабой зависимостью между переменными.

Значения табл. 3 (где индексом «f» отмечены графики для фидерных судов) демонстрируют наличие достаточной зависимости между переменными.

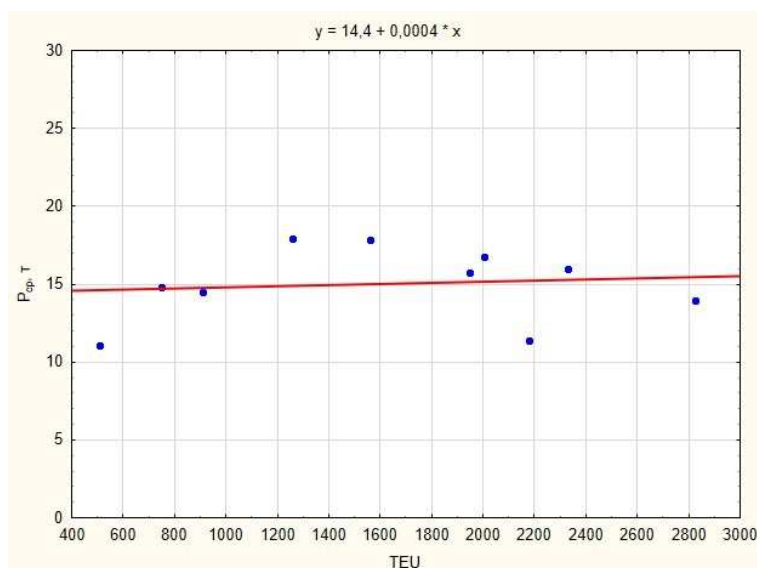


Рис. 11. Зависимость массы контейнера от контейнеровместимости фидерного судна

Таблица 3

Значения коэффициента детерминации

№	Функция	R
1	L / TEU	0,86
2	B / TEU	0,79
3	DWT / TEU	0,80
4	v / TEU	0,76
5	Dr / TEU	0,85
6	L_f / TEU_f	0,77
7	B_f / TEU_f	0,78
8	DWT_f / TEU_f	0,78
9	$P_{\text{ср}} / \text{TEU}$	0,77
10	$P_{\text{ср}f} / \text{TEU}_f$	0,76

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках настоящего исследования построены графики зависимостей основных характеристик контейнерных судов, проведены практические расчеты с применением полученных результатов. Полученные формулы (1) — (5) способны в первом приближении определить главные размерения судна на начальном этапе проектирования. Однако стоит отметить, что такие функции имеют погрешность, достигающую в определенных случаях значительной степени. Формулы (6) — (10), описывающие функциональные зависимости для фидерных контейнеровозов, продемонстрировали один из способов уменьшить погрешность при расчетах — применение статистики для конкретного класса контейнерных судов. В процессе проектирования контейнерного судна могут быть применены и другие способы уменьшения погрешностей:

- увеличение количества расчетных точек графика путем добавления статистики по другим контейнерным судам;
- построение графика в рамках одного класса контейнерных судов или объединение их в группы по другим признакам (например, год постройки, место постройки);
- увеличение количества проверочных расчетов, демонстрирующих полученную погрешность по большему количеству судов, что поможет выбрать оптимальный тип математической зависимости в рамках поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение главных характеристик судна — необходимая задача уже начального этапа проектирования, а значит, важность искомых зависимостей трудно переоценить. Изложенный метод получения зависимостей главных характеристик судна ценен в том числе тем, что позволяет упрощенным способом в первом приближении определить эксплуатационную привлекательность судна, представить заказчику актуальное коммерческое предложение. Выделим перспективные направления развития в изучении поднятых вопросов:

- увеличение количества задействованных в расчетах характеристик судна;
- распространение метода на другие типы судов, также перевозящих контейнеры;
- выделение новых подгрупп типов судов, для которых такие зависимости могут быть построены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайкович А.И. Проектирование контейнерных судов: уч. пос. / А.И. Гайкович. — Л.: ЛКИ, 1984. — 27 с.
2. Radfar S. Standardization of the main dimensions of design container ships in ports — A case study / S. Radfar, A. Taherkhani, R. Panahi // *World Journal of Engineering and Technology*. — 2017. — Vol. 5, No. 4B. — P. 51 — 61.
3. Veldman S. On the ongoing increase of containership size / S. Veldman // *Advances in Maritime Logistics and Supply Chain Systems* / ed. by Ek Peng Chew, Loo Hay Lee, Loon Ching Tang. — Singapore: World Scientific Publishing, 2011. — P. 201 — 228.
4. Якута И.В. Исследование влияния изменения отношений главных размерений на мореходные качества контейнеровозов / И.В. Якута // *Известия КГТУ*. — 2023. — № 68. — С. 110 — 124.
5. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I. Классификация / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
6. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIX. Дополнительные требования к контейнеровозам и судам, перевозящим грузы преимущественно в контейнерах / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2019.
7. <https://cargo-vessels-international.at/index.html> (дата обращения 18.06.2025).
8. <https://statsoftstatistica.ru/> (дата обращения 18.06.2025).
9. Baraniuk C. Why container ships probably won't get bigger // *BBC. Future Now*. — 5 July 2022. [Электронный ресурс] URL: <https://www.bbc.com/future/article/20220629-why-container-ships-probably-wont-get-bigger> (дата обращения 18.06.2025).
10. Кириченко А.В. Организация грузовых мест в логистике: уч. пос. / А.В. Кириченко, Д.О. Рычков, В.А. Фетисов. — СПб.: ГУ ГУАП, 2009. — 244 с.
11. Размеры грузовых судов и их практические определения. 05.11.2012. [Электронный ресурс] URL: <https://capmen.wordpress.com/2012/11/05> (дата обращения 18.06.2025).
12. Propulsion trends in container vessels / Man Diesel and Turbo. — Copenhagen, 2020. — 8 p.
13. Порто-ориентированная логистика — 2018: м-лы 2-й Междунар. науч.-практ. конф. 1 — 2 ноября 2018 г. — СПб.: ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — 247 с.
14. Буров Ю.П. Оптимизация характеристик контейнерного судна с учетом прогнозируемой цены его постройки и эксплуатации / Ю.П. Буров // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2020. — № 48. — С. 76 — 82.
15. Polat O. An overview of feeder services in the era of mega containerships / O. Polat // *Intelligent Transportation and Planning: Breakthroughs in Research and Practice* / ed. by Information Resources Management Association. — Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing, 2018. — P. 187 — 209.
16. Китаев М.В. Анализ влияния условий эксплуатации на проектные характеристики балкеров / М.В. Китаев // *Научные проблемы водного транспорта*. — 2022. — № 73 (4). — С. 27 — 44.

REFERENCES

1. Gaikovich A.I. *Proektirovanie konteynernykh sudov* [Design of container ships: a study guide]. Leningrad: LKI, 1984. 27 p.
2. Radfar S., Taherkhani A., Panahi R. Standardization of the main dimensions of design container ships in ports — A case study. *World Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 5, No. 4B. P. 51 — 61.
3. Veldman S. On the ongoing increase of containership size. *Advances in Maritime Logistics and Supply Chain Systems* / ed. by Ek Peng Chew, Loo Hay Lee, Loon Ching Tang. Singapore: World Scientific Publishing, 2011. P. 201 — 228.
4. Yakuta I.V. Issledovanie vliyaniya izmeneniya otnoshenii glavnykh razmerenii na morekhodnye kachestva konteynerovozov [Study of the influence of changes in the ratios of the main dimensions on the sea-keeping performance of container ships]. *Izvestia KSTU [Bulletin of the Kaliningrad State Technical University]*. 2023. No. 68. P. 110 — 124.
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIX. Additional requirements for structures of container ships and ships, dedicated primarily to carry the load in containers / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2019.
7. <https://cargo-vessels-international.at/index.html> (accessed 18.06.2025).
8. <https://statsoftstatistica.ru/> (accessed 18.06.2025).
9. Baraniuk C. Why container ships probably won't get bigger. *BBC. Future Now*. 5 July 2022. <https://www.bbc.com/future/article/20220629-why-container-ships-probably-wont-get-bigger> (accessed 18.06.2025).

10. Kirichenko A.V., Rychkov D.O., Fetisov V.A. Organizatsiya gruzovykh mest v logistike [Organization of cargo spaces in logistics]. St. Petersburg: GU GUAP, 2009. 244 p.
11. Razmery gruzovykh sudov i ikh prakticheskie opredeleniya [Cargo ships dimensions and their empirical definition]. [Электронный ресурс] URL: <https://capmen.wordpress.com/2012/11/05> (accessed 18.06.2025).
12. Propulsion trends in container vessels / Man Diesel and Turbo. Copenhagen, 2020. 8 p.
13. Porto-orientirovannaya logistika — 2018 [Port-oriented logistics — 2018: Proceedings of the International Research Conf. 1-2 Nov. 2018]. St. Petersburg: GUMRF im. admirala S.O. Makarova, 2018. 247 p.
14. Burov Yu.P. Optimization of the container ship's characteristics considering the projected cost of its construction and operation. *Marine Intellectual Technologies*. 2020. No. 48. P. 76 — 82.
15. Polat O. An overview of feeder services in the era of mega containerships. *Intelligent Transportation and Planning: Breakthroughs in Research and Practice* / ed. by Information Resources Management Association. Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing, 2018. P. 187 — 209. (In Russ.)
16. Kitaev M.V. Analysis of the impact of operation conditions on the bulk carriers design characteristics. *Russian Journal of Water Transport*. 2022. No. 73 (4). P. 27 — 44. (In Russ.)



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.015.4
EDN IXNQHS

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НОВЫХ ДАННЫХ О МОРСКОМ ВОЛНЕНИИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА ДОЛГОВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС СУДНА

М.С. Бойко, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

В.Н. Тряскин, д-р. техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

В декабре 2022 г. вступила в силу новая ревизия документа Международной ассоциации классификационных обществ — Рекомендации 34. Рекомендация включает полностью обновленные данные о статистике морского волнения в северной части Атлантического океана (Северная Атлантика). Новая ревизия документа, с одной стороны, позволила учесть современные методы прогнозирования морского волнения и особенности движения судов на трассах Северной Атлантики, а с другой стороны, вызвала опасения ряда международных профессиональных объединений. Ряд публикаций показывает, что расчетные долговременные параметры волнения в новой ревизии снизились по отношению к предыдущей ревизии Рекомендации. В настоящей статье выполнены независимые сопоставительные расчеты долговременного распределения волнового изгибающего момента и волновой перерезывающей силы для четырех судов разных размеров и архитектурно-конструктивного типа. Получены результаты сравнения расчетных значений волновых нагрузок с применением данных о морском волнении в предыдущей ревизии Рекомендации и в новой ревизии. Показано, что снижение значений волновых нагрузок может достигать 20 %. Проведены также расчеты волновых нагрузок для рассмотренных судов в соответствии с требованиями нормативных документов. Показано, что, несмотря на снижение расчетных волновых нагрузок, полученное с применением методов прямого расчета, при использовании новой ревизии Рекомендации обеспечивается хорошее согласование волновых нагрузок с требованиями нормативных документов.

Ключевые слова: *нерегулярное волнение, корпус судна, волновые нагрузки, долговременное распределение.*

Для цитирования: Бойко М.С. Оценка влияния новых данных о морском волнении в Северной Атлантике на долговременное распределение волновых нагрузок на корпус судна / М.С. Бойко, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 74 — 86. — EDN IXNQHS.

IMPACT ASSESSMENT OF THE NEW NORTH ATLANTIC WAVE DATA ON LONG-TERM HULL GIRDER WAVE LOADS

M.S. Boyko, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

V.N. Tryaskin, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

In December 2022, a new revision of International Association of Classification Societies Recommendation 34 came into force. The Recommendation includes completely updated data on wave statistics in the North Atlantic. The new revision of the document, on the one hand, made it possible to take into account modern methods of forecasting sea waves and the peculiarities of ship traffic on the North Atlantic routes; and on the other hand, it raised concerns among a number of international professional associations. A number of publications show that the calculated long-term wave parameters in the new revision have decreased compared to the previous revision of the Recommendation. In this article, independent comparative calculations of the long-term distribution of wave bending moment and wave shear force for four ships of different sizes and architectural and structural types are performed. The comparison between the values of wave loads using wave data in the previous revision of the Recommendation and the new revision are obtained. It is shown that the decrease in wave load values can reach up to 20 %. Additionally, the calculations of wave loads for the considered vessels were carried out in accordance with the requirements of regulatory documents. It was shown that despite the reduction in the wave loads obtained using direct calculation methods, good agreement of wave loads with the requirements of regulatory documents is ensured when using the new revision of the Recommendation.

Key words: *irregular waves, ship hull, wave loads, long-term distribution.*

For citation: Boyko M.S., Tryaskin V.N. Impact assessment of the new North Atlantic wave data on long-term hull girder wave loads. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 74 — 86. EDN IXNQHS.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями Правил классификации и постройки морских судов [1], величина волнового изгибающего момента и перерезывающей силы должна определяться по приведенным в Правилах формулам. Требования Правил основаны на международном стандарте общей продольной прочности судов, который сформулирован в документах Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО):

- для судов неограниченного района плавания разработано Унифицированное требование МАКО S11 «Longitudinal Strength Standard» [2];
- для контейнеровозов разработано Унифицированное требование МАКО S11A «Longitudinal Strength Standard for Container Ship» [3];
- для навалочных судов и нефтеналивных судов разработаны соответствующие Общие правила МАКО [4].

Перечисленные нормативные документы содержат простые для использования аналитические формулы для определения расчетного значения волнового изгибающего момента и волновой перерезывающей силы в корпусе судна.

Кроме применения формул нормативных документов, существует группа «методов прямого расчета» (direct calculations), которые используют аппарат теории вероятностей и математической статистики для построения долговременного распределения искомой нагрузки с учетом качки судна на волнении и позволяют определить экстремальное значение нагрузки с заданным значением обеспеченности [5, 6]. Исходными данными для применения методов прямого расчета является статистика морского волнения: распределение характерных высот волн и характерных периодов волн за длительное время в различных районах Мирового океана. Для унификации исходных данных применительно к судам неограниченного района плавания МАКО была разработана Унифицированная рекомендация 34, которая содержит статистические данные о морском волнении в северной части Атлантического океана (Северная Атлантика, North Atlantic).

Первая ревизия Рекомендации вступила в силу в 1992 г. [7] и широко применялась в судостроительной промышленности при выполнении расчетов волновых нагрузок. Фундаментально новый период развития Рекомендации начался в 2015 г. Импульс для внесения изменений был дан Международной морской организацией (ИМО) по результатам аудита нормативной базы МАКО на предмет соответствия Целевым стандартам конструкции навалочных и нефтеналивных судов. Аудиторы ИМО сформулировали «наблюдение» (observation) [8] к действующей на период аудита первой ревизии Рекомендации [7]. В частности, была отмечена устарелость данных о параметрах волнения, которые собирались в период с 1949 г. по 1986 г. Аудиторами было отмечено, что существует ряд более поздних публикаций, которые свидетельствуют о

фактически наблюдаемых высотах волн, превышающих указанные МАКО значения, а со стороны МАКО не выполнялись действия по обновлению рекомендуемой к использованию статистики волнения.

Для того чтобы ответить на ожидания международной морской общественности, выраженные в виде наблюдений аудиторов, МАКО разработала новую ревизию Рекомендации 34 [9], которая вступила в силу в декабре 2022 г. В новую ревизию внесены следующие изменения [10]:

- полная переработка исходных данных по повторяемости волнения в Северной Атлантике, которая в новой ревизии основана на данных численного моделирования, в отличие от применявшихся ранее данных визуальных наблюдений;

- при разработке данных о повторяемости волнения учтено, что судоводитель стремится проводить судно наиболее выгодным путем с учетом погоды (т.н. *weather routing*), поэтому фактически существующие условия могут не совпадать с теми, которые встречает судно;

- изменено аналитическое выражение для спектральной плотности волнения: спектр Пирсона — Московича изменен на спектр JONSWAP с параметром пиковатости $\gamma = 1,5$;

- изменен ряд рекомендаций по выбору параметров расчета: учету трехмерности волнения, выбору расчетной скорости и расчетной обеспеченности волновой нагрузки.

Новая ревизия вызвала озабоченность ряда профессиональных международных объединений. Следует отметить документ, представленный совместно Международной палатой судоходства, Международной ассоциацией независимых владельцев нефтеналивных судов, Международной ассоциацией владельцев сухогрузных судов и Королевским обществом морских инженеров на 108-й сессии Комитета по безопасности на море ИМО [11]. В документе отмечено, что новая ревизия Рекомендации может привести к снижению расчетных параметров морского волнения и, соответственно, снижению значений волновых нагрузок. Для подтверждения выполнены сопоставления значений значительной высоты волны с интервалом повторения 1 раз в год, 1 раз в 10 лет и 1 раз в 100 лет. В статье [12] группа авторов выполнила независимые расчеты долговременных распределений волнового изгибающего момента с применением упрощенных формул для его АЧХ. Показано, что применение новой ревизии Рекомендации может привести к снижению величины изгибающего момента на 13 — 19 % для нефтеналивных судов и 16 — 23 % для контейнеровозов по сравнению с расчетами по предыдущей ревизии. Качественно схожие результаты также получены в работе [10] для экстремальных нагрузок, а для усталостных нагрузок получено более существенное снижение до 40 %.

Аудиторами ИМО был сделан положительный вывод об отработке МАКО обозначенного ранее наблюдения. При этом, учитывая возникшее беспокойство о снижении нагрузок, было обозначено, что при дальнейшем аудите Рекомендации 34 МАКО следует оценить влияние новых данных о морском волнении на требования к судам, попадающим под действие Общих правил [13].

Авторами настоящей статьи была поставлена задача провести независимые сопоставительные расчеты волновых нагрузок на корпус судна на основе предыдущей ревизии Рекомендации 34 и новой ревизии. Для сопоставления были выполнены следующие задачи:

- выбраны четыре тестовых судна разных типов и размерений;
- рассчитаны значения волновых изгибающих моментов и перерезывающих сил в соответствии с требованиями нормативных документов;

- построены долговременные распределения волновых изгибающих моментов и волновых перерезывающих сил с применением метода прямого расчета на основе предыдущей ревизии Рекомендации 34 и новой ревизии;

- проведено сопоставление полученных результатов между собой и с требованиями нормативных документов.

Целью настоящей статьи не является определение расчетных значений волновых нагрузок для рассмотренных судов, так как при выполнении расчетов принимается ряд допущений, которые требуют дополнительной оценки в рамках дальнейших исследований. Целью исследования является в первую очередь получить качественную картину изменений в величине волновых нагрузок в связи со вступлением в силу новой ревизии Рекомендации 34. При выполнении расчетов использовались результаты комплексных исследований, проведенных в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете и Российском морском регистре судоходства, применялось специализированное программное обеспечение и методы теории вероятности и математической статистики.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рассмотрим методы определения волновой нагрузки волнового изгибающего момента в миделевом сечении судна и волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. в соответствии с требованиями нормативных документов.

По требованиям УТ S11 и Общих правил МАКО величина волнового изгибающего момента в миделевом сечении судна при прогибе, M_{w-sag} , и перегибе, M_{w-hog} , кНм, определяются по следующим формулам:

$$M_{w7sag} = -0,11C_W L^2 B (C_b + 0,7), \quad (1)$$

$$M_{w-hog} = 0,19C_W L^2 B C_b, \quad (2)$$

где L — расчетная длина судна, м;

B — расчетная ширина судна, м;

C_b — коэффициент общей полноты;

коэффициент C_W определяется следующим образом:

$$C_W = 10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}, \text{ если } 90 \leq L \leq 300;$$

$$C_W = 10,75, \text{ если } 300 < L \leq 350;$$

$$C_W = 10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}, \text{ если } 350 < L \leq 500.$$

Величина положительной и отрицательной волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. $F_w(+)$ и $F_w(-)$, кН, определяются, соответственно, по следующим формулам:

$$F_w(+) = 0,3C_W L B (C_b + 0,7), \quad (3)$$

$$F_w(-) = -0,3C_W L B \times \frac{190}{110} C_b. \quad (4)$$

В соответствии с требованиями УТ S11A величина волнового изгибающего момента определяется по следующим формулам:

$$M_{w-sag} = -1,5f_R L^3 C C_\alpha (B/L)^{0,8} f_{NL-sag}, \quad (5)$$

$$M_{w-hog} = 1,5f_R L^3 C C_\alpha (B/L)^{0,8} f_{NL-hog}, \quad (6)$$

где $f_R = 0,85$;

C_α — коэффициент полноты площади ватерлинии;

коэффициент C определяется следующим образом:

$$C = 1 - 1,50(1 - \sqrt{(L/L_{ref})})^{2,2}, \text{ если } L \leq L_{ref};$$

$$C = 1 - 0,45(\sqrt{(L/L_{ref})} - 1)^{1,7}, \text{ если } L > L_{ref};$$

$$L_{ref} = 315C_\alpha^{-1,3};$$

f_{NL-sag} и f_{NL-hog} — поправочные коэффициенты, с помощью которых учитываются нелинейные составляющие изгибающего момента (например, нагрузки от слеминга), величина которых зависит от геометрических параметров корпуса судна.

Величина положительной и отрицательной волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. $F_w(+)$ и $F_w(-)$, кН, определяется, соответственно, по следующим формулам:

$$F_w(+) = 5,7f_R L^2 C C_\alpha (B/L)^{0,8} (0,25 + 0,75f_{NL-sag}), \quad (7)$$

$$F_w(-) = -5,7f_R L^2 C C_\alpha (B/L)^{0,8} f_{NL-hog}. \quad (8)$$

Рассмотрим схему построения долговременных распределений волновых нагрузок с применением методов прямого расчета — на примере волнового изгибающего момента.

Вся совокупность режимов волнения и условий хода судна разбивается на отдельные «краткосрочные» стационарные режимы, в каждом из которых считают, что распределение изгибающего момента подчиняется закону Рэлея. Тогда вероятность превышения выбранного значения M_w в данном стационарном режиме равна:

$$Q_i(M > M_w) = \text{EXP}[-M_w^2 / (2D_{Mi})], \quad (9)$$

где D_{Mi} — дисперсия изгибающего момента в i -м рассматриваемом режиме движения.

Умножив значение, полученное в соответствии с (9), на вероятность существования режима и затем просуммировав по всем режимам и всем возможным районам эксплуатации судна, получают в общем случае полную вероятность превышения выбранного значения M_w :

$$Q(M > M_w) = \sum_m \sum_l \sum_k \sum_j \sum_i \text{EXP}[-M_{w_2}/(2D_{Mijklm})] p_{ij} p_k p_l p_m, \quad (10)$$

где p_{ij} — вероятность существования волнового режима, который описывается сочетанием i -го значения характерной высоты волны и соответствующего j -го характерного периода нерегулярного волнения;
 p_k — вероятность движения судна с k -м курсовым углом;
 p_l — вероятность нахождения судна в районе эксплуатации l ;
 p_m — вероятность существования режима загрузки судна m .

Вычисляя значение Q по формуле (10) для ряда значений M_w , строят долговременное распределение искомой реакции корпуса судна. Расчеты по формуле (10) обычно выполняют для ряда постоянных значений скорости судна (или постоянных чисел Фруда Fr), варьируя ее в интервале значений, свойственных рассматриваемому судну. Первая ревизия Рекомендации приводила значение 0 уз как рекомендуемое, в новой ревизии приводится рекомендуемое значение в 5 уз. Расчеты обычно выполняются отдельно для каждого предусмотренного режима загрузки судна, например, отдельно для случаев «в грузу» и «в балласте».

В соответствии с Рекомендацией все курсовые углы движения судна считаются равновероятными, а рекомендуемый шаг между значениями курсового угла при расчетах предлагается принимать не более 30° ; данная рекомендация осталась неизменной в новой ревизии документа. При рассмотрении семи курсовых углов β ($\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$), таким образом, $p_k = 1/7 = 0,1429 = \text{const}$.

Вероятность существования волнового режима p_{ij} в Рекомендации 34 задается в виде двумерных таблиц, в которых указано число характерных сочетаний высоты волны и периода по отношению к общему числу наблюдений. В первой ревизии документа в качестве характерных сочетаний указаны (H_s, T_z) , в новой ревизии приведены сочетания (H_s, T_{0m1}) , где H_s — «значительная» высота волны, м, T_z — средний период между «нулевыми» точками записи волнения, с, T_{0m1} — средний период волнения, с.

Для расчетов по формуле (10) необходимо располагать соответствующими значениями дисперсии D_M во всех рассматриваемых стационарных режимах движения. Для определения D_M пользуются основным уравнением статистической динамики для линейной динамической системы, которое можно записать в следующем виде:

$$S_M(\omega, H_s, T_z, \beta, Fr) = S_\eta(\omega, H_s, T_z) \alpha_M^2(\omega, \beta, Fr), \quad (11)$$

$$D_M = \int_0^\infty S_M(\omega, H_s, T_z, \beta, Fr) d\omega, \quad (12)$$

где S_M — спектральная плотность волнового изгибающего момента («выходного процесса»);
 S_η — спектральная плотность морского волнения («входного процесса»);
 α_M — амплитудно-частотная характеристика изгибающего момента (АЧХ);
 ω — частота волны.

В новой ревизии Рекомендации изменено выражение для спектра морского волнения. В предыдущей ревизии использовалось выражение спектра Пирсона — Московича $S_{PM}(\omega)$, в новой ревизии рекомендуется к применению выражение спектра JONSWAP с параметром пиковатости $\gamma = 1,5$ и нормировочным множителем $\alpha = 0,886$:

$$S_\eta(\omega) = \alpha S_{PM}(\omega) \gamma^{\text{EXP}[-(\omega/\omega_p - 1)^2/(2\sigma^2)]}, \quad (13)$$

где ω_p — угловая частота между положениями вершин записи волнения, а параметр σ принимает значение $\sigma = 0,07$ при $\omega/\omega_p \leq 1$ и $\sigma = 0,09$ при $\omega/\omega_p > 1$.

В новой ревизии Рекомендации откорректирована формула для учета трехмерности волнения. Для учета трехмерности волнения спектральную плотность приближенно представляют в виде произведения $S_\eta^0(\omega, \theta) = S_\eta(\omega) G(\theta)$, где θ — угол между отдельной составляющей волнения и основным направлением волн, а функция $G(\theta)$ в общем виде записывается следующим образом: $G(\theta) = k(\cos \theta)^n$. Значения коэффициентов k и n приведены в Рекомендации. В новой ревизии приведено рекомендуемое значение $n = 3$, в отличие от рекомендованного ранее значения $n = 2$.

Для применения методов прямого расчета необходимо располагать значениями АЧХ волнового изгибающего момента α_M и в более широком смысле АЧХ всех искомых реакций корпуса судна при качке. В настоящее время задача получения АЧХ при качке с применением специальных математических моделей и программного обеспечения исследована достаточно подробно. Наиболее широкое распространение в практических расчетах получили методы, основанные на потенциальной теории потока: метод плоских

сечений и панельный метод. Для применения методов разработан ряд специализированных программных комплексов: Waveship (DNV), PDStrip, Scores, HydroSTAR (BV), Wasim, Waveload (LR), Aqwa и т.п. В последние годы получены результаты сопоставительных расчетов [14, 15], подтверждающих допустимость применения как метода плоских сечений, так и панельного метода для получения АЧХ волновых нагрузок. При этом отмечаются преимущества панельного метода по учету продольного растекания жидкости и преимущества метода плоских сечений по удобству и простоте применения.

В новой редакции Рекомендации также изменен критерий выбора расчетного значения обеспеченности волновых нагрузок. В предыдущей редакции было рекомендовано значение $Q=10^{-8}$ для всех судов. В новой редакции указано, что расчетной является обеспеченность, соответствующая интервалу повторения нагрузки 1 раз в 25 лет. Это приводит к тому, что для разных по размерам судов значение Q в общем случае окажется разным. В новой редакции также конкретизирован уровень обеспеченности для расчета усталостных нагрузок $Q=10^{-2}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выполнения тестовых расчетов выбраны четыре судна различного назначения и размеров: контейнеровоз, судно типа RO/RO, навалочное судно, нефтеналивное судно. Форма корпуса рассмотренных судов приведена на рис. 1, а главные размерения приведены в табл. 1 [16].

В табл. 2 приведены результаты расчета волнового изгибающего момента в миделевом сечении и волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. по требованиям нормативных документов. Для судна типа RO/RO применяются требования УТ S11, для нефтеналивного и навалочного судов применяются требования Общих правил МАКО (CSR). Для контейнеровоза применяются требования УТ S14, однако с целью обеспечения корректности сопоставительных расчетов исключается влияние нелинейной составляющей изгибающего момента.

В рамках настоящего исследования для получения АЧХ применяется программный комплекс ДИОЛЬ, разработка которого выполнена в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете. Программное обеспечение реализует метод плоских сечений на основе математической модели, подробно изложенной в литературе [16, 17]. На рис. 2 и рис. 3 приведены примеры результатов расчета АЧХ волнового изгибающего момента в миделевом сечении и волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. контейнеровоза в грузу. Результаты приведены в безразмерном виде. По горизонтальной оси приведена безразмерная относительная длина регулярной волны $\sqrt{L_{pp}}/\lambda$, где λ — длина волны. По вертикальной оси приведено безразмерное значение АЧХ: $k_M = \alpha(M)/(\rho g B L_{pp}^2)$, $k_N = \alpha(N)/(\rho g B L_{pp}^2)$.

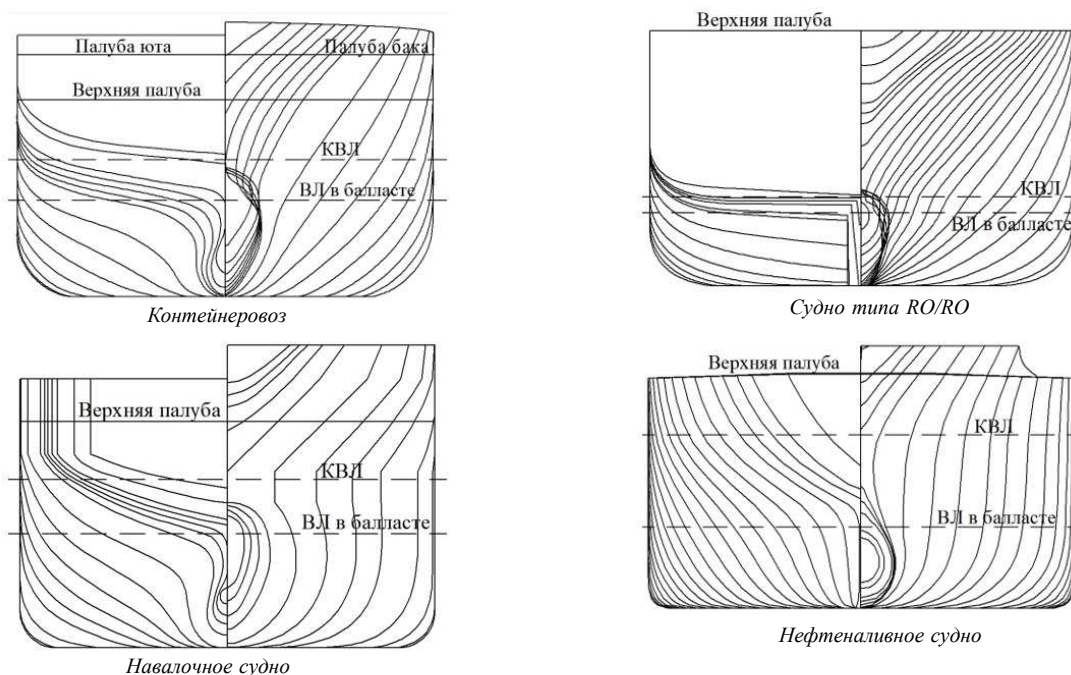


Рис. 1. Форма корпуса тестовых судов

Таблица 1

Главные размерения тестовых судов

Тип судна	Длина между ПП, L_{pp} , м	Ширина, B , м	Высота борта, H , м	Дедвейт, DW , т	Кэфф. общей полноты, C_b
Контейнеровоз	135	25,6	12,2	12 884	0,621
Судно типа RO/RO	125	23	14	4 500	0,618
Навалочное судно	149,2	23,1	12,7	21 000	0,824
Нефтеналивное судно	250,9	40,79	22,2	127 545	0,830

Таблица 2

Волновые нагрузки по требованиям нормативных документов

Величина	Контейнеровоз	Судно типа RO/RO	Навалочное судно	Нефтеналивное судно
	УТ S11A*	УТ S11	CSR	CSR
M_{w-sag} , кНм	$-5,24 \cdot 10^5$	$-4,4 \cdot 10^5$	$-7,69 \cdot 10^5$	$-4,5 \cdot 10^6$
M_{w-hog} , кНм	$5,24 \cdot 10^5$	$3,56 \cdot 10^5$	$7,17 \cdot 10^5$	$4,21 \cdot 10^6$
$F_w(+)$, кН	$1,48 \cdot 10^4$	$9,59 \cdot 10^3$	$1,40 \cdot 10^4$	$4,89 \cdot 10^4$
$F_w(-)$, кН	$-1,48 \cdot 10^4$	$-7,78 \cdot 10^3$	$-1,31 \cdot 10^4$	$-4,58 \cdot 10^4$

* — без учета нелинейной составляющей.

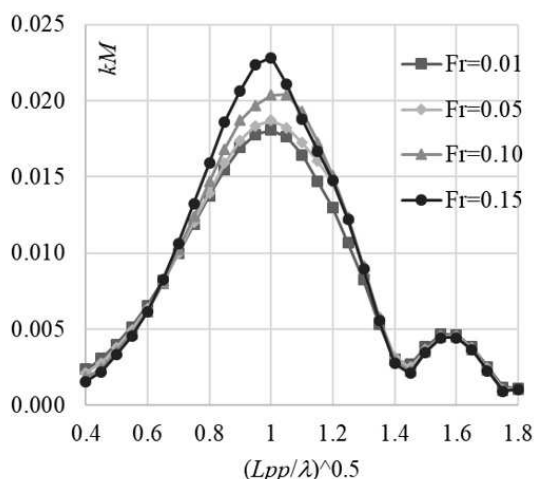
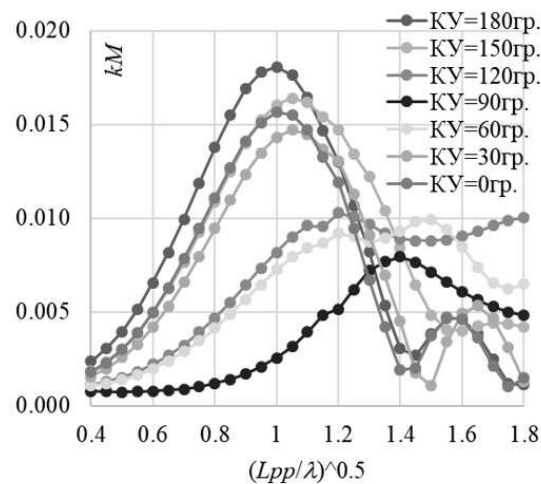
АЧХ на встречном волнении при различных F_f АЧХ при различных курсовых углах и $F_f=0,01$

Рис. 2. АЧХ волнового изгибающего момента в миделевом сечении для контейнеровоза в грузу

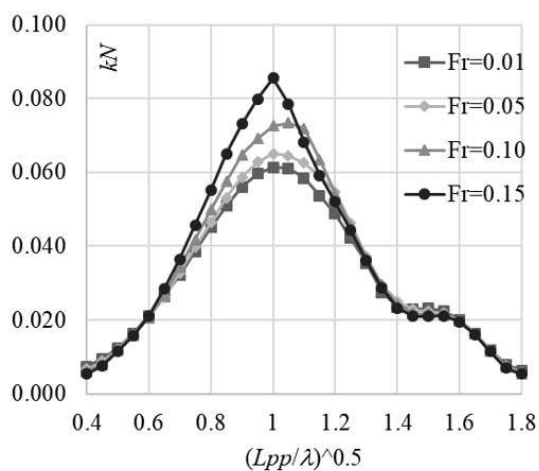
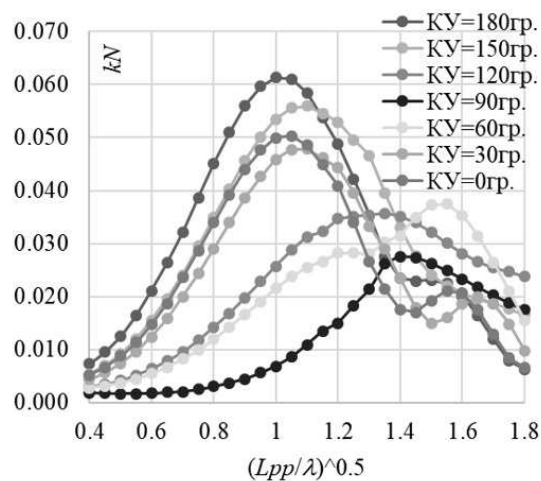
АЧХ на встречном волнении при различных F_f АЧХ при различных курсовых углах и $F_f=0,01$

Рис. 3. АЧХ волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для контейнеровоза в грузу

Долговременные распределения построены для четырех значений Fr : $Fr=0,01, 0,05, 0,10, 0,15$ — и для двух случаев загрузки судна: в грузу и в балласте. Влияние трехмерности волнения не учитывается в рамках настоящей статьи и является предметом дальнейших исследований. Принятое допущение соответствует ошибке в безопасную сторону, так как на величину волновых изгибающих моментов в наибольшей степени влияет волнение высокой балльности, а с ростом балльности влияние трехмерности волнения уменьшается [17]. Для статистической обработки результатов и построения долговременных распределений используется табличный процессор Microsoft Excel с возможностями VBA.

На рис. 4 — 7 приведено сопоставление долговременного распределения вертикального волнового изгибающего момента в миделевом сечении для рассмотренных судов при использовании предыдущей ревизии Рекомендации и новой ревизии. Для изгибающих моментов получено снижение расчетных значений для всех уровней обеспеченности при всех значениях числа Fr . Для изгибающего момента при обеспеченности $Q=10^{-8}$ снижение составляет 20 — 25 %, причем разница снижается по мере увеличения длины судна. Для изгибающего момента при обеспеченности $Q=10^{-2}$ снижение составило 20 — 30 %, причем наибольшее снижение характерно для судна наибольшей длины — нефтеналивного.

На рис. 8 — 11 приведено сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для рассмотренных судов при использовании предыдущей ревизии Рекомендации и новой ревизии. Характер влияния новой ревизии аналогичен тому, который выявлен для волнового изгибающего момента. Получено снижение расчетных значений для всех уровней обеспеченности при всех значениях числа Fr . Для обеспеченности $Q=10^{-8}$ снижение составляет 20 — 25 %, для обеспеченности $Q=10^{-2}$ снижение также составляет 20 — 25 %.

Полученные результаты в целом хорошо коррелируют с результатами, полученными другими авторами [10].

Также на рис. 4 — 11 нанесены расчетные значения изгибающих моментов и перерезывающих сил, полученные для рассмотренных судов по требованиям нормативных документов. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что вступление в силу новой ревизии Рекомендации характеризуется тенденцией к сближению значений волновых нагрузок, полученных методом прямого расчета и с применением нормативных документов. Ранее ряд авторов [18, 19] указывал на систематические расхождения между требованиями нормативных документов МАКО и результатами применения методов прямого расчета, характер которых виден на рис. 4 — 11. В качестве причин расхождений указывались особенности применяемых математических моделей, а также численные параметры волновых условий. По результатам проведенных в рамках настоящей статьи исследований можно отметить тенденцию на разрешение указанного противоречия в деятельности МАКО. Окончательные выводы о влиянии новой ревизии Рекомендации 34 на размеры корпусных конструкций можно будет сделать после выполнения МАКО соответствующих сопоставительных расчетов, однако существенных изменений в требованиях, то есть существенного увеличения или уменьшения веса корпусных конструкций, как показывают результаты выполненных исследований, не ожидается.

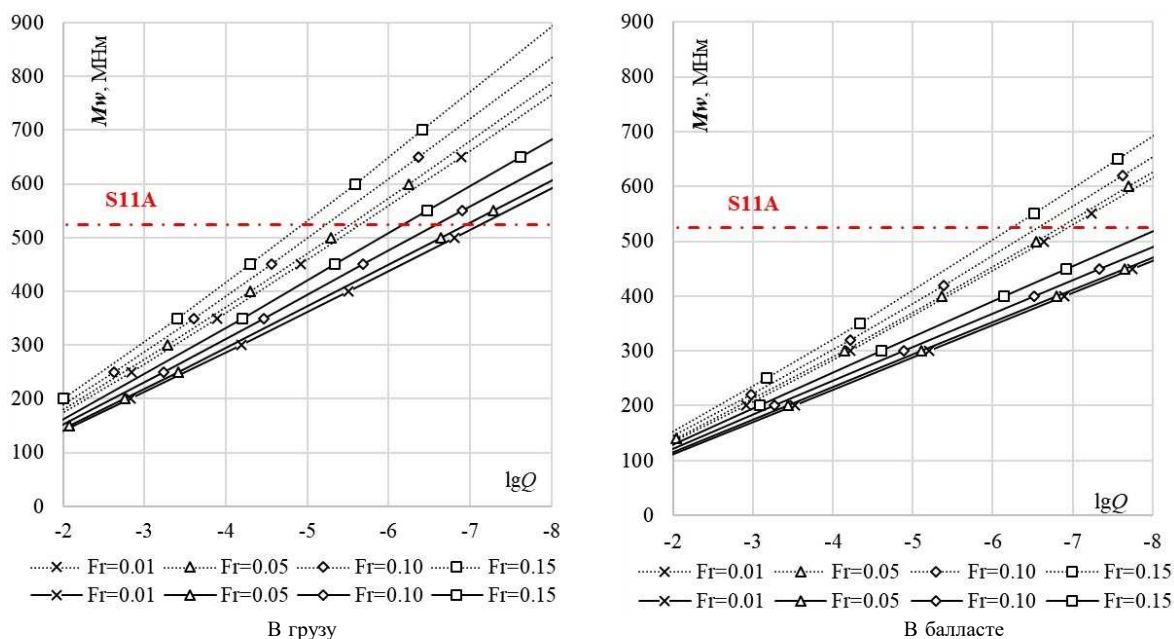


Рис. 4. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для контейнеровоза:
сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия;
штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

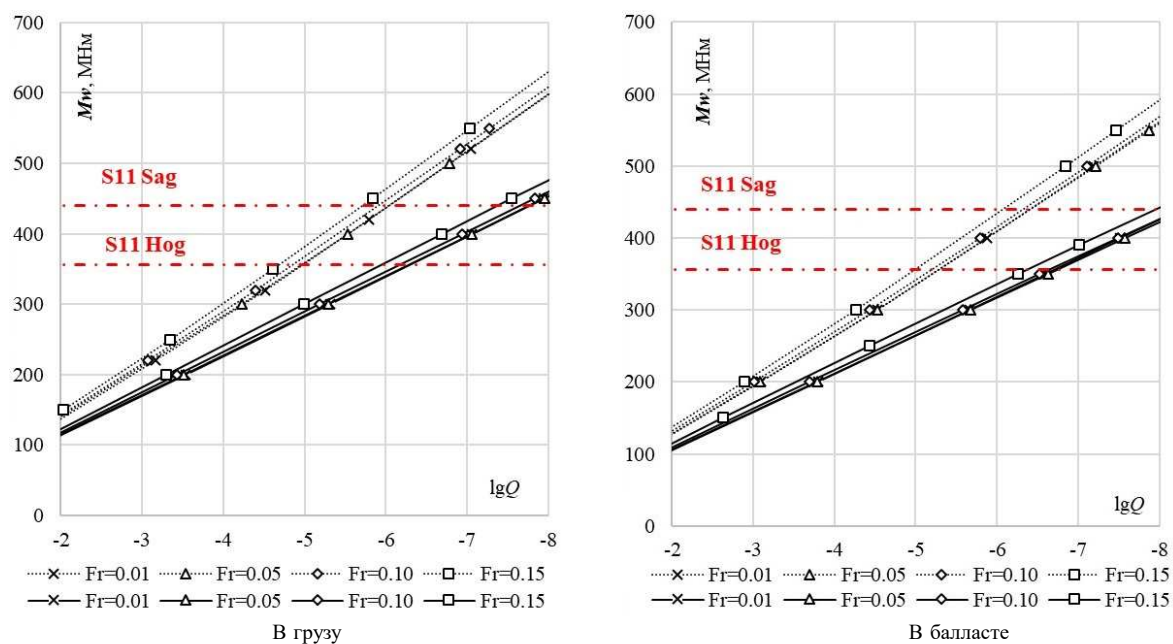


Рис. 5. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для судна типа RO/RO: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

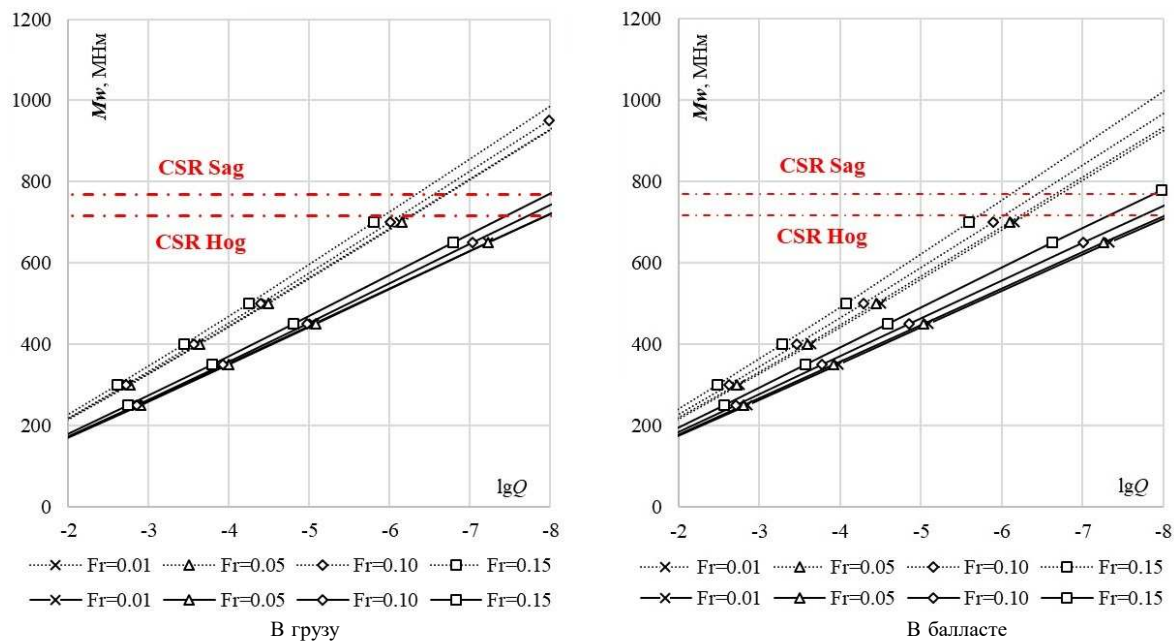


Рис. 6. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для навалочного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

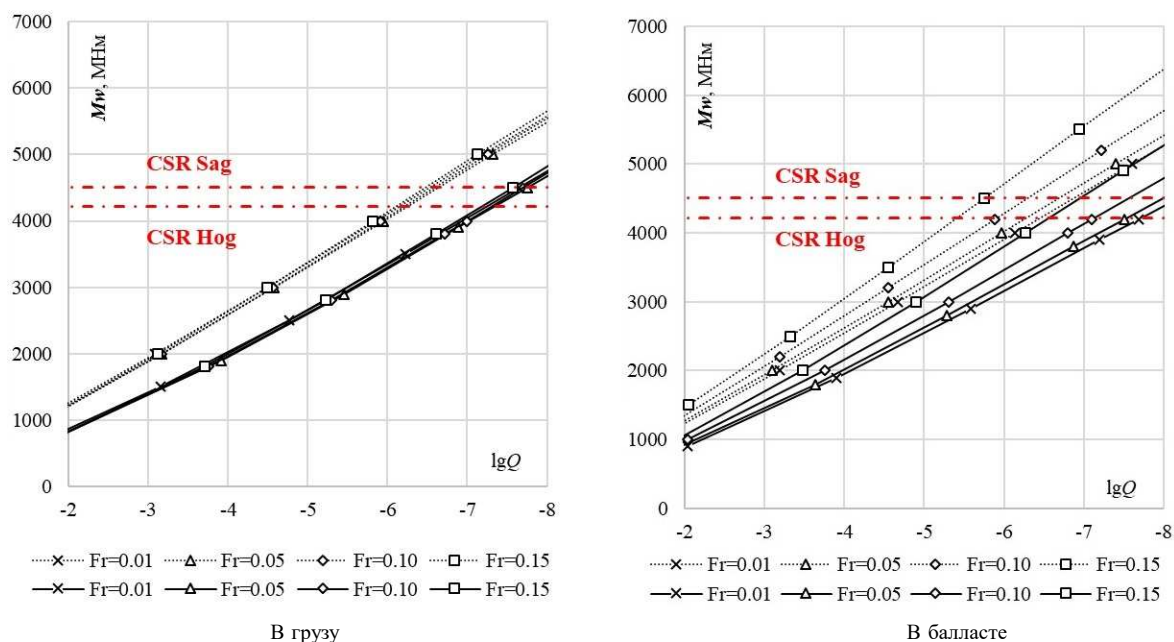


Рис. 7. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для нефтеналивного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

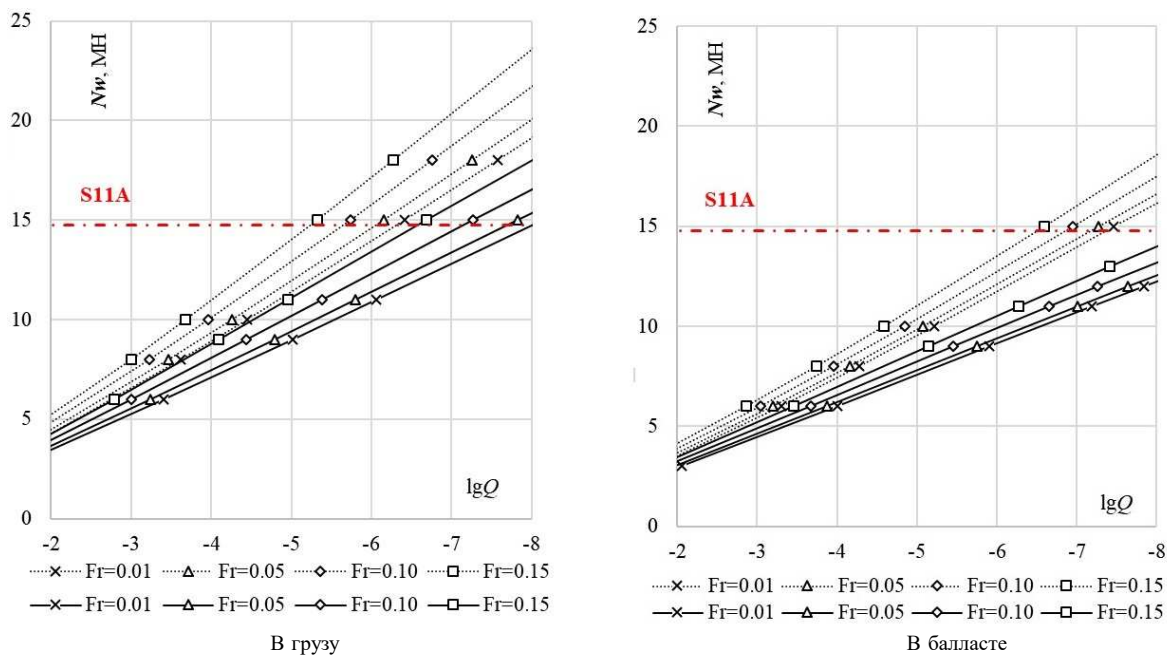


Рис. 8. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для контейнеровоза: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

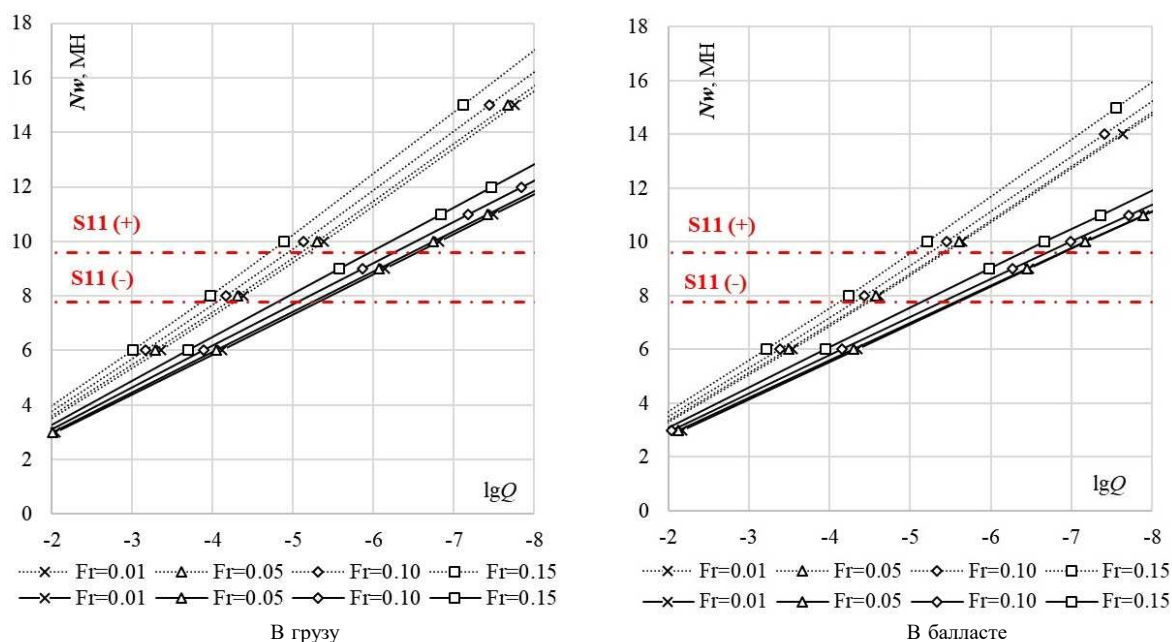


Рис. 9. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для судна типа RO/RO: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

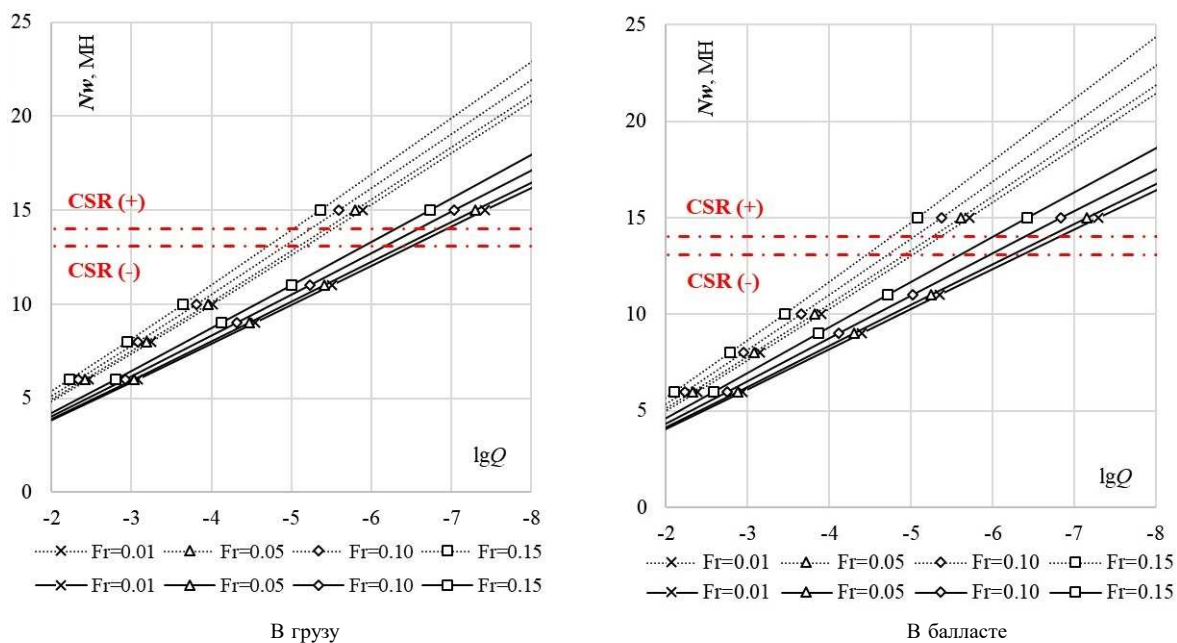


Рис. 10. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для навалочного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

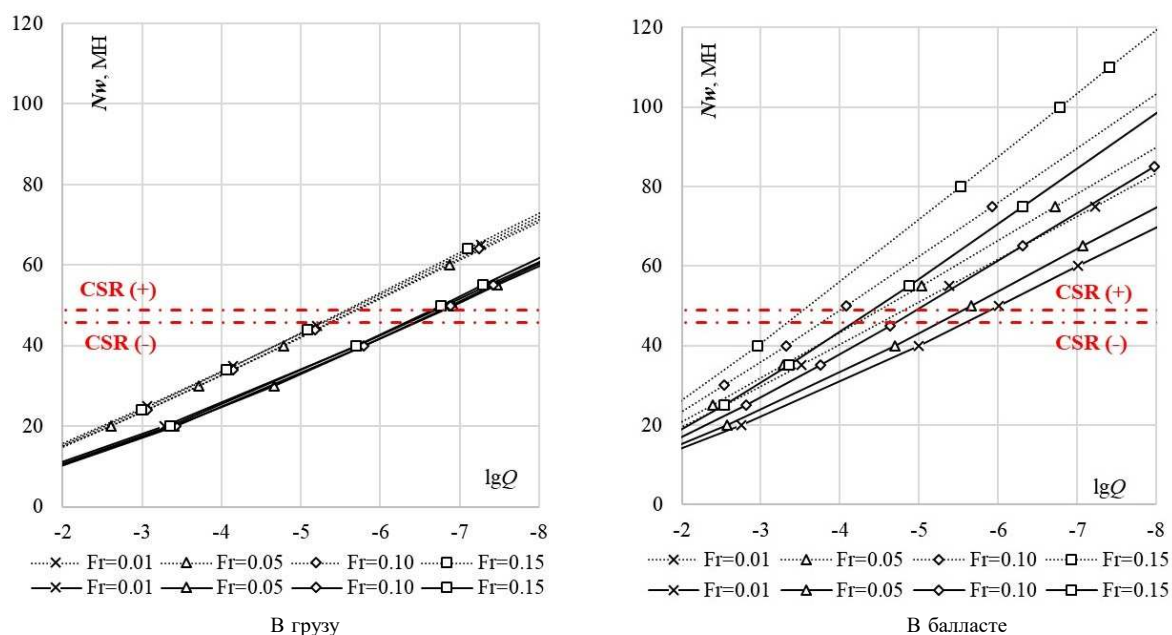


Рис. 11. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для нефтеналивного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В декабре 2022 г. вступила в силу новая ревизия документа МАКО Рекомендации 34. Разработка новой ревизии стала ответом МАКО на запрос международной судостроительной общественности в лице аудиторов ИМО о необходимости обновления данных о морском волнении в северной части Атлантического океана (Северной Атлантики). Новая ревизия приводит существенно измененные параметры морского волнения, которые, с одной стороны, отвечают запросу на обновление параметров в соответствии с современными климатическими данными и особенностями движения судов на трассах Северной Атлантики, а с другой стороны, вызывают озабоченность ряда профессиональных международных объединений. Причиной озабоченности является снижение долговременных параметров волнения.

В настоящей статье выполнено независимое исследование, целью которого является сопоставление долговременных распределений волнового изгибающего момента и волновой перерезывающей силы методами прямого расчета с использованием предыдущей ревизии Рекомендации и новой ревизии. В качестве тестовых выбраны четыре судна разных размерений и разного архитектурно-конструктивного типа. Показано, что применение новой ревизии Рекомендации может привести к снижению расчетного изгибающего момента и перерезывающей силы в диапазоне 20 — 25 %. При выполнении расчетов используется отечественное прикладное программное обеспечение и результаты исследований проблемы внешних сил, выполненных в СПбГМТУ и РС. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами, полученными независимыми зарубежными авторами.

Проведено сопоставление полученных значений изгибающего момента и перерезывающей силы при обеспеченности $Q = 10^{-8}$ с требованиями нормативных документов МАКО. Показана тенденция на гармонизацию требований МАКО и результатов расчета волновых нагрузок с применением методов прямого расчета и новой ревизии Рекомендации. Приведено предположение, что, несмотря на существенное изменение волновых условий, применение новой Ревизии не окажет значительного влияния на требования МАКО к конструкции корпуса новых судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
2. IACS. Unified Requirement S11. Longitudinal Strength Standard. Rev.2. — Nov. 2001.
3. IACS. Unified Requirement S11A. Longitudinal Strength Standard for Container Ships. — June 2015.
4. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. — Jan. 2024.
5. BV. Guidance for Long-term Hydro-structure Calculations. NI 638. — Feb. 2019.
6. PRS. Wave Loads on Ships. Informative Publication No. 35/I. — July 2018.
7. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 1, Corr. — Nov. 2001.
8. IMO. GBS verification audit reports submitted by audit teams. Maritime Safety Committee 96th session. MSC 96/5. — Feb. 2016.
9. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 2. — Dec. 2022.
10. Austefjord H.N. Update of wave statistics standards for classification rules / H.N. Austefjord, G. de Hauteclouque, M.C. Johnson, T.Y. Zhu // *Advances in the Analysis and Design of Marine Structures*. — London: CRC Press, 2023. — P. 43 — 52. — DOI 10.1201/9781003399759-5.
11. IMO. Comments on the review of the North Atlantic wave data. Maritime Safety Committee 108th session. MSC 108/19. — Dec. 2023.
12. Parunov J. Comparative analysis of the long-term extreme VWBM calculated according to IACS Rec. No 34 rev 1 and rev 2 / J. Parunov, A. Mikulić, M. Ćorak // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 1288. — DOI 10.1088/1757-899X/1288/1/012030.
13. IMO. Final report of the GBS audit addressing observation No. IACS/2015/FR1-8/OB/02. Maritime Safety Committee 109th session. MSC 109/4/1. — Aug. 2024.
14. Коршунов В.А. Сравнительный анализ различных моделей для прогнозирования волновых нагрузок корпуса судна / В.А. Коршунов, Р.С. Мудрик, Д.А. Пономарев, А.А. Родионов и др. // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2022. — № 2(400). — С. 17 — 23.
15. Parunov J. Benchmark study of global linear wave loads on a container ship with forward speed / J. Parunov, C. Guedes Soares, K. Iijima, X. Wang et. al. // *Marine Structures*. — 2022. — Vol. 84. — DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103162.
16. Доан Ким Тхай. Определение расчетных волновых нагрузок при проектировании конструкций корпуса судна: дис. ... канд. техн. наук / Доан Ким Тхай / СПбГМТУ. — СПб., 2007. — 205 с.
17. Короткин Я.И. Волновые нагрузки корпуса судна / Я.И. Короткин, О.Н. Рабинович, Д.М. Ростовцев. — Л.: Судостроение, 1987. — 235 с.
18. Коршунов В.А. Сравнительный анализ давлений и параметров качки, полученных на основе прямых методов расчета, с величинами из нормативных документов DNV / В.А. Коршунов, М.А. Кутейников, Р.С. Мудрик, Д.А. Пономарев и др. // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2023. — № 70/71. — С. 58 — 66.
19. Parunov J. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships / J. Parunov, C. Guedes Soares, S. Hirdaris, X. Wang // *Marine Structures*. — 2022. — Vol. 86. — DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103307.

REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
2. IACS. Unified Requirement S11. Longitudinal Strength Standard. Rev.2, Nov. 2001.
3. IACS. Unified Requirement S11A. Longitudinal Strength Standard for Container Ships, June 2015.
4. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. Jan. 2024.
5. BV. Guidance for Long-term Hydro-structure Calculations. NI 638. Feb. 2019.
6. PRS. Wave Loads on Ships. Informative Publication No. 35/I. July 2018.
7. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 1, Corr. Nov. 2001.
8. IMO. GBS verification audit reports submitted by audit teams. Maritime Safety Committee 96th session. MSC 96/5. Feb. 2016.
9. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 2. Dec. 2022.
10. Austefjord H.N., de Hauteclouque G., Johnson M.C., Zhu T.Y. Update of wave statistics standards for classification rules. *Advances in the Analysis and Design of Marine Structures*. London: CRC Press, 2023. P. 43 — 52. DOI 10.1201/9781003399759-5.
11. IMO. Comments on the review of the North Atlantic wave data. Maritime Safety Committee 108th session. MSC 108/19. Dec. 2023.
12. Parunov J., Mikulić A., Ćorak M. Comparative analysis of the long-term extreme VWBM calculated according to IACS Rec. No 34 rev 1 and rev 2. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 1288. DOI 10.1088/1757-899X/1288/1/012030.
13. IMO. Final report of the GBS audit addressing observation No. IACS/2015/FR1-8/OB/02. Maritime Safety Committee 109th session. MSC 109/4/1. Aug. 2024.
14. Korshunov V.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. et al. Comparative analysis of various models for predicting wave loads on ship hull. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022. No. 2(400). P. 17 — 23. (In Russ.)
15. Parunov J., Guedes Soares C., Iijima K., Wang X. et al. Benchmark study of global linear wave loads on a container ship with forward speed. *Marine Structures*. 2022. Vol. 84. DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103162.
16. Доан Ким Тхай. *Определение расчетных волновых нагрузок при проектировании конструкций корпуса судна* [Calculation of wave loads in ship hull structure design: PhD thesis]. St. Petersburg: SPBGMTU, 2007. 205 p.
17. Kороткин Ya.I., Rabinovich O.N., Rostovtsev D.M. *Volnovye nagruzki korpusa sudna* [Wave loads on ship hull]. Leningrad: Sudostroenie, 1987. 235 p.
18. Korshunov V.A., Kuteynikov M.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A. et al. Comparative analysis of pressures and ship motion parameters obtained on the basis of direct calculations and the values from DNV normative documents. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 58 — 66. (In Russ.)
19. Parunov J., Guedes Soares C., Hirdaris S., Wang X. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships. *Marine Structures*. 2022. 86. DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103307.

УДК 551.466.62 + 627.231
EDN JPLZYT

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА ПЛАВУЧИЙ ОБЪЕКТ С ЯКОРНОЙ СИСТЕМОЙ РАСКРЕПЛЕНИЯ

Н.Д. Беляев, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: belyaev_nd@spbstu.ru

В.В. Лебедев, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: vladimir.v.lebedev@mail.ru

И.С. Нуднер, д-р техн. наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005 Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1, e-mail: igor_nudner@mail.ru

К.К. Семенов, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: semenov.k.k@gmail.com

В статье рассматриваются особенности методики проведения экспериментов по физическому моделированию процесса воздействия длинных волн типа цунами на плавучий объект и анализируются их результаты. При интенсификации транспортировки сжиженного природного газа в страны Азии плавучие заякоренные хранилища будут размещены в бухтах Северного морского пути. Указанный транспортный коридор может подвергаться воздействию волн цунами. Решение задач, связанных с обеспечением безопасной эксплуатации морских объектов при действии различных видов внешних нагрузок в месте их базирования, является весьма актуальным и имеет практическую значимость. В работе были рассмотрены особенности моделирования процесса воздействия волн цунами на гидротехнические объекты и представлено подробное описание экспериментальной установки с анализом ее особенностей. Основное внимание уделено методике проведения экспериментальных работ с использованием датчиков и информационной системы для проведения измерения различных величин. Анализ результатов экспериментов указывает не только на необходимость измерения усилий в связях системы удержания, но и на обязательность определения перемещений плавучего объекта при воздействии на него волн цунами. Сделаны выводы о перспективности использования ультразвуковых датчиков, а также о необходимости учитывать отражения волн от стенок бассейна и проводить мероприятия по устранению или снижению воздействий отраженных от стенок волн на исследуемый объект.

Ключевые слова: волна цунами, моделирование, экспериментальная установка, датчики, плавучее хранилище газа.

Для цитирования: Беляев Н.Д. Особенности проведения экспериментальных исследований воздействия волн цунами на плавучий объект с якорной системой раскрепления / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 87 — 95. — EDN JPLZYT.

FEATURES OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE TSUNAMI WAVES IMPACT ON A FLOATING OBJECT WITH AN ANCHOR SYSTEM

N.D. Belyaev, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29, e-mail: belyaev_nd@spbstu.ru

V.V. Lebedev, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29, e-mail: vladimir.v.lebedev@mail.ru

I.S. Nudner, DSc, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 190005 Russia, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya ul., 1, e-mail: igor_nudner@mail.ru

K.K. Semenov, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29, e-mail: semenov.k.k@gmail.com

The article examines the features of the methodology for conducting experiments on physical modeling of the process of long tsunami-type waves impact on a floating object and analyzes their results. It is assumed that when transporting liquefied natural gas to Asian countries, such storage facilities will be located in the bays of the Pacific Ocean. The specified transport corridor may be exposed to tsunami waves. Solving problems related to ensuring the safe operation of offshore facilities under the action of various types of external loads at their location is highly relevant and has practical significance. The paper examines the features of modeling the tsunami wave impact on hydraulic structures and presents a detailed description of the experimental setup with an analysis of its features. The main attention is paid to the methodology of conducting experimental works using sensors and an information system for measuring various quantities. Analysis of the experimental results indicates not only the need to measure the forces in the connections of the anchor system, but also the necessity of determining the movements of the floating object when it is exposed to a tsunami wave. Conclusions are drawn about the prospects of using ultrasonic sensors, as well as the need to consider the reflection of waves from the basin walls and take measures to eliminate or reduce the effects of waves reflected from the walls on the object under study.

Key words: tsunami wave, physical modeling, experimental setup, sensors, floating gas storage.

For citation: Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K. Features of experimental research of the tsunami waves impact on a floating object with an anchor system. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 87 — 95. EDN NUQPCY.

ВВЕДЕНИЕ

Оживление движения морских судов вдоль Тихоокеанского побережья РФ в связи с освоением Северного морского пути требует создания вдоль побережья транспортно-логистической базы, отвечающей современным требованиям [1]. В процессе создания такой базы возможно использование объектов различного назначения. Одной из важнейших задач является решение вопросов обеспечения безопасной эксплуатации объектов различной конструкции в условиях возможного волнения, в том числе экстремального, в точках размещения этих объектов в пределах рассматриваемой береговой зоны. При этом если для ветрового волнения задача обеспечения допустимого волнового режима решается однозначно с помощью создания оградительных сооружений или размещения объекта в защищенной бухте, то при воздействии волн цунами этого может быть не достаточно для обеспечения безопасной эксплуатации плавучих объектов.

Обычно при создании различных морских объектов предусматриваются оградительные сооружения, защищающие акваторию от ветрового волнения. Если же предполагается установка сооружения в месте, где возможно формирование волн цунами, то обязательной является оценка именно их воздействия на такой объект [2]. В последние годы такая оценка обычно проводится с использованием экспериментального метода [3 — 6], который позволяет определить усилия в связях системы удержания и перемещения плавучего объекта, вызванные действием волны цунами определенного профиля. Экспериментальные исследования, проведенные авторами ранее, показали, что при обтекании волной цунами на объект действуют знакопеременные нагрузки [7]. Усилия в якорных связях при таком воздействии имеют различные значения [8]. Система удержания якорными связями позволяет плавучему объекту осуществлять определенные перемещения в виде крена, рыскания и тангажа при любой его ориентации относительно луча волны цунами.

В статье излагаются методика и результаты экспериментальных исследований конкретного объекта в составе реализуемого проекта [9]. В экспериментах с воздействием на объект волны цунами определенного профиля необходимо было решить следующую задачу: определить усилия в якорных связях и перемещения объекта с заданным водоизмещением, который удерживался на глубине d системой раскрепления. Рассматривались два случая: с неподвижно зафиксированными якорями и с возможностью их допустимого перемещения при действии волны цунами экстремальных значений. Далее, помимо прочего, решались вопросы, возникающие в случае неподвижного размещения якорей: как будут изменяться усилия в связях системы раскрепления и перемещения объекта при воздействии волны цунами с экстремальными параметрами и возможным обрывом одной или нескольких связей?

Усилия в связях системы удержания являются реакцией на нагрузку, вызванную действием волны цунами, обтекающей плавучий объект, и их значения зависят от формы, размеров и диапазона изменений осадки T этого объекта. Кроме того, усилия в связях зависят от принятой системы удержания и от того, как размещены якоря относительно поверхности дна. В наибольшей степени значения усилий в связях зависят от параметров волны цунами, воздействующей на плавучий объект, в том числе от ее высоты и длительности действия, а также от глубины моря d в точке установки объекта. Таким образом, большое число параметров, влияющих на значения искомых величин, свидетельствуют о необходимости обширных экспериментальных исследований с целью получения достоверных данных для проектирования объекта. Здесь следует заметить, что экономические затраты на проведение таких исследований составляют незначительную часть от стоимости создания рассматриваемого объекта в случае наличия соответствующей экспериментальной базы. Полученные результаты экспериментальных исследований в значительной мере обеспечат принятие наиболее рационального решения по безаварийной эксплуатации объекта в течение нормативного срока. Также, если расширить значения воздействий за пределы нормативного срока, можно оценить, а может быть, и снизить путем разработки определенных мероприятий значения ущерба от аварийной ситуации, которая является следствием действия запредельных нагрузок.

Основой экспериментального метода проведения исследований является физическое моделирование как гидротехнических объектов, так и воздействующих на них нагрузок. Воздействие волн цунами на различные объекты является событием малой вероятности, и поэтому достоверные сведения о трансформации волны цунами в пределах береговой зоны в конкретной точке размещения сооружения чаще всего отсутствуют.

Соответственно, исходные данные для проведения экспериментальных исследований при необходимости учета воздействия волны цунами на натурный объект (профиль волны, ее длительность) получают используя расчетные методы [10, 11].

Так как движение обусловленных волнами цунами водных потоков в натуральных условиях и на модели может быть описано уравнениями Навье — Стокса, то для их подобия, согласно принципам физического моделирования, необходимо соблюдение равенства в сходственных точках в натуре и на модели критериев Фруда $Fr = V^2/gl$ и Струхала $Sh = Vt/l$, где V — скорость воды в сходственных точках, t — время, l — характерный линейный размер, g — ускорение силы тяжести.

Экспериментальные исследования необходимо проводить в автомодельной области чисел Рейнольдса $Re = Vl/\nu$, где ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости. При моделировании волнового движения воды достоверные результаты могут быть получены при выполнении условия превышения критического значения чисел Рейнольдса $Re \geq Re_{кр}$, где $Re_{кр} = 1,0 \cdot 10^5$ [12, 13]. В этом случае в качестве характерного линейного размера при вычислении критериев подобия принимается глубина моря в месте установки плавучего объекта d . При определении критериев подобия максимальная орбитальная скорость поверхностной жидкой частицы принимается в качестве характерной. Ее можно определить по формуле:

$$V = h \sqrt{\frac{\pi g \operatorname{cth}(2\pi d/\lambda)}{2\lambda}},$$

где h — высота;
 λ — длина набегающей волны.

После того как с учетом соответствия условиям автомодельности по числам Рейнольдса выбран минимально возможный масштаб моделирования, анализируются возможности экспериментальной базы.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Эксперименты по физическому моделированию воздействия волны цунами на плавучий объект проводились в бассейне, который был заполнен водой до определенной отметки, соответствующей заданной глубине установки модели. Экспериментальную установку можно условно разделить на три участка: головной, рабочий и концевой.

В головном участке были установлены волнопродукторы, предназначенные для создания волн типа цунами. В данном случае пневмоволнопродукторы, в состав которых входят резервуары, заполняемые водой до определенного объема путем создания вакуума (рис. 1).

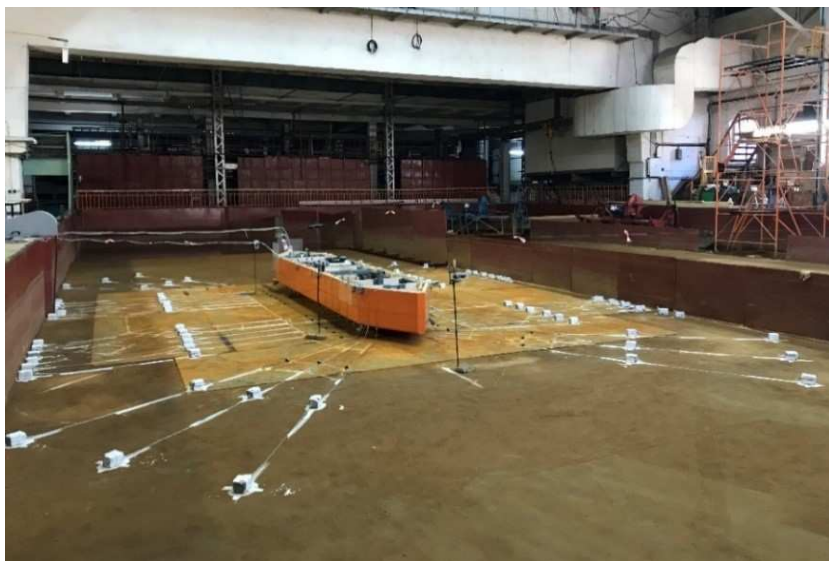


Рис. 1. Вид на головной и рабочий участки бассейна:
на заднем плане видны волнопродукторы; на переднем плане — модель плавучего объекта

Для формирования на экспериментальной установке волн типа цунами с отличающимися параметрами осуществляется выпуск соответствующих объемов воды с определенными скоростями. Это достигается срывом вакуума из резервуаров волнопродукторов. При движении в головном участке волна достигает требуемых параметров, которые контролируются волномером и датчиком скорости, расположенными в измерительном створе в начале рабочего участка (рис. 2).

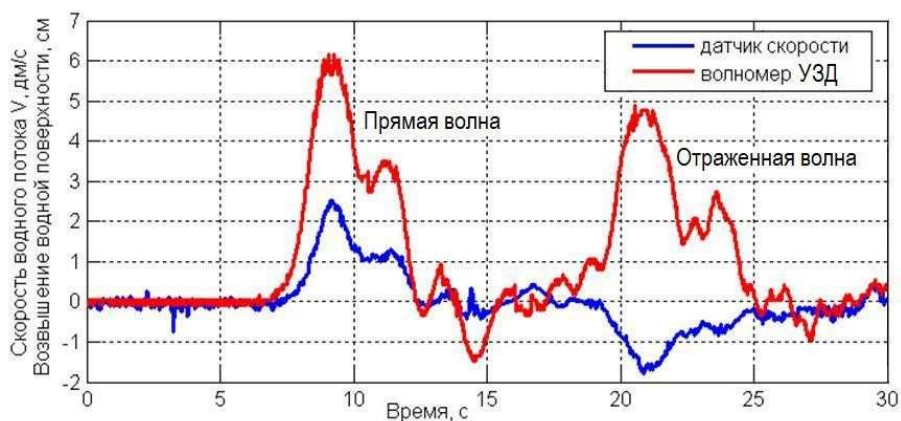


Рис. 2. Изменения профиля волны и поверхностной скорости водного потока в измерительном створе

Результаты, представленные на рис. 2, были получены с использованием ультразвукового датчика (УЗД) с бесконтактным принципом действия. Датчик играл роль волномера, выполняя измерения значений текущего отклонения уровня воды от отметки воды в спокойном состоянии. Определение значений скорости в поверхностном слое водного потока, образованного смоделированной волной типа цунами, осуществлялось датчиком скоростей (ДС) Nortek Vectrino, установленным в том же створе. Измеритель, используя эффект Доплера, контролировал изменения трех компонент скорости.

Определение изменения скорости необходимо при оценке возможности использования конкретного масштаба модели. Ранее эту существенную для обоснования правильности физического моделирования кинематическую характеристику определяли исключительно расчетными методами. Полученные экспериментальные значения скорости дают возможность подтвердить, что исследования проводятся в автомодельной области по числам Рейнольдса.

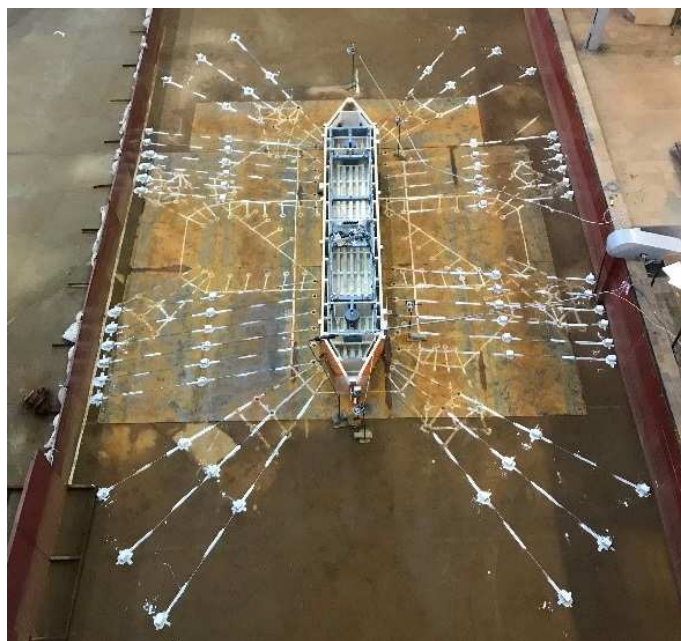


Рис. 3. Размещение модели плавучего объекта на рабочем участке экспериментальной установки

После створа, в котором установлены датчики УЗД и ДС, начинается рабочий участок с моделью плавучего объекта (рис. 3). В результате воздействия волны цунами в якорных связях, которые удерживают плавучий объект, возникают определенные растягивающие усилия, а сама модель плавучего объекта совершает сложные перемещения. Следует иметь в виду, что экспериментальная установка ограничена стенками бассейна, поэтому первая (прямая) волна после воздействия на плавучий объект перемещается далее по экспериментальной установке и отражается от задней стенки бассейна. Через некоторый промежуток времени отраженная волна воздействует на плавучий объект. Здесь следует учитывать, что профиль отраженной волны и промежуток времени начала ее воздействия на плавучий объект для натурного объекта и модели будут различаться, даже если модельные значения пересчитать по правилам моделирования на натурные условия. Кроме того, из-за отсутствия экспериментальных и натурных данных по формированию процесса отражения волны цунами от берега не представляется возможным такую отраженную волну смоделировать. Вследствие этого достоверными считались и учитывались только данные по прямому действию волны на модель.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Усилия в связях системы удержания плавучего хранилища газа при действии на него волны типа цунами имеют различные значения [8], поэтому существует необходимость измерения усилий во всех якорных связях. При измерении этих усилий выявлена одна общая особенность: при действии волны цунами из-за рывка возникают усилия в связях, и их продолжительность не превышает время действия волны. Таким образом, рывки происходят непосредственно в процессе воздействия прямой волны на модель плавучего хранилища газа.

На рис. 4 в качестве примера представлены осциллограммы специальных датчиков усилий в связях системы удержания носовой и кормовой частей модели, совмещенные с показаниями датчиков уровня воды УЗД в створе на границе головного и рабочего участков. С целью дальнейшего анализа результаты указанные измерения, полученные с использованием различных средств, были синхронизированы информационной системой.

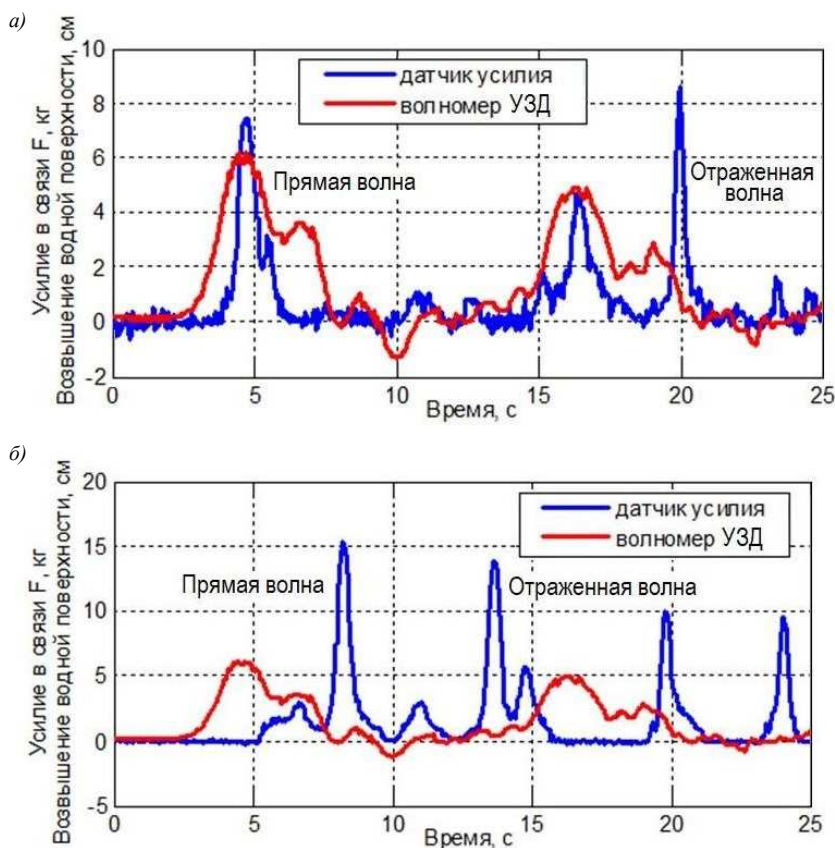


Рис. 4. Совмещенные осциллограммы датчиков уровня воды в створе на границе начального и рабочего участков и усилий в якорных связях в процессе воздействия волны цунами:

а — в носовой части плавучего объекта; б — в кормовой части плавучего объекта

Более подробно характер распределения усилий в связях системы удержания плавучего объекта и их анализ был представлен в статье [8].

Учитывая вышеизложенное, для получения достоверных данных по усилиям в связях концевой участок экспериментальной установки должен быть такой длины, чтобы отражение волны от задней стенки бассейна происходило тогда, когда воздействие прямой волны на плавучий объект завершено.

В связи с возможностью отражения волн, приходящих со стороны рабочего участка из-за ограниченных размеров бассейна, концевой участок экспериментальной установки предназначен для их трансформации и гашения. Вариантов уменьшения высот (гашения) до допустимых значений волн типа цунами, приходящих со стороны рабочего участка, в рассматриваемом случае существует немного. Первый вариант — это организация водослива на задней стенке бассейна с отметкой гребня, примерно совпадающей с отметкой воды в бассейне перед началом эксперимента. В этом случае при накате на водослив верхняя часть волны с наибольшей кинетической энергией переливается через него, и тем самым часть энергии волны рассеивается. Часть волны с меньшей энергией отражается от водослива и распространяется по экспериментальной установке. Высота отраженной волны контролируется волномером, расположенным на границе концевой и рабочего участков. Следует отметить, что чем меньше объем воды, используемый на экспериментальной установке, от общего объема бассейна, тем меньше значение падения уровня воды в бассейне при переливе воды через водослив во время эксперимента. Второй вариант — устройство в пределах концевой участка откоса с искусственной шероховатостью. В этом случае энергия волны при накате на откос расходуется на преодоление сил трения. Контроль параметров волны, формирующейся при откате с откоса, осуществляется волномером, расположенным на границе концевой и рабочего участков. В некоторых случаях возможна комбинация указанных вариантов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Иметь представление о том, как ведет себя плавучий объект под воздействием волны цунами, безусловно важно, в особенности когда используется схема с подвижными якорями или когда происходит обрыв якорной связи. Поэтому практическое и научное значение экспериментальных исследований, решающих указанные задачи, не подлежит сомнению. Проведение таких исследований имеет некоторые особенности. Во-первых, во время оттекания волной цунами плавучий объект перемещается в пространстве весьма сложным образом. Во-вторых, после окончания воздействия волны центр тяжести плавучего объекта может быть смещен. Поэтому для изучения перемещения плавучего объекта в пространстве можно принять следующую систему координат. Ноль в этой системе координат расположить в центре тяжести плавучего объекта. Ось X принять совпадающей с продольной осью плавучего объекта с увеличением по направлению распространения волны. Ось Z направить нормально вверх из центра тяжести объекта. Через центр тяжести объекта нормально плоскости XOZ направить ось Y . Тогда угол поворота ω_X объекта относительно оси X будет характеризовать его крен, угол поворота ω_Z относительно оси Z — его рыскание, а угол поворота ω_Y относительно оси Y — его тангаж.

Таким образом, определив перемещение и углы поворота объекта по трем направлениям во время воздействия на него волны цунами, можно знать его положение в пространстве. Положение объекта в пространстве в период воздействия волны цунами в любой момент времени можно определить, используя УЗД.

В качестве примера на рис. 5 показана схема расположения УЗД и экранов, отражающих ультразвуковые колебания. Такая схема была применена для определения перемещений плавучего объекта вдоль оси X и углов рыскания ω_Z . Для определения перемещений модели объекта вдоль оси X были использованы два УЗД, расположенные перед экранами в носовой и кормовой частях модели объекта. Для определения углов рыскания ω_Z также были использованы два УЗД, расположенные по одному борту плавучего объекта перед экранами на определенном расстоянии друг от друга. Ультразвуковые сигналы от указанных УЗД излучались в горизонтальной плоскости. На рис. 5 также видны УЗД, расположенные на границах рабочего участка с начальным и конечным и использованные в качестве волномеров. Ультразвуковые сигналы от этих УЗД излучались в вертикальной плоскости.

Пример перемещений вдоль оси X модели, расположенной так, как это показано на рис. 3, представлен на рис. 6 (профиль воздействующей в этом случае волны цунами см. на рис. 2). В данном случае для удержания объекта была применена схема с использованием подвижных якорей. Идея использования такой схемы (см. рис. 3) состоит в том, что, пока волна цунами не достигает определенной высоты, якоря системы удержания не смещаются. А при превышении волной цунами заранее установленных величин подвижки



Рис. 5. Модель плавучего объекта с экранами, отражающими ультразвуковые сигналы от УЗД, расположенными перед носовой и кормовой частями объекта, а также по его борту:
1 — отражающие экраны; 2 — УЗД для подачи сигналов в горизонтальной плоскости;
3 — УЗД для подачи сигналов в вертикальной плоскости

якорей системы удержания допустимы на некоторые расстояния. Соответственно, при расчете якорной системы можно использовать меньшие значения высот волн, что приводит к снижению расчетных усилий в цепях системы удержания и дает возможность применять цепи меньшего калибра. Действие волн цунами с большими высотами при этом не приведет к обрывам цепей за счет того, что плавучий объект будет иметь возможность смещаться при экстремальных воздействиях.

В течение относительно большей части времени действия на модель волны цунами (см. рис. 2) происходили ее колебания вдоль продольной оси X (рис. 6). Сначала объект смещался навстречу набегающей волне, далее в процессе затухающих с некоторым декрементом колебаний происходили подвижки уже по направлению воздействия.

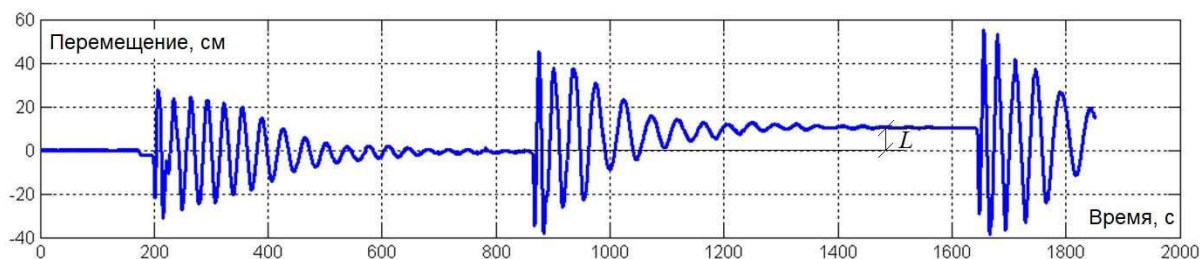


Рис. 6. Перемещения вдоль продольной оси модели плавучего объекта при воздействии на него волн цунами:
 L — смещение центра тяжести модели плавучего объекта в результате воздействия волны типа цунами

Изменение углов рыскания модели ω_z при действии волны цунами с определенным профилем и поверхностной скоростью (см. рис. 2) представлено на рис. 7. Полученные результаты показывают, что затухание углов рыскания происходит в течение относительно продолжительного периода.

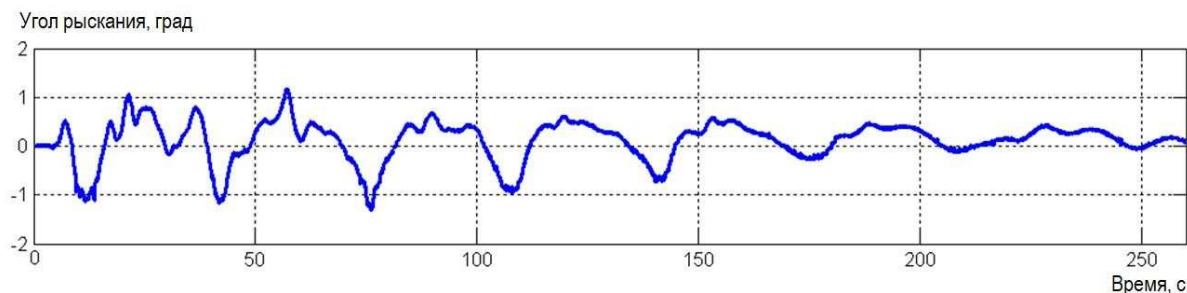


Рис. 7. Результаты определения угла рыскания ω_z модели при действии на нее волны цунами

Полученные результаты экспериментов (см. рис. 6 и 7) подтверждают важность определения не только усилий в якорных связях, но и перемещений объекта, подвергающегося воздействию волн цунами. Учет обоснованных представлений о перемещениях объекта по всем трем направлениям и об углах его поворота ω_Z , ω_Y , ω_X может повысить устойчивость и надежность сооружения. При этом решаются следующие вопросы:

- как и в какой момент будет смещаться сам плавучий объект, если система раскрепления допускает подвижку якорей?

- в какой момент произойдет разрыв связи системы удержания и что в ней будет после этого происходить при условии применения схемы с жесткими якорями?

Здесь следует отметить, что если появляется необходимость каким-либо образом повлиять на декремент затухания рассматриваемых колебаний, то возникает достаточно существенная проблема. Декремент затухания таких колебаний в первую очередь зависит от жидкости, окружающей плавучий объект. Так как при физическом моделировании в качестве жидкости используется вода, а эксперименты проводятся в автомодельной области по числам Рейнольдса, прямой пересчет результатов исследований, связанных с декрементом затухания, на натурные условия невозможен. Добавим, что для таких задач отсутствуют расчетные методы, основанные на математическом моделировании. Результаты экспериментальных исследований таких задач также почти отсутствуют, несмотря на существование практической необходимости их решения. Физическое моделирование процесса воздействия волн цунами на различные морские объекты должно осуществляться в автомодельной области по числам Рейнольдса, кроме того, при исследовании процессов затухания колебаний необходимо применять масштабный подход. Конечно, это весьма трудоемкий подход, но при недостаточной изученности рассматриваемого явления только он может обеспечить возможность пересчета на натуру результатов, полученных с помощью физического моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на плавучие объекты должны состоять из двух этапов. Первый этап, подготовительный, заключается в подготовке согласно заданию профилей волн, которые должны воздействовать на модель плавучего объекта, на границе начального и рабочего участков. То есть в пределах этого этапа проводится тарировка волнопродуктора. Одновременно проверяется эффективность работы волногасящего устройства, размещенного на концевом участке, то есть определяется степень гашения волн, отразившихся от задней границы экспериментальной установки. После окончания работ подготовительного этапа, когда определены все параметры волн и скоростей водного потока на границе начального и рабочего участков, а также установлено, что отраженные от задней границы экспериментальной установки волны гасятся до допустимых значений, проводится второй, основной этап экспериментальных исследований. При проведении этого этапа на размещенную в пределах рабочего участка модель плавучего объекта с намеченной системой раскрепления осуществляется воздействие подобранных волн и производятся необходимые измерения усилий в якорных связях и перемещений модели плавучего объекта.

Экспериментальные исследования по определению усилий в якорных связях системы раскрепления и перемещений плавучих объектов в случае воздействия на них волн цунами требуются для принятия наиболее рациональных решений по размещению таких объектов в цунамиопасных районах. В настоящее время проведение таких исследований принципиально возможно при наличии соответствующей экспериментальной базы, оснащенной современными средствами измерений. При этом, как показывают результаты опытов, весьма перспективным является использование ультразвуковых датчиков, работающих в воздушном пространстве, для измерения расстояния от излучателя датчика до твердой или жидкой поверхности. Вследствие ограниченности опытовых бассейнов особенностью указанных экспериментальных исследований является необходимость учитывать отражение волн от стенок бассейна и принимать меры по устранению или снижению воздействий отраженных волн на исследуемый объект.

Описанные в статье методика и особенности проведения экспериментальных исследований воздействий волн типа цунами на плавучий заякоренный объект могут быть использованы и при опытах с другими гидротехническими сооружениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. План развития Северного морского пути на период до 2035 года. Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2022 г. № 2115-р.
2. СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах / Минстрой России. — М., 2017.
3. Беляев Н.Д. Экспериментальные исследования воздействия волн типа цунами на грунт у оснований морских гравитационных платформ / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, А.В. Мишина и др. // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — № 6 (50). — С. 4 — 12.
4. Гусаров Р.Н. Опыт и задачи физического моделирования волн цунами / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // ГеоРиск. — 2022. — Т. XVI, № 1. — С. 8 — 19. — DOI 10.25296/1997-8669-2022-16-1-8-19.
5. Гусаров Р.Н. Экспериментальные и аналитические исследования волн цунами, вызванных землетрясениями и оползнями / Р.Н. Гусаров, И.Г. Кантаржи // Гидротехническое строительство. — 2023. — № 10. — С. 48 — 56.
6. Кантаржи И.Г. Воздействие длинных волн на береговые гидротехнические сооружения / И.Г. Кантаржи, Н.А. Губина, Р.Н. Гусаров // Гидротехническое строительство. — 2021. — № 2. — С. 48 — 52.
7. Бабчик Д.В. Экспериментальная оценка нагрузок на плавучий объект от прямого воздействия волн цунами / Д.В. Бабчик, Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер и др. // Гидротехническое строительство. — 2022. — № 8. — С. 15 — 21. — DOI 10.34831/EP.2022.99.38.002.
8. Беляев Н.Д. Экспериментальное определение усилий в якорных связях плавучего объекта при воздействии волн цунами / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 128 — 142.
9. Беляев Н.Д. Необходимость использования экспериментального метода при изучении цунами / Н.Д. Беляев, В.В. Лебедев, И.С. Нуднер, К.К. Семенов и др. // Гидротехническое строительство. — 2024. — № 5. — С. 34 — 40.
10. Veldman A.E.P. Extreme wave impact on offshore platforms and coastal constructions / A.E.P. Veldman, R. Luppens, T. Bunnik, R.H.M. Huijsmans et al. // Proceedings of the International Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011. — P. 365 — 376. DOI 10.1115/OMAE2011-49488.
11. Gusev O.I. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom / O.I. Gusev, G.S. Khakimzyanov, L.B. Chubarov // Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 221. — P. 108540. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108540.
12. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений ветровых волн / И.И. Леви. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 210 с.
13. Лаппо Д.Д. Условия автоматизации в исследованиях волнового движения жидкости / Д.Д. Лаппо, А.М. Жуковец, С.С. Мищенко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: сб. науч. тр. — 1979. — Т. 132. — С. 59 — 65.

REFERENCES

1. Plan razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda [Northern Sea Route development plan for the period up to 2035]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 1 August 2022 No. 2115-r.
2. SP 292.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya v tsunamioопасnykh raionakh [Buildings and structures in tsunami-prone areas] / Ministry of Construction of Russia. — Moscow, 2017.
3. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Mishina A.V. et al. Experimental study of tsunami-type waves impact on soil at foundations of offshore gravity platforms. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. No. 6 (50). P. 4 — 12. (In Russ.)
4. Gusarov R.N., Kantargi I.G. Experience and tasks of physical modeling of tsunami waves. *GeoRisk World*. 2022. Vol. XVI, No. 1. P. 8 — 19. DOI 10.25296/1997-8669-2022-16-1-8-19.
5. Gusarov R.N., Kantargi I.G. Experimental and analytical studies of tsunami waves caused by earthquakes and landslides]. *Power Technology and Engineering*. 2024. Vol. 57, Issue 6. P. 887 — 895. DOI 10.1007/s10749-024-01753-7.
6. Kantargi I.G., Gubina N.A., Gusarov R.N., Effects of long waves on coastal hydraulic structures. *Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55, Issue 2. P. 219 — 222. DOI 10.1007/s10749-021-01343-x.
7. Babchik D.V., Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S. et al. Experimental estimation of loads on a floating object exerted by the direct impact of tsunami waves. *Power Technology and Engineering*. 2023. Vol. 55, Issue 5. P. 666 — 671. DOI 10.1007/s10749-023-01571-3.
8. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K. et al. Experimental determination of the forces in the anchor system of a floating object under the impact of tsunami waves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 128 — 142. (In Russ.)
9. Belyaev N.D., Lebedev V.V., Nudner I.S., Semenov K.K. et al. Necessity of Using an Experimental Method When Studying Tsunami. *Power Technology and Engineering*. 2025. Vol. 58, Issue 4. P. 580 — 585. DOI 10.1007/s10749-025-01851-0.
10. Veldman A.E.P. Extreme wave impact on offshore platforms and coastal constructions / A.E.P. Veldman, R. Luppens, T. Bunnik, R.H.M. Huijsmans et al. *Proceedings of the International Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Rotterdam, The Netherlands, 2011. P. 365 — 376. DOI 10.1115/OMAE2011-49488.
11. Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. P. 108540. DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.108540.
12. Levi I.I. Modelirovanie gidravlicheskih yavlenii vetrovykh voln [Modeling of hydraulic phenomena of wind waves]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 210 p.
13. Lappo D.D., Zhukovets A.M., Mishchenko S.S. Usloviya avtomodel'nosti v issledovaniyakh volnovogo dvizheniya zhidkosti. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Proceedings of the Vedenev VNIIG]. 1979. T. 132. P. 59 — 65.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 620.178.746.4 + 539.422.23
EDN NOAYMA

КОНТРОЛЬ РАБОТЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПОЛНОТОЛЩИННЫХ ОБРАЗЦОВ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ

А.В. Ильин, д-р техн. наук, доцент, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

А.В. Ларионов, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, e-mail: larionov-prometey@yandex.ru

Рассмотрены результаты инструментированных испытаний падающим грузом судостроительных сталей и сталей для магистральных трубопроводов с определением работы разрушения испытываемого образца. Предложены соотношения для оценки максимальной энергоемкости разрушения и ее изменений при наличии расщеплений в изломе или участков хрупкого разрушения. Переход к измерению поглощенной при разрушении работы позволяет избежать субъективизма оценок склонности металла к хрупким разрушениям по виду излома, используемых в настоящее время, и получать данные для сопоставления сталей для трубопроводов не только по склонности к хрупким разрушениям, но и по энергоемкости вязкого разрушения.

Ключевые слова: испытания металла падающим грузом, энергоемкость разрушения, вязко-хрупкий температурный переход, распространение и торможение хрупкого разрушения.

Для цитирования: Ильин А.В. Контроль работы разрушения при испытаниях полнотолщинных образцов падающим грузом / А.В. Ильин, А.В. Ларионов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 96 — 111. — EDN NOAYMA.

IMPACT ENERGY EVALUATION WITH FULL-THICKNESS SPECIMENS AT DROP-WEIGHT TEAR TEST

A.V. Ilyin, DSc, Associate Professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

A.V. Larionov, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: larionov-prometey@yandex.ru

The results of instrumented drop-weight tear tests of shipbuilding and pipeline steels with measurement of fracture (absorbed) energy are considered. Ratios are proposed for an assessment of the maximum fracture energy and its changes in presence of separations or cleavage areas in fracture. Introduction of the fracture energy measurement allows to avoid subjectivity of estimates of steels cold resistance based on fracture appearance visual analysis and to obtain data for comparison of pipeline steels in respect of both tendency to brittle fracture and ductile fracture energy.

Key words: drop weight tear test, fracture absorbed energy, ductile-brittle transition temperature, propagation and arrest of brittle fracture.

For citation: Ilyin A.V., Larionov A.V. Impact energy evaluation with full-thickness specimens at drop-weight tear test. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 96 — 111. EDN NOAYMA. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Испытания до разрушения образцов с острым надрезом при динамическом (ударном) нагружении на вертикальном копре длительное время продолжают оставаться одним из основных видов испытаний металла магистральных газопроводов, характеризующим способность материала предотвращать распространение протяженного разрушения. Испытания выполняются по международным стандартам [1, 2]; в России имеется гармонизированный с ними стандарт [3]. Стандартизованный образец имеет высоту 75 мм, надрез глубиной 5 мм, а толщина образца должна соответствовать натурной толщине металла трубы или используемого для ее формовки металлопроката (т.н. штрипса). Оценка результата испытаний производится по виду излома: приемлемым считается излом с преобладанием волокнистой (вязкой) составляющей, при этом доля кристаллической составляющей должна быть не более 5 — 30 % (по разным нормативным документам). Эти требования должны выполняться при предельно низкой температуре эксплуатации трубопровода. Аналогично нормативным документам для наземных газопроводов, испытания падающим грузом, обозначаемые в международной литературе *DWTT* (Drop weight tear test), а в ГОСТе [3] — ИПГ (Испытания падающим грузом), были включены в раздел Правил классификации и постройки морских подводных трубопроводов РМРС [4].

В связи с актуальными задачами строительства морской техники для Арктики: буровых добычных и разведывательных платформ, судов ледового плавания, ледоколов и др. — возникла необходимость использования сталей, обеспечивающих гарантированное предотвращение распространения хрупких разрушений при предельно низких климатических температурах. В работе [5] было показано, что выполнение требований по основной характеристике хладостойкости — работе ударного изгиба образцов с острым надрезом KV , определяющей температурную категорию стали в соответствии с Правилами классификации и постройки морских судов [6], — недостаточно для гарантии предотвращения таких разрушений. Необходимы дополнительные испытания металла в натурной толщине, которые могут проводиться в рамках Программ испытаний при получении одобрения Регистром производителей металлопроката. В качестве таких испытаний принято определение параметра трещиностойкости *CTOD* при статическом нагружении, определяющего возможность старта трещины, и определение критических температур вязко-хрупкого перехода, коррелированных с результатами испытаний крупногабаритных образцов на торможение хрупкого разрушения. Наряду с испытаниями по определению критических температур *NDT* и T_{KB} определение температуры *DWTT* как альтернативного метода контроля сопротивления материала распространению хрупкого разрушения предусмотрено в разделе «Хладостойкие стали» части XIII «Материалы и сварка» Правил [6]. Можно отметить, что по ориентации разрушения и динамическому характеру приложения нагрузки это испытание является наиболее близким к условиям разрушения корпусных конструкций по сравнению с пробами *NDT* и T_{KB} . Согласно [6], стальному прокату, удовлетворяющему этим дополнительным требованиям при некоторой минимальной температуре T_d , присваивается так называемый класс Arc-сталей с указанием этой температуры в верхнем индексе.

К настоящему времени разработаны технологии изготовления сталей Arc-класса на ведущих металлургических предприятиях РФ [7, 8]. Однако практика проведения испытаний *DWTT* для судостроительных сталей к настоящему времени минимальна, несмотря на то, что все эти предприятия оснащены вертикальными копрами большой энергоемкости и серийно проводят такие испытания при поставке проката для строительства магистральных трубопроводов. Связано это с проблемами визуальной оценки вида излома. Первоначально идеология испытаний *DWTT* основывалась на корреляции температуры, при которой в изломе образца появляется хрупкая составляющая, с минимальной температурой, при которой еще регистрировалось торможение трещины при полигонных пневматических испытаниях участков трубопровода под рабочим давлением. Для горячекатаных или нормализованных сталей в применявшихся до конца прошлого века толщинах металла до 14 — 16 мм определение этой температуры проблемы не представляло: резкая смена полностью волокнистого излома на полностью кристаллический происходила в температурном диапазоне 20 — 30 °С. Однако с повсеместным переходом на стали, изготовленные методом термомеханической обработки (ТМО), с повышением прочности металла и возрастанием применяемых

в трубопроводах толщин до 35 — 40 мм интерпретация вида излома оказывается затруднительной. Помимо классических составляющих излома («волокну» и «кристалл»), здесь присутствуют участки излома иной морфологии: расщепления с неоднозначно трактуемыми поверхностями; участки квазискола внутри волокнистого окружения в виде «стрелок» и пятен кристаллического излома на поверхностях среза; участок «обратного излома» с тыльной стороны образца, находящийся явно в зоне больших пластических деформаций, но с внешними признаками хрупкого разрушения (рис. 1). Кроме того, при полигонных испытаниях, проводимых в наши дни ПАО «Газпром» как последний этап приемки труб от конкретных поставщиков, установлено, что даже при одинаковом (100 %) волокнистом виде излома металл труб может существенно различаться по энергоемкости разрушения и способности тормозить трещину [9, 10]. Это связывается в первую очередь с присутствием расщеплений в изломе, характерных для сталей ТМО. В исходном состоянии металла эти дефекты отсутствуют, они возникают в процессе распространения трещины в металле со слоистой структурой из-за сниженного сопротивления отрыву по плоскостям, параллельным плоскости прокатки. Существенно снижает энергоемкость разрушения также снижение способности металла к деформационному упрочнению. Поэтому оказывается актуальной задача перехода от качественной регистрации вида излома к количественной оценке энергоемкости разрушения, аналогично тому, как это принято при наиболее распространенных испытаниях на ударный изгиб так называемых образцов Шарпи с острым надрезом (KV), где также применяется оценка вида излома, но все же основным показателем является работа разрушения.

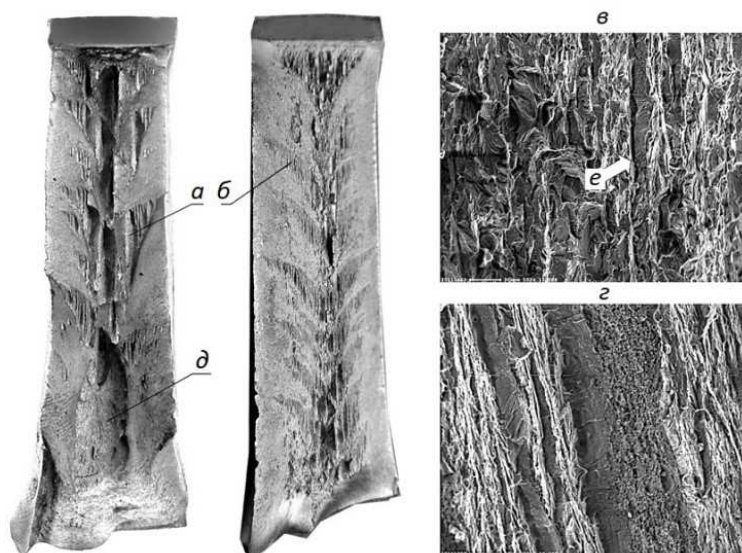


Рис. 1. Особенности разрушения образцов из стали ТМО:
а, б — «стрелки»; в — участки квазискола; г — участок вязкой прослойки; д — «обратный излом»;
е — расщепление по межфазным границам

Применительно к вертикальным копрам большой энергоемкости, требуемой для разрушения образцов натуральных толщин, эта задача решается установкой силоизмерителей или акселерометров на ноже копра либо применением бесконтактного метода измерения скорости перемещения бойка при разрушении. Именно последний метод реализован на вертикальном копре энергоемкостью 60 кДж, установленном в НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», рис. 2а, с лазерной бесконтактной системой. Принцип ее работы состоит в измерении с высокой частотой опроса (до 200 кГц) мгновенной скорости падающего груза, пересчитываемой далее в ускорение (со знаком «—»), и в расчетном определении текущих значений нагружающей образец силы при известной массе груза. Исходные данные в виде зависимости скорости бойка от времени программное обеспечение пересчитывает в работу, совершаемую падающим грузом при его перемещении.

В настоящей статье рассматриваются результаты испытаний, выполненных на этом оборудовании с целью определения корреляций между работой разрушения и видом излома и обоснования предложений по переходу от регламентации вида излома к регламентации работы разрушения.

1. СВЯЗЬ ВИДА ИЗЛОМА С ЭНЕРГОЕМКОСТЬЮ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЯЗКОМ ЕГО МЕХАНИЗМЕ

На первой стадии исследований были выполнены работы по определению погрешности измерений применяемой системы и разработке методики определения работы разрушения и отделения последней от работы, поглощаемой амортизаторами копра после разрушения образца (рис. 2б). Для калибровки использовались испытания образцов, не доведенных до полного разрушения, для исключения участия амортизатора в затратах энергии падающего груза. В этом случае работа разрушения, определяемая исходя из записи лазерной измерительной системы, должна быть равна потенциальной энергии поднятого груза. Сопоставление этих величин позволило заключить, что их различия не превышают 1,5 %. При определении полной работы разрушения образца A_{Π} , в случае хрупких разрушений она может быть выделена как соответствующая горизонтальному участку зависимости совершенной работы от перемещения бойка. При вязком разрушении она определяется как соответствующая перемещению точки приложения нагрузки более 70 мм.

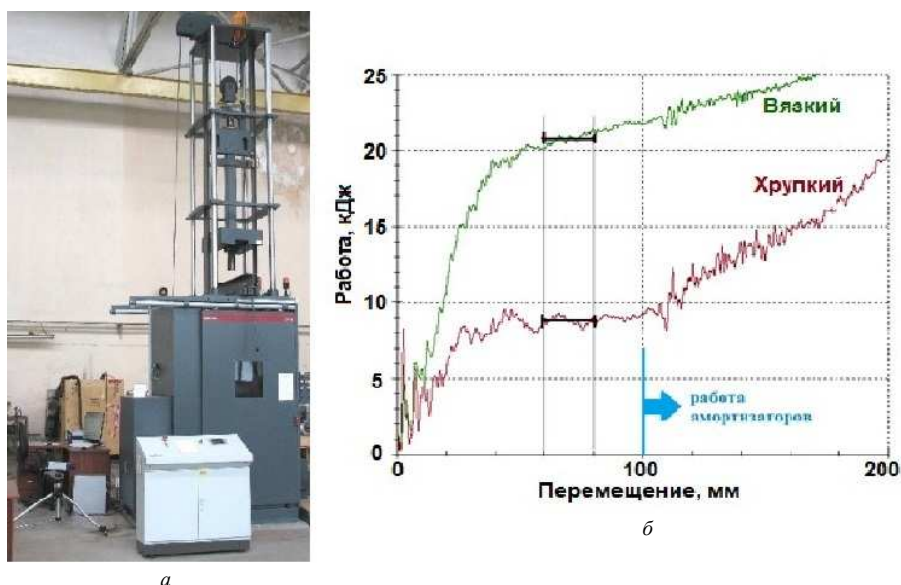


Рис. 2. Внешний вид копра 60 кДж с лазерной системой (а);
диаграмма нагружения в координатах «перемещение — работа» (б)

Для определения связи работы разрушения с характеристиками испытываемого металла, толщиной образца и видом разрушения испытывались образцы, вырезанные из сталей с пределом текучести, находящимся в диапазоне 506 — 805 МПа, изготовленных методом термомеханической обработки (ТМО) и закалкой с отпуском (З+О), в толщинах от 14 до 41 мм. По показателю работы ударного изгиба KV все испытанные материалы при температуре вплоть до -60°C находились в вязком состоянии. При этом, как неоднократно отмечалось в литературе, температура вязко-хрупкого перехода, определенная по методу $DWTT$, оказывается сдвинутой, как минимум, на 30°C в сторону более теплых температур по отношению к определяемой по испытаниям KV (рис. 3).

Сопоставление результатов определения работы разрушения A_{Π} с содержанием волокнистой составляющей в изломе (далее % B), выполненных для серии образцов одинаковой толщины и из одного материала при снижающейся температуре испытаний, в целом показывает устойчивую корреляцию этих величин. Однако для различных сталей и варьируемых толщин соотношения A_{Π} и % B , естественно, различны (рис. 4). Для определения вида зависимости A_{Π} от толщины t предложено представление ее как суммы двух слагаемых: работы, затрачиваемой на зарождение трещины A_3 , и работы распространения трещины A_p : $A_{\Pi} = A_3 + A_p$, каждая из которых имеет свою зависимость от t . Величина A_3 определялась по результатам сравнительных испытаний образцов со стандартным V -образным надрезом и с хрупкой наплавкой, обеспечивающей минимизацию величины A_3 , и для образцов с наплавкой принималось: $A_{\Pi} \approx A_p$ [11]. Получено, что разность работы разрушения образцов обоих типов приблизительно пропорциональна толщине образца, с коэффициентом, убывающим при возрастании предела текучести стали. Это снижение

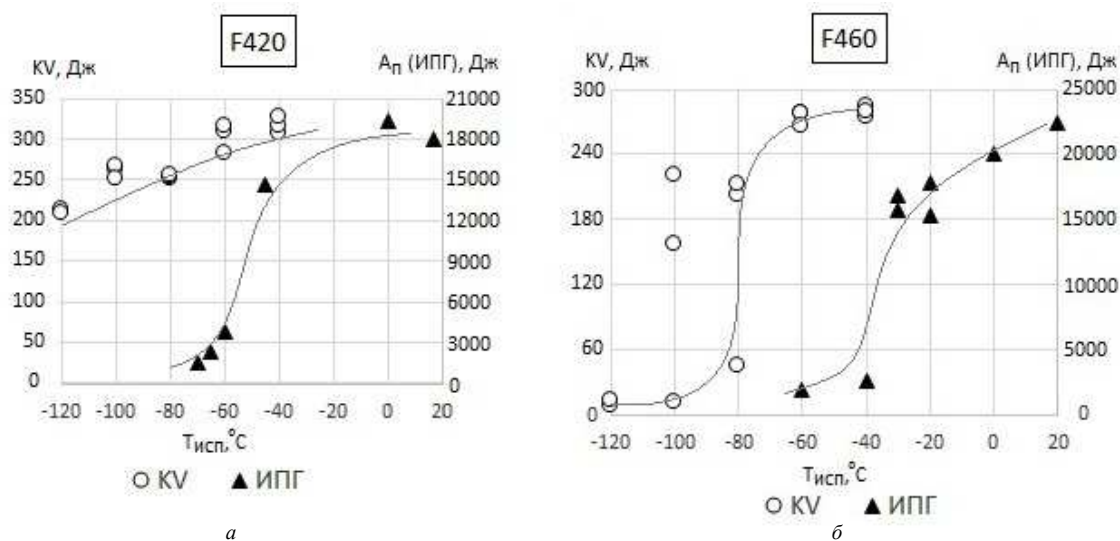


Рис. 3. Сопоставление серийных кривых поглощенных энергий KV (Шарпи) и A_p (при DWTT) для сталей ТМО: а — F420, б — F460

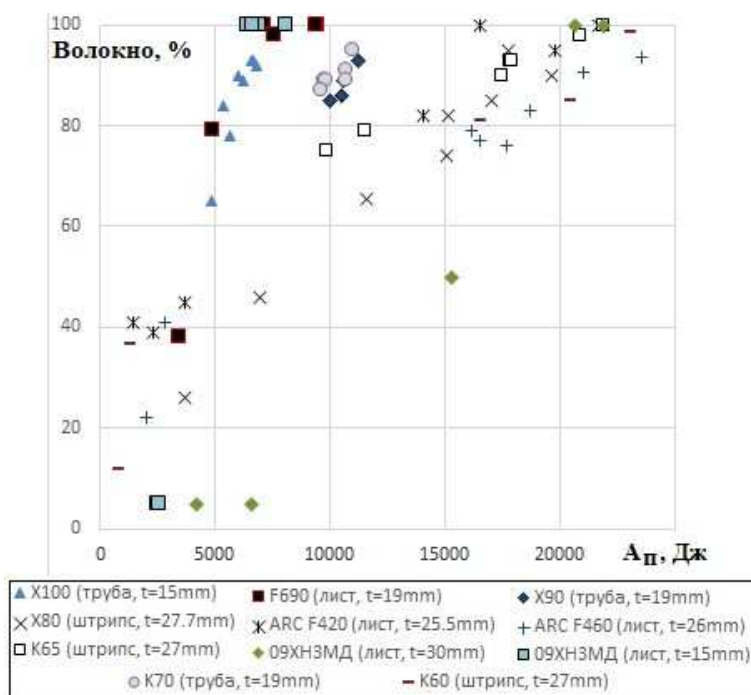


Рис. 4. Сопоставление результатов регистрации вида излома (% B) с работой разрушения образцов DWTT

коэффициента пропорциональности может быть связано со снижением способности к деформационному упрочнению стали с увеличением прочности. Используя в качестве характеристики деформационного упрочнения отношение предела текучести R_e к временному сопротивлению R_m , получили следующую оценку:

$$A_3 \approx 3,4R_e \cdot t(1 - R_e/R_m) \quad [\text{Дж, МПа, мм}]. \quad (1)$$

Предположено также, что работа распространения разрушения A_p при полностью вязком его механизме пропорциональна объему зоны больших пластических деформаций, то есть квадрату толщины (рис. 5):

$$A_p = G(W - a)t^2, \quad (2)$$

где W — высота образца (для стандартного образца = 75 мм);
 a — размер исходной трещины (для стандартного образца = 5 мм);
 G — коэффициент с размерностью [Дж/мм³].

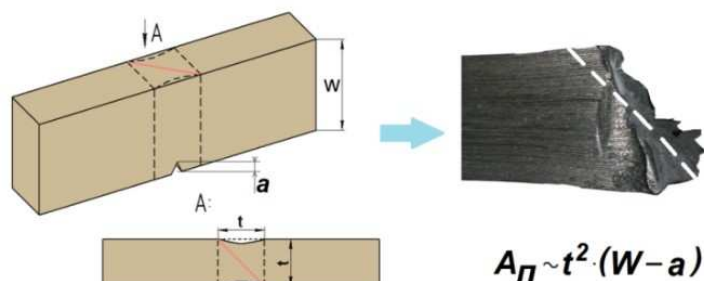


Рис. 5. Предлагаемая схема учета размеров образца

Подтверждением корректности корреляции работы разрушения при вязком состоянии металла с объемом деформируемого металла V , то есть квадратом толщины, а не с площадью излома S (как это часто принимается) является сопоставление величин приведенной работы разрушения образцов DWTT и KV (рис. 6). В первом предположении результаты оказываются достаточно близкими (рис. 6а), во втором — явно различными (рис. 6б). Здесь принимается:

- для образца DWTT: $V_{DWTT} = 70 \text{ мм} \cdot t^2$ [мм³]; $S_{DWTT} = 70 \text{ мм} \cdot t$ [мм²];
- для образца KV: $V_{KV} = 8 \cdot 10^2$ [мм³]; $S_{KV} = 8 \cdot 10$ [мм²].

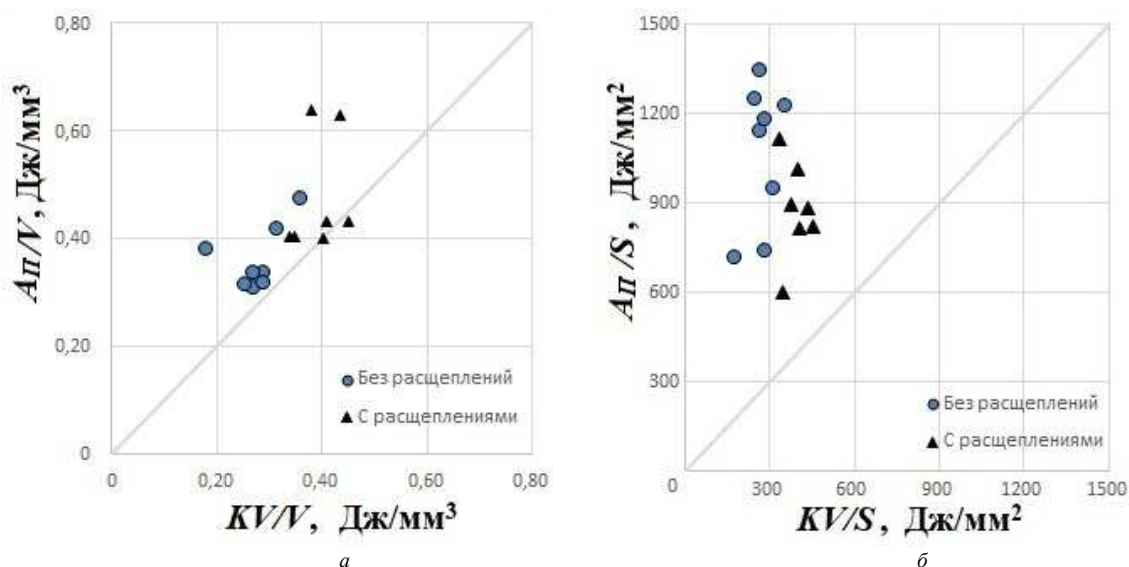


Рис. 6. Соотношение поглощенной при испытаниях DWTT (A_p) и Шарпи (KV) энергии при вязком разрушении, отнесенной к объему «зоны процесса» (а) и к площади нетто-сечения S (б)

Коэффициент G имеет смысл критической плотности работы разрушения и может быть определен как произведение предела текучести материала при динамическом нагружении R_e^{din} на величину усредненной по этому объему деформации E^P , соответствующей достижению некоторой критической деформации у поверхности разрушения: $G = E^P \cdot R_e^{din}$.

В работе [12] при сопоставлении статических и динамических ($DWTT$) диаграмм нагружения было установлено следующее увеличение предела текучести с возрастанием скорости деформации: $R_e^{din} \approx 1,4R_e$. Ранее в работе, выполненной с участием авторов, на основании сопоставления диаграмм деформирования образцов Шарпи (KV) при статическом и ударном нагружении было получено: $R_e^{din} \approx 1,33R_e$ [13]. Учитывая близость скоростей деформирования при испытаниях на маятниковом (KV) и вертикальном ($DWTT$) копрах и явно более высокую скорость деформирования в вершине бегущей по трубе трещины, далее было принято: $R_e^{din} \approx 1,33R_e$.

При определении величины E^P по экспериментальным значениям A_{II} , после вычитания из A_{II} расчетной оценки A_3 , по формуле:

$$E^P = \frac{A_P}{(W-a)t^2 1,33R_e} \cdot 10^3 \quad (3)$$

получено, что для сталей различной прочности, с варьированием предела текучести от 506 до 805 МПа, она оказалась существенно различной, изменяясь от 0,62 до 0,21 и снижаясь с возрастанием прочности. Аналогично работе зарождения трещины, это может быть связано со снижением способности к деформационному упрочнению, приводящему к уменьшению равномерного удлинения и более раннему образованию утяжки в образце, изображенной на рис. 5 и аналогичной образованию «шейки» при испытаниях на растяжение. Кроме того, при использовании в качестве характеристики деформационного упрочнения отношения предела текучести R_e к временному сопротивлению R_m было получено:

$$A_P = 2,1 \cdot 10^{-3} R_e \cdot t^2 (W-a) (1 - R_e/R_m)^{0,64} \text{ [Дж, МПа, мм]}. \quad (4)$$

По фактическим данным для рассматриваемых сталей отношение R_e/R_m изменялось от 0,81 до 0,96. Это объясняет столь большое различие значений E^P , получаемых из экспериментальных данных. В итоге из (1) и (4) формула для оценки максимального значения работы разрушения на «верхнем шельфе» A_{II} имеет вид:

$$A_{II} = 3,4t(1 - R_e/R_m) + 2,1 \cdot 10^{-3} R_e \cdot t^2 (W-a) (1 - R_e/R_m)^{0,64} \text{ [Дж, МПа, мм]}. \quad (5)$$

На рис. 7 представлено сопоставление расчетных по (5) и экспериментально полученных значений полной работы разрушения. Расхождения не превышают 10 % за исключением ситуаций, когда в изломе присутствуют расщепления, характерные для структурно неоднородных сталей, производимых методом ТМО. В этом случае экспериментальные значения A_{II} могут быть существенно ниже расчетных.

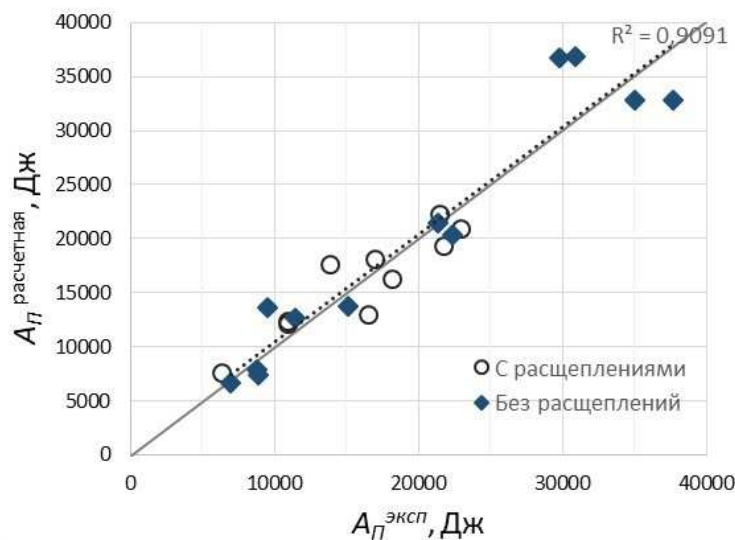


Рис. 7. Сопоставление расчетных оценок работы разрушения A_{II} по формуле (5) с экспериментальными результатами

По результатам металлографических исследований образование расщеплений в плоскостях, параллельных поверхности проката, для современных сталей ТМО не вызвано наличием раскатанных неметаллических включений и не сопровождается снижением характеристик пластичности, определяемых при растяжении на образцах, вырезанных в так называемом Z-направлении (перпендикулярно поверхности проката). Они связаны исключительно с наличием структурной анизотропии: присутствием цепочек зерен,

вытянутых вдоль направления проката и, как следствие, сниженным критическим напряжением отрыва в направлении толщины (рис. 8). Расщепления возникают при распространении фронта разрушения под действием напряжений σ_z , достигающих по теоретическим оценкам величины до $2,5R_e$ на фронте трещины. Их возникновение приводит к снижению жесткости напряженного состояния в вершине трещины, результатом чего является расширение диапазона вязко-хрупкого перехода при *DWTT* со смещением температуры появления кристаллического излома в более низкие температуры. Но при этом снижается работа вязкого разрушения, что, как отмечалось выше, наблюдается при полигонных испытаниях газопроводов. Это можно объяснить следующим образом: если, согласно схеме на рис. 5, величина A_p пропорциональна t^2 , то при полном расщеплении проката на n фрагментов работа разрушения должна быть пропорциональна $\sim n(t/n)^2 = t^2/n$. Поскольку полного разделения слоев металла не происходит, можно ввести некоторую эффективную толщину металла t_{ef} , зависящую от суммарной протяженности расщеплений в изломе. Такая обработка данных была выполнена на базе результатов испытаний серии образцов из трубной стали ТМО, категории прочности К65 (Х80) ($R_e = 570$ МПа, $R_m = 660$ МПа) толщиной 27 мм. Расщепления в изломе регистрировались и при комнатной температуре, поэтому для получения излома без расщеплений пришлось поднимать температуру испытаний до 100 °С. При снижении температуры суммарная длина расщеплений L возрастала при сохранении полностью вязкого излома до 20 °С. Полученная зависимость A_{Π} от L удовлетворительно описывалась формулой:

$$t_{ef} = t[1 - 0,09L/(W - a)]. \quad (6)$$

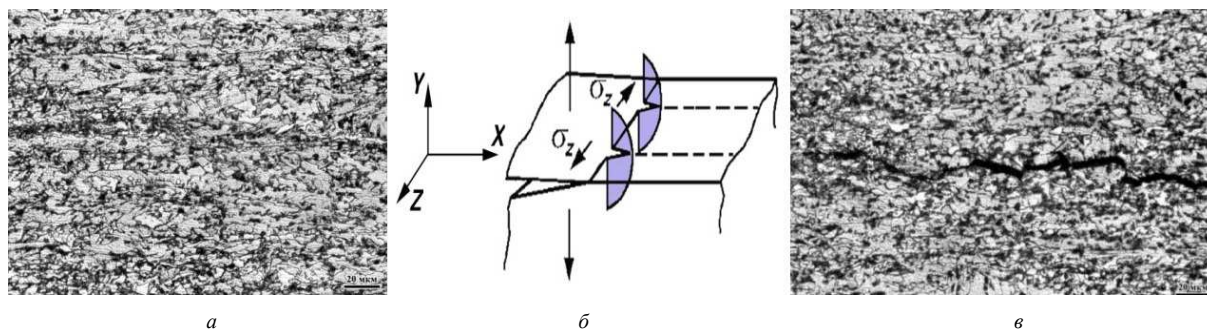


Рис. 8. Структурная неоднородность стали К65, штрипс толщиной 27,7 мм (а); схема образования расщеплений (затемнены) (б); трещина расщепления под поверхностью излома (в)

Таким образом, факт наличия полностью вязкого разрушения (т.е. 100 % волокнистой составляющей в изломе) еще не свидетельствует о высокой его энергоемкости, что и отмечалось при анализе результатов полигонных пневмоиспытаний [9, 10]: существенное значение имеет способность к деформационному упрочнению металла и гомогенность структуры проката. По данным работы [10], характеристикой, безусловно коррелирующей с результатами полигонных испытаний, является погонная работа пластического деформирования металла трубы при ее разрушении G^{pipe} , отнесенная к единице длины излома [кДж/м]. Она определялась после завершения полигонных испытаний интегрированием плотности работы деформирования по периметру трубы, определяемой как произведение деформации, определенной по измерению поперечной утяжки стенки трубы, на величину R_e^{din} . Для этих результатов величина усредненной деформации металла трубы в объеме «зоны процесса» E_p^{pipe} может быть определена по формуле:

$$E_p^{pipe} = G^{pipe} / (t \cdot T \cdot 1,4 R_e^{din}), \quad (7)$$

где T — размер зоны пластического деформирования, измеряемой по периметру трубы. Если по приведенным в [10] результатам определения величины G^{pipe} принять, что $T = t$, то полученные оценки E_p^{pipe} оказываются качественно близкими к деформации E^p , определенной по результатам *DWTT* по формуле (3). В действительности распределения пластических деформаций в образце *DWTT* и реальной трубе существенно различны, и размер T , по-видимому, существенно больше, чем толщина стенки трубы. Однако можно предполагать, что этот размер также коррелирует с толщиной металла, и тогда результаты инструментированных испытаний *DWTT* могут рассматриваться как информация, позволяющая прогнозировать возможность торможения магистрального разрушения в газопроводах при вязких разрушениях.

2. КОНТРОЛЬ УСЛОВИЙ ТОРМОЖЕНИЯ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Как отмечалось выше, кристаллические участки изломов образцов *DWTT* для современных сталей могут иметь различную морфологию. «Классический» кристаллический участок излома должен располагаться в центральной его части непосредственно под надрезом, с преимущественной ориентацией плоскости излома перпендикулярно направлению изгиба. Но к участкам кристаллического излома могут быть также отнесены так называемые «стрелки» — участки поверхности среза (ориентированные под углом, близким к 45° , по отношению к направлению нагрузки), обладающие кристаллической поверхностью; участки так называемого «обратного излома» — пятна с кристаллической поверхностью, расположенные со стороны, противоположной надрезу, и отделенные от надреза участком волокнистого излома (см. рис. 1). Для анализа вклада в энергоемкость разрушения отдельных его составляющих были выполнены исследования распределений пластических деформаций под поверхностью излома; примеры схемы вырезки шлифов для измерения твердости приведены на рис. 9. Величина пластической деформации определялась по калибровочной ее зависимости от изменения твердости по Виккерсу *HV5*, полученной на основе результатов испытаний призматических образцов на сжатие. В результате этих исследований получено [11]:

- пластическая деформация непосредственно вблизи участков среза («губы среза»), измеренная на расстоянии не более 1 мм, достигает 60 — 68 % при средней деформации в объеме металла с площадью сечения $t \times t$, близкой к оценкам по формуле (3);

- «классические» кристаллические участки излома соответствуют максимальной деформации, измеренной на глубине не более 1 мм от его поверхности, не превышающей 3 — 5 %;

- участки изломов типа «стрелок» и «обратного излома», визуальными определяемые как кристаллические, образуются при достаточно больших (20 — 45 %) деформациях и могут быть отнесены к участкам вязкого излома по энергоемкости разрушения.

Отсутствие значительной пластической деформации вблизи поверхности кристаллического излома (более точные исследования с использованием рентгеноструктурного анализа показывают, что большие пластические деформации в этом случае локализованы в слое толщиной не более 100 мкм) позволяет принять, что содержание кристаллической составляющей (% *C*), соответствующей распространению разрушения по хрупкому механизму при испытаниях *DWTT*, равно:

$$\% C = 100 \% \cdot (A_{\max} - A_{\text{факт}}) / A_{\max}, \quad (8)$$

где $A_{\text{факт}}$ — фактически определенная при испытаниях работа разрушения;
 A_{\max} — ее максимальное значение, определенное по формуле (5).

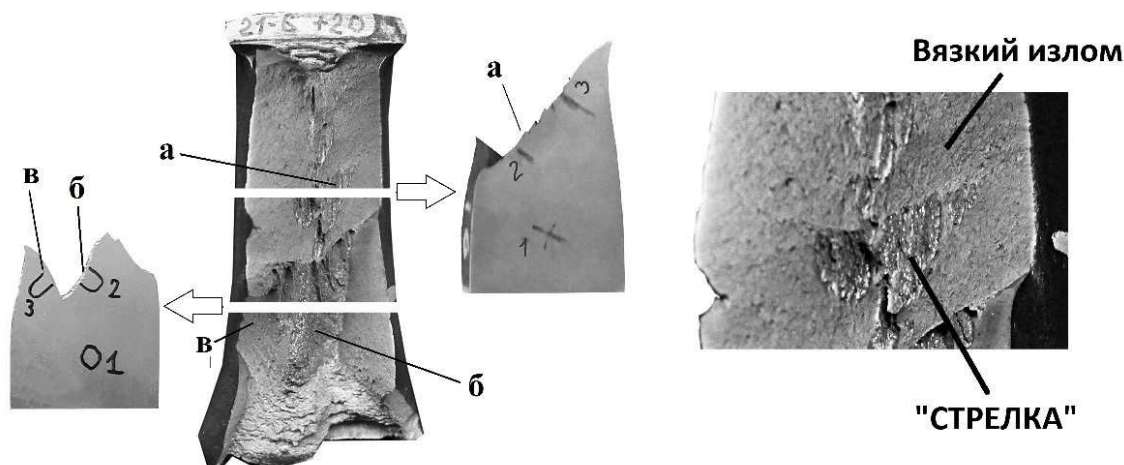


Рис. 9. Пример схемы вырезки шлифов из излома *DWTT* для оценки энергоемкости разрушения на отдельных его морфологических участках: *a* — «стрелка»; *б* — «обратный излом»; *в* — «губа среза».
 Зоны измерения твердости: 1 — на удалении $\approx t$ от поверхности разрушения;
 2 и 3 — непосредственно у поверхности разрушения

Для обоснования уровня допустимого снижения работы разрушения следует исходить из главной цели таких испытаний: это определение температуры применимости материала T_d , которая должна превышать температуру торможения хрупкого разрушения T_a ($T_d \geq T_a$). В предшествующих работах [14, 15] факт существования определенной величины T_a , не зависящей от стартовой длины трещины и действующих напряжений (т.е. от напряженного состояния в вершине исходного дефекта, измеряемого значением коэффициента интенсивности напряжений K_1), связывался с наличием на фронте распространяющейся трещины смешанного напряженного состояния: плоская деформация (ПД) в середине и плоское напряженное состояние (ПНС) вблизи поверхностей. Торможение трещины реализуется вследствие возрастания вклада участков ПНС в энергоемкость разрушения при нестабильном ее распространении с возможностью смыкания приповерхностных участков («губ среза»). Численными расчетами МКЭ с применением локальных критериев хрупкого и вязкого разрушения моделировался процесс распространения трещины, «сценарий» которого, как было получено, определяется величиной относительной трещиностойкости стали β :

$$\beta = \frac{1}{t} (K_{1a}/R_e)^2, \quad (9)$$

где K_{1a} — характеристика трещиностойкости материала, определяющая условие торможения хрупкого разрушения при ПД, если $K_1 < K_{1a}$. Распространение трещины вначале осуществляется «туннелированием» хрупкого разрушения в центре пластины при неподвижных участках исходного фронта трещины на поверхности; при этом длина проскока трещины в нестабильном режиме распространения (при отсутствии совершения работы внешних сил) Δa может многократно превышать толщину пластины. Предельная длина проскока трещины при нестабильном разрушении из условия энергетического баланса [14] может быть также связана с величиной β выражением:

$$(1 + 2C\beta)^2 = 8C\beta(5,8C\sqrt{\beta} \sqrt{\Delta a/t} + 1), \quad (10)$$

где C — коэффициент, определяющий «эффективный» размер τ приповерхностных участков ПНС, пропорциональных радиусу пластической зоны в вершине трещины r_{pl} при данном значении K_1 . При численном моделировании с коррекцией по экспериментальным данным — форме языка туннелирующей трещины — получено: $C \approx 0,14$ (таким образом, величина τ приблизительно равна четырем значениям r_{pl} , определяемым для условия ПД, или $0,44r_{pl}$ для условия ПНС).

При «сценарии» распространения туннелирующего языка хрупкого разрушения с неподвижными участками фронта трещины у поверхностей ее торможение предсказывается при любом сколь угодно малом значении β — оно определяет лишь длину проскока трещины в нестабильном режиме по формуле (10). Но следует учитывать возможность старта фронта трещины и на этих участках по вязкому механизму при достижении критической деформации среза. Можно принять, что именно это условие соответствует условию неограниченного распространения разрушения в нестабильном режиме (точнее, ограниченного лишь размерами конструктивного элемента с приблизительно одинаковым напряженным состоянием). Средняя деформация на участках ПНС на расстоянии x от вершины туннелирующей трещины может быть определена как: $\varepsilon(x) = u(x)/\tau(x)$, где u — раскрытие трещины. Тогда критическое значение деформации определяется при $x = \Delta a$ по формуле:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{2,9\varepsilon_Y \sqrt{\Delta a/t}}{C\sqrt{\beta}}. \quad (11)$$

В итоге значение β , соответствующее распространению нестабильного хрупкого разрушения, определяется из совместного решения уравнений (10) и (11), графически представляемого рис. 10. Результат расчета зависит от отношения $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_Y$, где ε_Y — деформация текучести: $\varepsilon_Y = R_e/E$. Ордината точки пересечения спадающей зависимости $\beta(\sqrt{\Delta a/t})$, формула (10), и возрастающих зависимостей $\beta(\sqrt{\Delta a/t})$, формула (11), построенных для различных отношений $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_Y$, соответствует значениям $\beta = \beta_{cr}$. Температура, при которой достигается соответствующее этой относительной трещиностойкости значение K_{1a} , может быть принята за температуру торможения трещины. Тогда для металла толщиной t и пределом текучести R_e условие предотвращения хрупкого разрушения, то есть условие применимости материала при минимальной температуре эксплуатации T_d , может формулироваться как:

$$K_{1a}|_{T=T_d} \geq R_e \sqrt{\beta_{cr} t}. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что в приведенных выше формулах (9) — (12) под пределом текучести понимается его значение с учетом динамического характера нагружения: $R_e^{din} \approx 1,33R_e$. То же следует учитывать при определении ε_Y : $\varepsilon_Y^{din} = 1,33R_e/E$. По результатам измерений средней деформации, достигаемой в зоне ПНС при разрушении срезом, для сталей, использованных в экспериментах, с пределом текучести в диапазоне 506 — 805 МПа, величина ε_{cr} может быть принята равной 0,30.

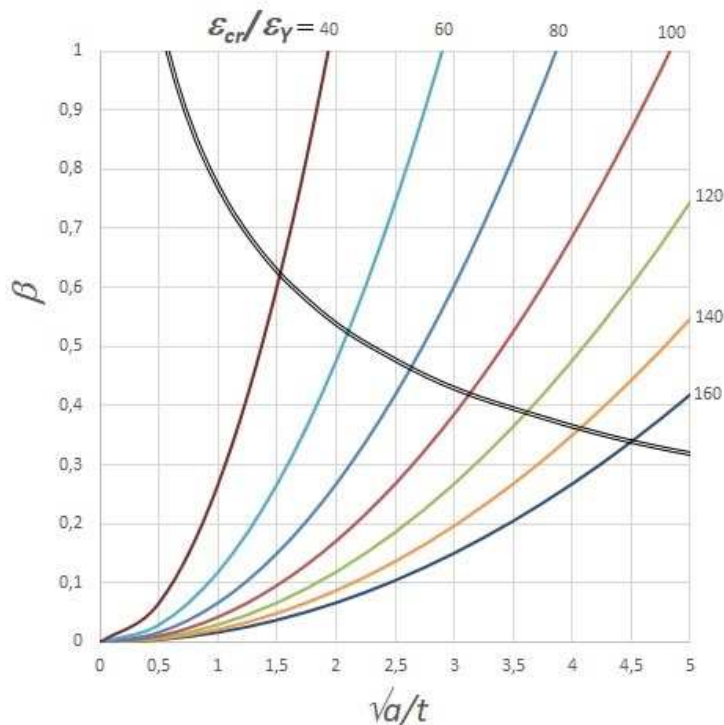


Рис. 10. Определение длины проскока трещины и условия ее неограниченного распространения в зависимости от отношения $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_Y$. Черная кривая — зависимость (10), цветные — зависимости (11) при различных отношениях $\varepsilon_{cr}/\varepsilon_Y$

Применительно к использованию результатов испытаний *DWTT* для оценки температуры выполнения условия (12) задача может быть сформулирована как прогнозирование связи % кристаллического участка излома, или % снижения работы разрушения, с величиной K_{Ia} . Для этого с использованием МКЭ в трехмерной постановке моделировалось нагружение образцов *DWTT* различной толщины при варьировании истинной диаграммы деформирования материала. После достижения расчетного прогиба, соответствующего старту трещины из надреза (установленному при упомянутых выше испытаниях образцов, не доведенных до разрушения), моделировалось распространение трещины при фиксированном перемещении, то есть в варианте неустойчивого разрушения, с определением так называемой *K*-тарировочной функции (зависимости K_I от длины трещины).

Получено, что для области вязко-хрупкого перехода, когда зарождение трещины в надрезе происходит при нагрузке, близкой к предельной нагрузке образования «пластического шарнира», эти зависимости при всех длинах трещины в образце находятся выше по величине K_I , чем тот диапазон значений K_{Ia} , который варьируется от условия торможения трещины при $\Delta a = t$ до неограниченного распространения трещины. Это выполняется для толщин до 40 мм, то есть для всего диапазона толщин образцов, которые могут быть испытаны по методике *DWTT*. Таким образом, запас упругой энергии в образце *DWTT* при старте разрушения не лимитирует возможность распространения хрупкого разрушения, определяемого величиной K_{Ia} , и зависимости (10) и (11) могут быть применены для определения протяженности хрупкого скачка трещины при *DWTT*.

Для связи % *C* в изломе с длиной скачка трещины, определяемой из формулы (10), принимаем следующие допущения:

1) площадь кристаллического участка S_{xp} определяется исходя из упрощенного предположения о треугольной форме языка хрупкого разрушения. Погрешность такого представления позволяет оценить фото изломов образца *DWTT* с участками хрупкого излома, представленных на рис. 11.

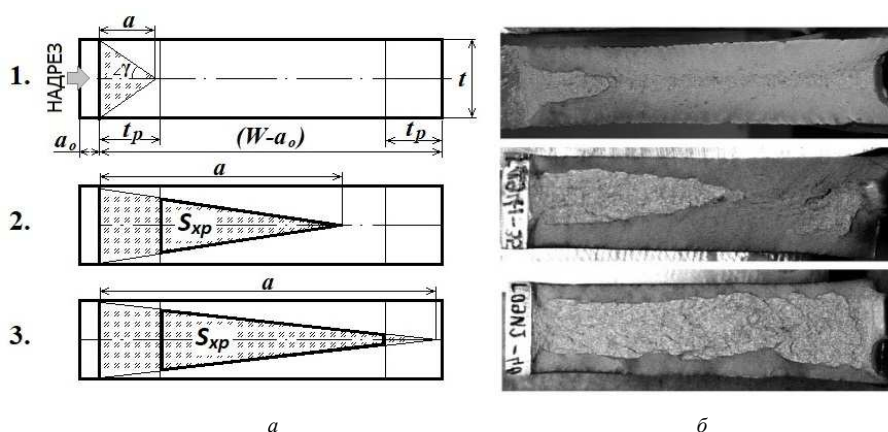


Рис. 11. Схема определения процентного содержания кристаллической составляющей в изломе образца DWTT в зависимости от длины хрупкой трещины (a); вид кристаллических участков излома (b)

2) при визуальной оценке вида излома, согласно стандартам [1 — 3], выделяется «зачетная» часть излома с площадью $S_{\text{зачетная}}$, с исключением участка t_p непосредственно у надреза и у противоположной поверхности в зоне удара. Протяженность участков t_p равна t при $t \leq 19$ мм или $= 19$ мм при $t > 19$ мм.

Тогда по определению $\% C = (S_{\text{хр}}/S_{\text{зачетная}}) \cdot 100 \%$, где величина $S_{\text{хр}}$ определяется из условий:

$$1. S_{\text{хр}} = 0, \text{ при } a < t_p \quad (13a)$$

$$2. S_{\text{хр}} = t(a - t_p)^2 / (2a), \text{ при } t_p < a \leq (W - a_0 - t_p) \quad (13б)$$

$$3. S_{\text{хр}} = t(a - t_p)2 / (2a) - t(a - W + a_0 + t_p)^2 / (2a), \text{ при } a > (W - a_0 - t_p), \quad (13в)$$

а величина $S_{\text{зачетная}}$ по определению равна:

$$S_{\text{зачетная}} = t(W - a_0 - 2t_p). \quad (13г)$$

Примеры результатов решения первой задачи — связи $\%$ кристаллической составляющей излома с величиной K_{Ia} — представлены на рис. 12 спадающими зависимостями для различных толщин и для двух значений предела текучести. Горизонтальными линиями отмечены значения K_{Ia} , соответствующие условию торможения трещины (11) при $\varepsilon_{cr} = 0,30$.

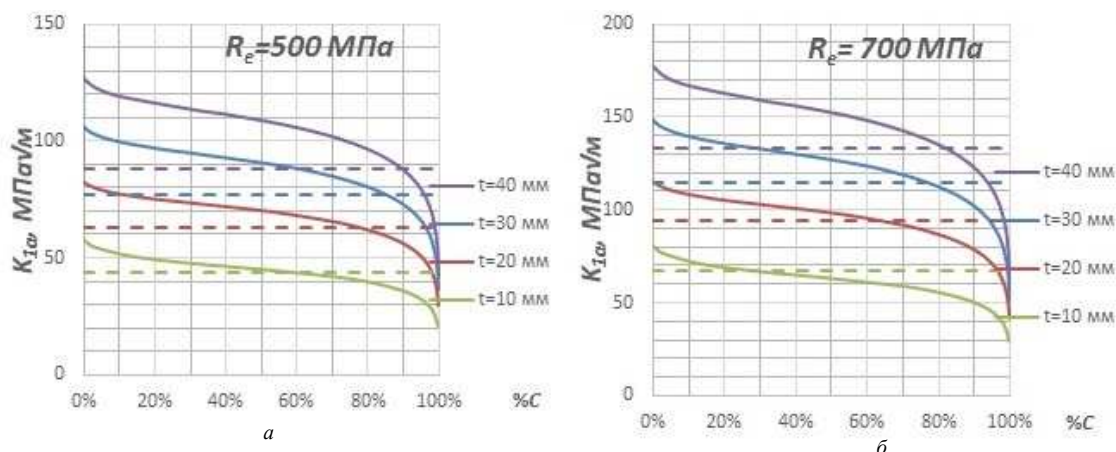


Рис. 12. Зависимости K_{Ia} от $\% C$ для различных толщин образца (сплошные кривые) в сопоставлении со значением K_{Ia} при торможении хрупкого разрушения (пунктирные линии)

Из результатов этого анализа можно заключить, что критическая температура вязко-хрупкого перехода T_{DWT} , определяемая как соответствующая 85 % волокнистого излома в Правилах [4] или как соответствующая 70 % волокнистого излома в Правилах [6], действительно близка к температуре торможения хрупкого разрушения только для толщин менее 20 мм, а для больших толщин она смещена в сторону более высоких температур. Величина температурного сдвига между T_{DWT} и T_a может быть оценена исходя из известной температурной зависимости K_{1a} , приводимой в стандарте ASME [16] для углеродистых и низколегированных сталей:

$$K_{1a} = 29,4 + 13,675 \exp[0,0261(T - T_{NDT})], [\text{МПа}\sqrt{\text{м}}, ^\circ\text{C}], \quad (14)$$

где T_{NDT} — критическая температура вязко-хрупкого перехода, определенная по методике NDT [17]. Исходя из различий значений K_{1a} , соответствующих условию торможения трещины и существующим критериям определения температуры T_{DWT} , полученные по (14) температурные сдвиги ΔT : $\Delta T = T_{DWT} - T_a$ приведены в табл. 1. В действующих Правилах [6] предусмотрен сдвиг $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ только для толщин от 30 до 40 мм и без учета прочности стали; в Правилах [4] такой сдвиг вообще не предусмотрен. Полученные результаты свидетельствуют о возможности введения менее жестких требований к результатам $DWTT$.

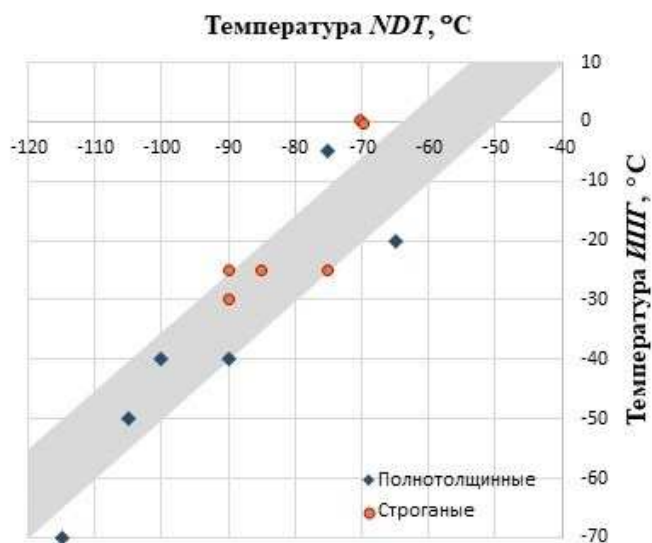
Таблица 1

Результаты определения температурного сдвига ΔT между T_{DWT} и T_a

R_{es} , МПа	ΔT , $^\circ\text{C}$. В числителе — при требовании 85 % B; в знаменателе — при 70 % B			
	$t = 10$ мм	$t = 20$ мм	$t = 30$ мм	$t = 40$ мм
500	12/10	13/11	14/13	16/14
600	6/3	9/6	11/9	13/11
700	4/0	7/4	9/7	11/9
800	2/–1	5/3	7/6	9/8

При переходе от требований к % C к определению соответствующего ему снижения работы разрушения необходимо учесть тот факт, что при контроле вида излома вводится понятие «зачетного участка» излома, а при определении работы разрушения результат определяется энергоемкостью всего излома. С учетом этого обстоятельства и из сделанного выше предположения о пренебрежимо малом вкладе работы хрупкого разрушения в величину A_{Π} получено: % снижения работы разрушения по отношению к полностью вязкому разрушению, эквивалентный требованиям к допустимому % кристаллической составляющей в изломе, с округлением в безопасную сторону составляет 20 % при требовании 85 % вязкого излома и 30 % — при требовании 70 % вязкого излома.

Полученные оценки носят теоретический характер и основаны на зависимости (14), рекомендуемой в [16] как нижняя огибающая экспериментальных данных, поэтому необходимо сопоставление сделанных выводов с известными экспериментальными результатами. Так как формула (14) связывает величину K_{1a} с температурой «нулевой пластичности» T_{NDT} как «референсной», то следует сопоставить результаты определения обеих температур (T_{NDT} и T_{DWT}), полученные для одного и того же материала. Такие данные были получены в ходе сертификационных испытаний по Программам РМРС применительно к сталям для трубопроводов и судостроительным сталям, преимущественно в диапазоне категорий прочности 535 — 590 МПа, толщиной 26 — 30 мм, и они сопоставлены на рис. 13. Исходя из зависимостей, построенных на основе формулы (10), при температуре $T_{DWT}^{70\%}$ величина K_{1a} должна находиться в диапазоне 95 — 115 МПа $\sqrt{\text{м}}$. Тогда температура T_{DWT} по формуле (14) должна быть «теплее» T_{NDT} на 58 — 68 $^\circ\text{C}$. Данные рис. 13 подтверждают это соотношение лишь как среднее температурное смещение, но при большом их разбросе (от 30 до 90 $^\circ\text{C}$). Такой разброс может быть следствием влияния анизотропии свойств материала на сопротивление распространению трещины в различных направлениях: преимущественно перпендикулярно поверхности проката в пробе NDT и вдоль проката при испытаниях $DWTT$. Это показывает, что соотношение (14) вряд ли может быть использовано для корректной оценки величины K_{1a} только исходя из температуры NDT . Но в рамках данного исследования оно является лишь способом определить температурный сдвиг между двумя значениями K_{1a} , и в этом случае оценка «в среднем» выглядит удовлетворительной.

Рис. 13. Сопоставление температур вязко-хрупкого перехода T_{NDT} и T_{DWTT} 70 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение инструментированных испытаний $DWTT$ ($ИПП$) с измерением работы разрушения позволяет существенно повысить информативность этих испытаний по сравнению с существующей практикой визуальной оценки вида излома по критериям «волокно» — «кристалл». Как минимум два фактора могут быть выявлены при измерении работы разрушения в области полностью вязких изломов: различие этой величины для сталей как следствие различия их способности к деформационному упрочнению и получение количественной характеристики ее снижения для сталей, склонных к образованию расщеплений в изломах. Регистрация работы разрушения позволяет сопоставлять металл труб газопроводов различных производителей по способности к торможению протяженных вязких разрушений.

Определение температуры T_{DWTT} как температуры, соответствующей условию безопасной эксплуатации судокорпусных конструкций и трубопроводов по критерию предотвращения хрупких разрушений, обосновано связью % кристаллической составляющей в изломе с определенным значением критического коэффициента интенсивности напряжений при торможении трещины в условиях плоской деформации K_{Ia} . В отношении этой связи выполненные оценки позволяют уточнить величину допустимого температурного сдвига между T_{DWTT} и минимальной температурой соответствия требованиям к стали Arc-класса.

Переход на инструментированные испытания позволит делать более объективные оценки содержания хрупкой составляющей в изломе по сравнению с визуальными оценками, затрудненными неоднозначной трактовкой отдельных морфологических составляющих излома. Необходимо отметить, что такая возможность предусмотрена в современной редакции ГОСТ 30456-2021, хотя методика оценки в этом случае отсутствует. Предлагаемая на основе выполненной работы процедура заключается в определении максимальной работы разрушения при полностью вязком изломе — либо экспериментально, либо по предложенной формуле (5) — и определении T_{DWTT} как температуры, соответствующей снижению работы разрушения на 20 % при требовании содержания 85 % волокнистой составляющей в изломе или на 30 % — при требовании 70 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM E436-03 (2014). Standard test method for drop-weight tear test of ferritic steels.
2. API 5L3 Recommended practice for conducting drop-weight tear test on line pipe. 4th ed., August 2014.
3. ГОСТ 30456-2021 Металлопродукция. Трубы стальные, прокат стальной листовой и рулонный. Метод испытания на ударный изгиб падающим грузом. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.
4. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2022.
5. Башаев В.К. Об определении хладостойкости современных высокопрочных сталей для арктических конструкций / В.К. Башаев, А.В. Ильин, В.Ю. Филин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38/39. — С. 74 — 79.
6. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023.
7. 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.
8. 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.
9. Штремель М.А. Наблюдения динамики протяженного разрушения трубопровода / М.А. Штремель, А.Б. Арабей, А.Г. Глебов, А.И. Абакумов и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2020. — № 1. — С. 39 — 46.
10. Штремель М.А. Энергоемкость протяженного разрушения газопровода под давлением / М.А. Штремель, А.Б. Арабей, А.Г. Глебов, А.И. Абакумов и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2020. — № 8. — С. 21 — 39.
11. Ильин А.В. Инструментированные испытания падающим грузом (ИПГ, DWTT): корреляция с визуальным контролем вида излома и проблемы оценки результатов испытаний / А.В. Ильин, А.В. Ларионов // Труды XXV Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. «Трубы-2023», 13 — 15 сентября 2023 г., г. Челябинск: сб. докл. Часть I. — С. 58 — 65.
12. Штремель М.А. Силы и деформации при испытании падающим грузом (ИПГ-DWTT) / М.А. Штремель, А.Б. Арабей, А.Г. Глебов, А.И. Абакумов и др. // Деформация и разрушения материалов. — 2016. — № 9. — С. 36 — 47.
13. 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.
14. 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. — Том 84, № 1 (I). — С. 56 — 65.
15. Ильин А.В. Анализ корреляции критических температур вязко-хрупкого перехода и температуры торможения хрупкого разрушения на основе численного моделирования МКЭ / А.В. Ильин, Д.М. Артемьев, В.Ю. Филин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2018. — Том 84, № 2. — С. 46 — 55.
16. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. XI Rules for inservice inspection of nuclear power plant components. July 1, 2021.
17. ASTM E 208-20. Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels.

REFERENCES

1. ASTM E436-03 (2014). Standard test method for drop-weight tear test of ferritic steels.
2. API 5L3 Recommended practice for conducting drop-weight tear test on line pipe. 4th ed., August 2014.
3. GOST 30456-2021 Metalloproduksiya. Truby stal'nye, prokat stal'noi listovoi i rulonnii. Metod ispytaniya na udarnyi izgib padayushchim gruzom [State Standard 30456-2021. Metal products. Steel pipes, rolled steel sheets and rolls. Method of impact bending test with a drop weight.]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2022.
4. Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022.
5. Bashaev V.K., Ilyin A.V., Filin V.Yu. Ob opredelenii khladostoykosti sovremennykh vysokoprechnykh staley dlya arkticheskikh konstruktssii [On the determination of cold resistance of modern high-strength steels for arctic structures]. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2015. No. 38/39. P. 74 — 79. (In Russ.)
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIII. Materials / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023.
7. Bashaev V.K., Khlusova E.I., Golosienko S.A. Development of technology for the production of sheet metal products up to 50 mm thick from high-strength steels with the "Arc" index. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2013. No. 36. P. 100 — 111. (In Russ.)
8. Bashaev V.K., Motovilina G.D., Ryabov V.V., Sych O.V. et al. Cold resistance of high-strength alloy steel with a yield strength of 500 MPa. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2014. No. 37. P. 29 — 38. (In Russ.)
9. Shtremel' M.A., Arabei A.B., Glebov A.G., Abakumov A.I. et al. Dynamics of extended pipeline failure. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020, Issue 10. P. 1191 — 1198.
10. Shtremel' M.A., Arabei A.B., Glebov A.G., Abakumov A.I. et al. Energy of the extended pipeline failure under pressure. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. Vol. 2021, Issue 4. P. 528 — 545.
11. Ilyin A.V., Larionov A.V. Instrumentirovannyye ispytaniya padayushchim gruzom (IPG, DWTT): korrelyatsiya s vizual'nym kontrolem vida izloma i problemy otsenki rezul'tatov ispytaniy. [Instrumented drop weight tear tests (DWTT): correlation with visual inspection of fracture surface and problems of evaluation of test results]. *Proceedings of the XXV Anniversary International Scientific and Practical Conference "Pipes-2023"*. September 13 — 15, 2023, Chelyabinsk: collection of reports. Part I. P. 58 — 65.
12. Shtremel' M.A., Arabei A.B., Glebov A.G., Abakumov A.I. et al. Forces and strains during drop weight tear test. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. Vol. 2017, Issue 4. P. 339 — 349.

13. 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.)
14. Ilyin A.V., Artem'ev D.M., Filin V.Yu. Simulation of the propagation and arrest of the brittle fracture in steel plates with initial crack using finite element method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*. 2018. Vol. 84. No. 1 (I). P. 56 — 65. (In Russ.)
15. Ilyin A.V., Artem'ev D.M., Filin V.Yu. Estimation of critical temperatures of brittle ductile transition and brittle fracture arrest correlation based on finite element modelling. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*. 2018. Vol. 84. No. 2. P. 46 — 55. (In Russ.)
16. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. XI Rules for inservice inspection of nuclear power plant components. July 1, 2021.
17. ASTM E 208-20. Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 656.61
EDN SDGAXN

СУДА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ МОРСКИХ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

В работе представлены результаты анализа эксплуатирующихся в настоящий момент типов судов для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций. Представлены характеристики современных судов для установки ветрогенераторов, кабельных судов, а также судов для постройки и обслуживания ветрогенераторов. В научной и технической литературе, касающейся морской ветроэнергетики, упоминаются суда для постройки и обслуживания ветрогенераторов (СПОВ) и суда для обслуживания ветрогенераторов (СОВ) как два разных типа судов. Цель данной статьи — установить функциональные различия между этими двумя типами судов, выявить их основные особенности и точное назначение в процессе возведения и обслуживания ветрогенераторов. Помимо этого, в статье рассмотрены приспособления для перемещения обслуживающего персонала между судами и ветрогенераторами.

Ключевые слова: ветроэлектростанция, судно для установки ветрогенераторов, судно для постройки и обслуживания ветрогенераторов, суда для обслуживания ветрогенераторов, система динамического позиционирования.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Суда для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций / А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 112 — 123. — EDN SDGAXN.

SHIPS FOR CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF OFFSHORE WIND FARMS

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

The paper presents an analysis of existing types of vessels for the construction and maintenance of offshore wind farms. The characteristics of modern ships for the installation of wind turbines, cable ships, as well as ships for the construction and maintenance of wind turbines are presented. In the foreign literature on offshore wind energy, commissioning service operation vessels (CSOV) and service operation vessels (SOV) are constantly mentioned as two different types of vessels. Correspondingly, this article aims to establish functional differences between these two types of vessels, to identify their main features and purpose. In addition, the article discusses devices for moving maintenance personnel between ships and wind turbines.

Key words: wind turbine, wind turbine installation vessels, construction support offshore vessel, support offshore vessel, dynamic positioning.

For citation: Reutskii A.S. Ships for construction and maintenance of offshore wind farms. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 79. P. 112 — 123. EDN SDGAXN. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на существующее инфляционное давление мировой экономики, приведшее к росту цен на специализированное технологическое оборудование и вызвавшее в 2023 г. отмену многих амбициозных ветроэнергетических проектов, сектор «зеленой» ветроэнергетики активно развивается. В соответствии с анализом Clarkson's Research, капитальные затраты в этом секторе мировой экономики в 2023 г. составили 59 млрд долл., а прирост вырабатываемой мощности составил 19,8 ГВт. По сравнению с 2022 г., прирост вырабатываемой ветряными электростанциями (далее — ВЭС) мощности составил 150 % и превысил лучшие допандемийные показатели. Приращение генерируемой морскими ВЭС мощности в странах ЕС составило 9,2 ГВт, что потребовало привлечения 33 млрд долл.

Из рис. 1 следует, что наибольшие финансовые вложения в морскую ветроэнергетику в 2023 г. внесли Великобритания и КНР, а тройка лидеров по генерации электроэнергии на морских ветроэлектростанциях — КНР, Великобритания и Германия, суммарная доля которых составляет более 80 %. Наиболее заметными морскими проектами ВЭС в Европе стали Hollandse Kust Zuic (Нидерланды) мощностью 15 ГВт, Fécamp (Франция) мощностью 497 МВт, Dogger Bank (Великобритания) мощностью 3,6 ГВт, Seagreen (Великобритания) мощностью 11 ГВт.

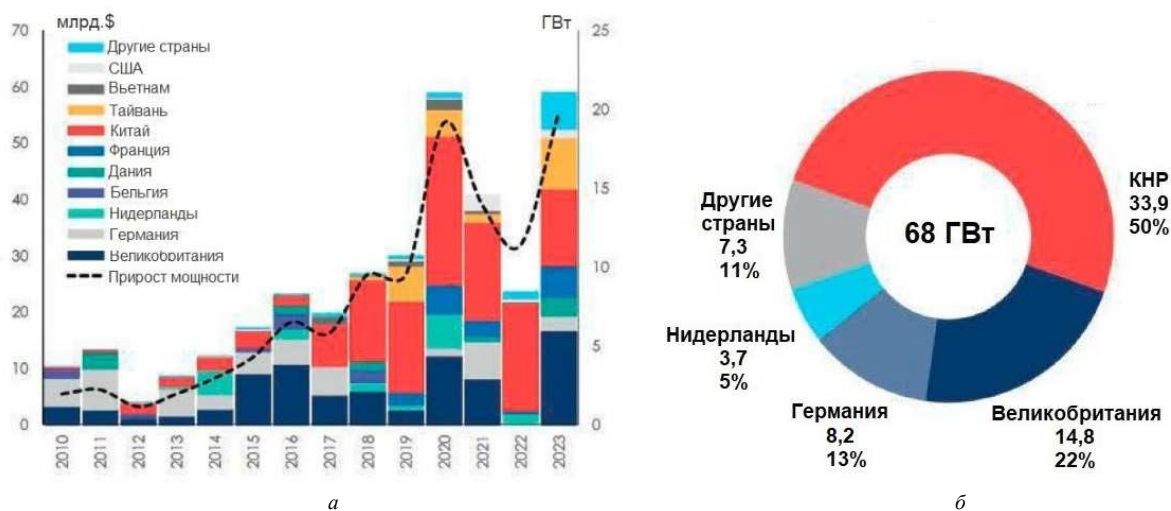


Рис. 1. Вклад разных стран в морскую ветроэнергетическую инфраструктуру: а) в капитальные затраты по ее созданию; б) в генерируемую ею мощность

Для создания и развития морской ветроэнергетической инфраструктуры потребовалось создание флота судов, позволяющего производить установку, достройку и ремонт ветрогенератора в открытом море. В соответствии с международной классификацией такие суда именуются wind turbine installation vessel [1], сокращенно WTIV (судно для установки ветрогенераторов, далее — СУВ), construction support offshore vessel, сокращенно CSOV (судно для постройки и обслуживания ветрогенераторов, далее — СПОВ). Вслед за появлением генерирующих мощностей возникает потребность в их ремонте и обслуживании, для чего применяется support offshore vessel — SOV (судно для обслуживания ветрогенераторов, далее — СОВ). На рис. 2 показана динамика роста флота СПОВ и СОВ, разделенная по типу судов и по их статусу (эксплуатируется/заказано).

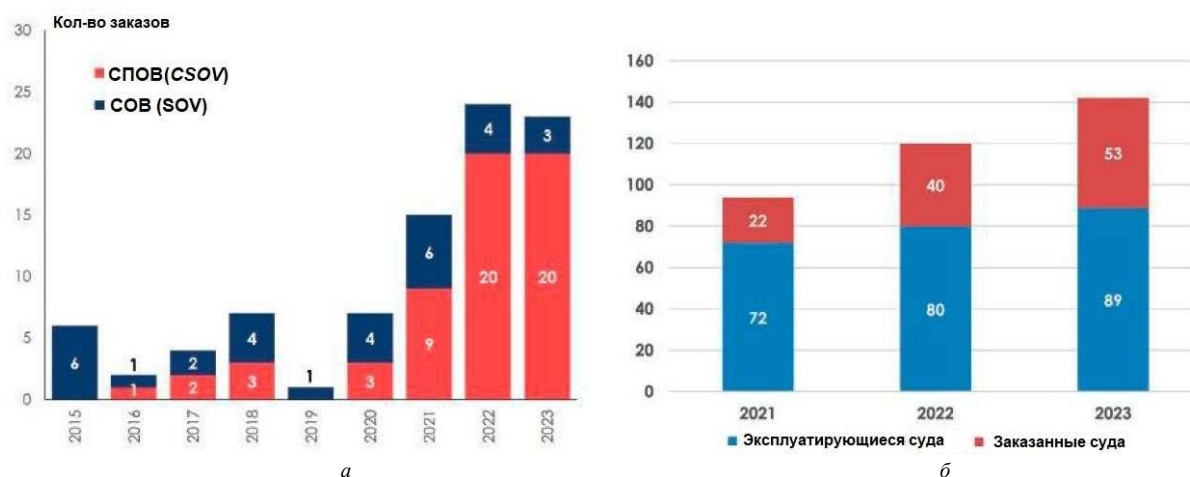


Рис. 2. Количество новых заказов СПОВ и СОВ (а); эксплуатирующиеся и заказанные СПОВ и СОВ (б)

В 2023 г. во всем мире было заказано 24 СПОВ и СОВ, что на одно судно меньше, чем в 2022 г. Суммарная стоимость этих судов составила 1,5 млрд долл. Все находящиеся в настоящий момент в портфеле заказов 53 судна демонстрируют новые в судостроении подходы к «зеленой» энергетике: 13 из них имеют в составе энергетической установки двигатели, работающие на альтернативном топливе (8 из них на метаноле [2]), при этом все они будут оснащены аккумуляторными батареями, использующимися как для движения, так и для питания судовых потребителей в течение ограниченного промежутка времени (например, пока судно находится в порту).

СУДА ДЛЯ УСТАНОВКИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Концепция СУВ, представляющего собой специализированную самоподъемную установку, оснащенную специальным крановым оборудованием грузоподъемностью 300 — 3000 т для установки морских ветрогенераторов, впервые появилась в начале 2000-х гг. Ранее установка ветрогенератора представляла собой сложную морскую операцию, выполняемую с привлечением несамоходных барж и размещаемого на них грузоподъемного оборудования, разрабатываемого и изготавливаемого каждый раз вновь под очередной проект. Такой подход на практике оказался неудобен и дорог, поэтому в 2004 г. было построено СУВ MPI Resolution (рис. 3) валовой вместимостью 14 857 рег. т, длиной 130,5 м и шириной 38,0 м, способное одновременно перевозить до 10 турбин и поднимающее свои шесть опор на высоту от 3 до 46 м с помощью гидравлических домкратов. Энергетическая установка судна состоит из четырех 16-цилиндровых четырехтактных дизель-генераторов механической мощностью 1900 кВт. Пропульсивная установка состоит из четырех винторулевых колонок (далее — ВРК) Aquamaster US 205/3850 суммарной пропульсивной мощностью 6 МВт, позволяющей судну развивать скорость 10,5 уз. Судно MPI Resolution оснащено системой динамического позиционирования Kongsberg K-Pos DP-21. Грузоподъемность кранового оборудования Huisman 600 PMT составляет 600 т. Вскоре к MPI Resolution присоединились два его сестершипа, MPI Adventure и MPI Discovery. В настоящий момент все три судна активно эксплуатируются, хотя они уже не могут устанавливать современные ветрогенераторы. Устанавливаемые ими ветрогенераторы North Hoyle мощностью 2 МВт и высотой 67 м выглядят ничтожно малыми по сравнению с Haliade-X мощностью 14 МВт и высотой 260 м, устанавливаемыми в настоящее время на ВЭС Dogger Bank (Великобритания). Размеры ветрогенераторов растут вслед за их мощностью, и существующий флот СУВ уже с трудом справляется с требуемой грузоподъемностью кранового оборудования более 1500 т, хотя есть несколько исключений в виде гигантских полупогружных плавучих кранов Thialf и Sleipnir, принадлежащих компании Heerema (рис. 3).



Рис. 3. СУВ MPI Resolution (а); плавкраны Thialf и Sleipnir (б, в)

Однако в 2023 г. на верфи COSCO Shipping в Наньтуне было построено СУВ Voltaire (рис. 4), устанавливающее ветрогенераторы на ВЭС Dogger Bank. Voltaire имеет 179,5 м в длину и 60 м в ширину, а четыре опоры высотой 130 м делают его самым высоким в мире СУВ, способным удерживаться на глубине до 80 м с грузом весом до 16 000 т. Его крановое оборудование имеет грузоподъемность около 3200 т (табл. 1). В том же 2023 г. флот СУВ пополнился судном Les Alizés (рис. 4), построенным на верфи МНН Наймен в КНР. Его крановое оборудование грузоподъемностью 5000 т оснащено универсальными быстроразъемными соединителями (UQC), электрическими захватами, компенсацией движения и полностью автоматизированной системой перемещения. При длине 236,8 м и ширине 52 м судно пригодно для погрузки, транспортировки, разгрузки и установки самых тяжелых фундаментов и компонентов морских ветрогенераторов. В настоящее время Les Alizés работает на ВЭС Gode Wind 3 и Borkum Riffgrund 3 в Северном море, а в 2027 г. присоединится к Voltaire для совместной работы над ВЭС Hollandse Kust West VII (Нидерланды). Несмотря на то, что в КНР построено около 90 % действующих в настоящее время СУВ, требования к размерам этих судов для собственных китайских ВЭС более скромные, чем для европейских, поскольку ветрогенераторы на китайских ВЭС, как правило, имеют меньший размер. Это означает, что некоторые старые европейские СУВ обрели вторую жизнь на внутреннем рынке Китая, где все производственные мощности по строительству СУВ заняты европейскими заказами.

Таблица 1

Изменение основных характеристик СУВ за последние 20 лет

Название	MPI Resolution	Vole au Vent	Voltaire
Год постройки	2004	2013	2022
Судовладелец	MPI Offshore Ltd	Jan De Nul Group	Jan De Nul Group
Флаг	Нидерланды	Люксембург	Люксембург
Судостроитель	Shanhaiguan Shipyard, КНР	Vidar, Польша	COSCO Shipping Heavy Industries, КНР
Класс	DNV GL	DNV GL	DNV GL
Длина наибольшая, L_{OA} , м	130,5	140,4	181,78
Ширина, B , м	38,0	41,0	60
Осадка летн., d , м	5,0	6,3	7,5
Высота борта, H , м	8,0	9,5	14,6
Дедвейт макс., т	5000	8000	21 500
Крановое оборудование, т	600 + 50	1500 + 100	3000 + 200
Площадь палубы, m^2	3200	3535	7000
Скорость, уз	11,0	12,0	11,5
Главные дизель-генераторы	$4 \times 1820 + 2 \times 1110$	6×4000	$4 \times 3535 + 4 \times 2650$
Мощность ВРК, кВт	4×1500	4×2600	4×3000
Стационарные носовые ПУ	3×890	3×2500	2×2600
Выдвижные носовые ПУ	—	—	2×2600
Мощность носовой ВРК, кВт	—	—	2×1600
Экипаж + персонал, чел	34 + 36	98	—



а



б

Рис. 4. СУВ Voltaire (а) и Les Alizés (б)

Ретроспективный анализ построенных за последние 20 лет СУВ демонстрирует рост их водоизмещения, вызванный необходимостью устанавливать ветрогенераторы большего размера, что ведет к росту главных размерений судов, увеличению палубных площадей, росту размера и мощности кранового и самоподъемного оборудования.

КАБЕЛЬНЫЕ СУДА

Суда-кабелеукладчики имеют давнюю и насыщенную историю, берущую начало еще в XIX в. При строительстве морских ВЭС они выполняют две основные функции: создание кабельной сети, соединяющей ветрогенераторы с подстанцией, и прокладка кабелей высокого напряжения между подстанцией ВЭС и береговой сетью. В настоящий момент существует около 70 кабелеукладочных судов, большинство из которых принадлежат компаниям-операторам Boskalis, Van Oord и Jan De Nul и морским кабелеукладочным компаниям Nexans, NKT и Prysmian.

Основная масса кабельных судов построена для военно-морского флота. Первое судно такого типа, спроектированное специально для строительства ВЭС, — Fleeming Jenkin (рис. 5, табл. 2) — в настоящий момент строится на верфи CMHI Haimen shipyard. Судно имеет грузоподъемность 28 000 т, предназначено для прокладки кабеля на глубинах до 3000 м и способно выдерживать натяжение кабеля в 15 т. Удержание судна в заданной точке будет обеспечивать СДП второго поколения, судно оборудовано дополнительным носовым подруливающим устройством.

Таблица 2

Основные характеристики кабельного судна для ВЭС Fleeming Jenkin

Год постройки	2026
Судовладелец	Jan De Nul Group
Судостроитель	CMHI Haimen shipyard, KHP
Длина наибольшая, L_{OA} , м	215
Ширина, B , м	40
Осадка летн., $d_{л}$, м	9,75
Осадка пор., $d_{пор}$, м	5,5
Грузоподъемность, т	28 000
Кол-во и грузоподъемность поворотных столов, т	$2 \times 11\,000 + 1 \times 7500$
Палубные поворотные столы	11 000 т, внутр. диам. 8 м
Поворотный стол твиндека	7500 т, внутр. диам. 8 м
Скорость, уз	13,5
Главные дизель-генераторы	30 600
ВРК, ед \times кВт	4×2600
Стационарные носовые ПУ, ед \times кВт	3×2100
Выдвижные носовые ПУ, ед \times кВт	2×2600
Размещение экипажа и специалистов	120 одноместных кают



Рис. 5. Кабельное судно для ВЭС Fleeming Jenkin, строящееся в КНР

Экологичность является важной особенностью судна, поэтому оно будет оснащено системами очистки отработавших газов его дизель-электрической энергетической установки. Его двухтопливные двигатели работают на биотопливе и метаноле. Также Fleeming Jenkin получит гибридную силовую установку, которая объединит его электрические генераторы с аккумуляторными батареями мощностью 2,5 МВт для снижения пиковых нагрузок в бортовой электросети. В январе 2024 г. стало известно, что компания Anglo Belgian Corporation поставит на это кабельное судно четыре двигателя мощностью 7,2 МВт и один двигатель мощностью 1,8 МВт, использующие метанол в качестве топлива. Введение судна в эксплуатацию ожидается в 2026 г.

СУДА ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ И СУДА ДЛЯ ПОСТРОЙКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Различия между СОВ и СПОВ

В источниках информации о СОВ и СПОВ различия между ними определяются как существенные или, наоборот, не имеющие принципиального значения. Не давая оценок, сопоставим главные отличительные особенности судов этих типов. СОВ используется для обслуживания и ремонта оборудования во время эксплуатации морской ВЭС. При использовании СОВ обычно заключается договор на долгосрочный чартер, судно может вместить около 60 человек обслуживающего персонала. СПОВ используется для строительства, установки и запуска в эксплуатацию ветрогенераторов, а также в гарантийный период после их постройки. При использовании СПОВ обычно заключается договор на краткосрочный или среднесрочный чартер. Типичное СПОВ вмещает около 120 техников. В целом, СПОВ имеют большие размеры и строятся специально для морской ветроэнергетики, в то время как некоторые СОВ являются существенно модернизированными судами снабжения. Таким образом, основное различие заключается в том, что СОВ используется для текущих работ, а СПОВ — для начальных этапов строительства и запуска в эксплуатацию ВЭС, и флот этих судов значительно моложе флота СОВ.

Поскольку СОВ характеризуются меньшими размерениями, они больше подходят для реализации концепции электрического судна, однако в настоящее время при заказе судов предпочтение отдается более крупным СПОВ (рис. 6а). Динамика роста морской ветроэнергетики такова, что по различным оценкам [3 — 5] к концу этого десятилетия для удовлетворения спроса потребуется от 150 до 250 СОВ и СПОВ. Это связано не только с увеличением числа ВЭС, но и с тем, что они все чаще располагаются в открытом море вдалеке от берега, где преобладает постоянство направления ветра, а сами ветрогенераторы могут иметь больший размер и мощность.



а



б

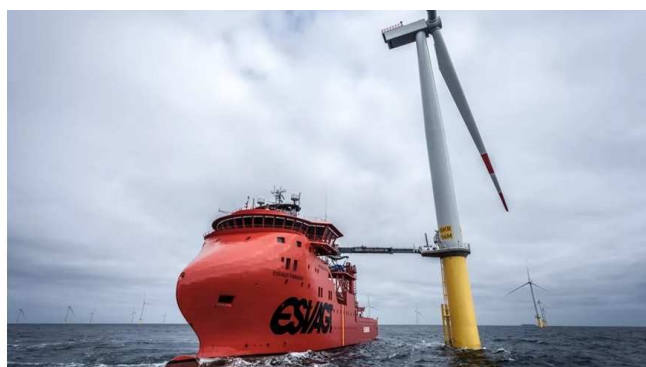
Рис. 6. СПОВ Wind of Change (а), COB Olympic Boreas (б)

Назначение и особенности COB и СПОВ

Ранее для обслуживания морских ветроэлектростанций использовали суда-снабженцы или якорезаводчики (рис. 7а). Однако с начала эксплуатации в 2015 г. первого COB Esvagt Froude (рис. 7б), характеристики которого представлены в табл. 3, этот тип судов так хорошо зарекомендовал себя, что обслуживающие морские ВЭС компании все чаще отказываются от идеи модернизации судов-снабженцев под свои цели и задачи, в пользу заказа COB и СПОВ, что наглядно демонстрирует растущий портфель их заказов (рис. 2а).



а



б

Рис. 7. Якорезаводчик Manta буксирует ветрогенератор мощностью 50 МВт [6] (а), COB Esvagt Froude осуществляет передачу технического персонала на ветрогенератор [7] (б)

Таблица 3

Основные характеристики COB

	COB	СПОВ
Тип судна	Esvagt Froude	WINDEA Leibniz
Название	2015	2022
Год постройки	Esvagt A/S	Bernhard Schulte Offshore/ICBC Leasing
Судовладелец	Дания	Норвегия
Флаг	Navyard Ship Technology, Норвегия	Ulstein Verft AS, Норвегия
Судостроитель	DNV	DNV
Класс	83,7	88,0
Длина наибольшая, L_{OA} , м	17,6	18,0
Ширина, B , м	6,5	6,4
Осадка летн., d , м	14,0	13,5
Скорость, уз		

Приведенные в табл. 3 технические характеристики указывают, что СОВ и СПОВ имеют мало различий с точки зрения их технических характеристик. При этом назначение СОВ или СПОВ определяет предъявляемые к ним специальные требования:

- продолжительная автономность по запасам топлива, смазочных материалов и провизии;
- обеспечение комфортных условий для экипажа и обслуживающего ветрогенераторы персонала;
- наличие мастерских, кладовых и прочих вспомогательных помещений, где можно разместить оборудование и провести ремонт деталей ветрогенераторов;
- обязательное применение системы динамического позиционирования;
- комплектование судна системой пересадки персонала Walk to Work (W2W);
- повышенный контроль экологической составляющей эксплуатации.

Автономность, размещение экипажа и обслуживающего персонала. СОВ или СПОВ несет дежурство вблизи ВЭС в течение продолжительного времени, чем объясняется требование продолжительной автономности. На его борту должны размещаться не только собственный экипаж, но и обслуживающий ветрогенераторы персонал. К примеру, на Esvagt Froude постоянно работают 60 человек: 20 человек команды и 40 — обслуживающего персонала. Прежде чем вернуться в базу для пополнения запасов и смены персонала, судно может провести в открытом море до четырех недель. Такая автономность позволяет избежать потерь времени на переходы от ВЭС к месту его берегового базирования и сокращает время простоя ветрогенераторов в случае их выхода из строя.

Обеспечение комфортных условий для проживания экипажа и обслуживающего персонала. Несмотря на то, что СОВ или СПОВ во многом схожи с судами-снабженцами [8] морских нефтедобывающих платформ, их отличают более комфортные условия размещения экипажа и обслуживающего персонала. Для них нормой являются одноместные каюты, оборудованные собственным санузлом, интернетом, телевидением и другими удобствами (рис. 8а). Помимо этого, на судах есть места для отдыха, фитнес-залы, кинотеатры, сауны и игровые комнаты (рис. 8б).



а



б

Рис. 8. Изображение каюты на СОВ/СПОВ (а); спортивный комплекс на борту СОВ Esvagt Froude (б) [1]

Наличие на борту значительного количества людей, не относящихся к экипажу, изначально ставило вопрос безопасности. Согласно СОЛАС [9], судно, перевозящее более 12 пассажиров, является пассажирским, однако технический персонал, который регулярно работает на морских объектах, нельзя отнести к пассажирам, поскольку он прошел проверку состояния здоровья и получил необходимую подготовку по технике безопасности согласно МКУБ [10]. По этой причине на СОВ и СПОВ распространяется действие Кодекса судов специального назначения (SPS) [11], который обеспечивает надлежащий уровень их безопасности и безопасности перевозимого ими персонала.

Необходимость в мастерских, кладовых и прочих вспомогательных помещениях для размещения оборудования и проведения ремонта деталей ветрогенераторов. Схема обслуживания ветрогенераторов предполагает их ремонт и техническое обслуживание прямо на борту обслуживающего судна вспомогательных помещений. Например, на «родоначальнике» СОВ Esvagt Froude (рис. 7б) площадь мастерских составляет значительные 450 м², и такая же площадь предназначена для размещения кладовых и шести TEU для запасных частей к турбинам. На многих СОВ есть возможность организовать ремонт крупногабаритных деталей прямо на верхней палубе в ее открытой части. Также на борту СОВ и СПОВ должны храниться все необходимые для ремонта и обслуживания запасные части и дополнительное оборудование. В некоторых случаях они могут занимать всю свободную площадь верхней палубы.

Требования к обязательному применению системы динамического позиционирования. Для выполнения требований к безопасности морских операций практически все суда обслуживающего ВЭС флота, будь то СПВ, СОВ, СПОВ или суда-кабелеукладчики, должны быть оборудованы системой динамического позиционирования (далее — СДП). По сравнению с технологиями СДП, применявшимися ранее в нефтегазовой отрасли при организации морских операций на шельфе, современные технологии шагнули далеко вперед. В использовавшихся ранее СДП время подготовки системы могло достигать 20 и более минут, что недопустимо при работе с ВЭС в открытом море.

Для улучшения быстродействия путем уменьшения времени подготовки современные СДП используют как глобальные, так и локальные датчики определения местоположения. Глобальные датчики используют спутниковые сети, такие как GNSS, в то время как локальные используют такие технологии, как лазерные и микроволновые системы наведения для определения дальности и пеленга на цель (например, ближайший ветрогенератор).

ВЭС представляют собой сложную среду для спутникового позиционирования, поскольку ветрогенераторы и их вращающиеся лопасти зачастую блокируют сигнал. Для позиционирования судна при потере спутниковой связи используется сочетание систем спутникового позиционирования, инерциальных навигационных систем (волоконно-оптических гироскопов) и систем без целеуказания. Последние используют системы лазерного позиционирования, которые сканируют местную среду, а не полагаются на физические цели, такие как отражатели, поскольку традиционные лазерные датчики иногда обнаруживают ложные отражения, вызванные другими отражающими поверхностями, и могут сбить с толку судовую СДП (рис. 9).

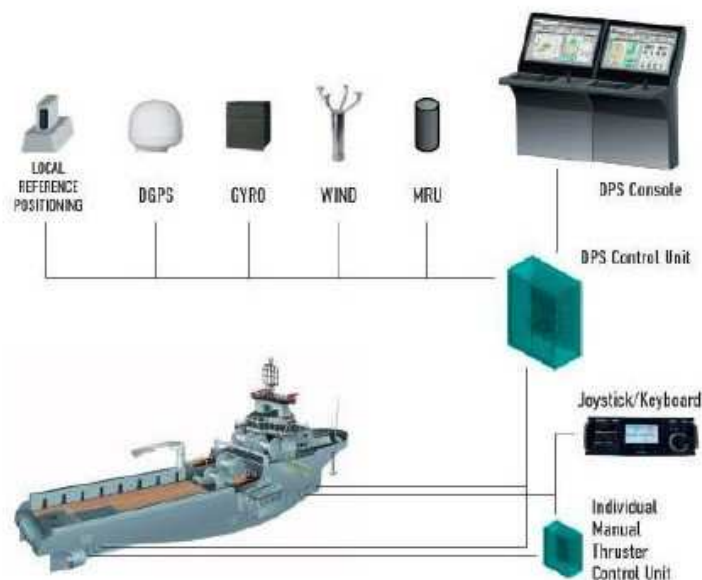


Рис. 9. Состав современной системы динамического позиционирования

Доставка обслуживающего персонала и/или оборудования на морской ветрогенератор. Поломки ветрогенераторов чаще всего происходят при неблагоприятных погодных условиях (значительной силе ветра, волнении), а задержки при ремонте зачастую приводят к значительным материальным и временным потерям, поэтому СОВ/СПОВ должно иметь возможность незамедлительно доставлять ремонтные бригады и перемещать оборудование даже при неблагоприятных погодных условиях.

В зависимости от оснащения, СОВ/СПОВ может доставлять технический персонал на ветрогенератор при помощи системы передачи с компенсацией перемещений судна Walk to Work (далее — W2W) (рис. 10а), а также при помощи специализированного судна для перевозки производственного персонала (далее — СПП; crew transfer vessel, CTV) (рис. 10б) или вертолета (рис. 10в).

Зачастую на ветрогенератор необходимо не только высадить спецперсонал, но и передать инструменты, провизию и другие грузы, поэтому наиболее востребованы системы W2W, способные динамически компенсировать все перемещения судна относительно ветрогенератора, что позволяет безопасно осуществлять пересадку персонала и перемещение грузов вручную (на тележках). Основным производителем этих систем является компания Ampelmann [11], в 2008 г. выпустившая первую версию системы «hexapod» (названной так из-за гидравлического привода с шестью приводными цилиндрами и реагирующей на шесть



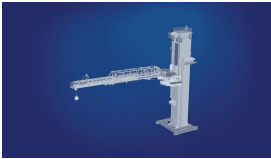


Рис. 10. Способы пересадки персонала с СОВ/СПОВ на ветрогенератор

степеней свободы) — A-типе. Сейчас продукция компании представлена моделями A-type, E-type, W-type и множеством других специализированных конструкций (табл. 4).

Таблица 4

Системы пересадки персонала W2W [11]

Характеристика	A-type	E-type	W-type
Изображение			
Класс	DNV	LR, DNV	DNV
Высота волны, м	3,0	4,5	3,5
Грузоподъемность, кг	200	1000	2000
Вылет стрелы, м	20 или 25	30	32
Конструкция	модульная	модульная	встраиваемая
Требования к судну	$L_{OA} > 55$ м	$L_{OA} > 70$ м	—
Размеры, м	6,3 × 7,2	8,4 × 9,5	—
Вес конструкции, т	40	105	—

Бизнес-модель компании Ampelmann долгое время была основана на предоставлении своего оборудования в аренду судовладельцам для работ с нефтегазовыми и ветроэнергетическими проектами. Имеющие модульную структуру A-type и E-type могут быть установлены на верхнюю палубу практически любого судна подходящего размера (см. табл. 4), однако эта структура определенным образом ограничивает их применение (невозможность работать на оба борта, не всегда оптимальное место установки на незанятой палубе судна). Модульные трапы, способные полностью компенсировать движение, представляют собой тяжелое и достаточно громоздкое оборудование. Переходной трап A-type, установленный на COV Esvagt Froude, может работать на судах длиной не менее 55 м. Более крупная модель E-type больше подходит для морской ветроэнергетики, но для ее эффективной работы требуется судно длиной не менее 70 м.

По этой причине в 2022 г. для COV и СПОВ была разработана система W-type. Она полностью интегрирована в судно и благодаря 32-метровому трапу позволяет работать на оба борта. У W-type есть башня с подъемником, благодаря чему пересадка выполняется на разной высоте. Система имеет электрический привод, занимает небольшую площадь и требует сравнительно мало электроэнергии. Установка электропривода на систему приводной гидравлики позволила сократить потребление электроэнергии на 80 %, что позволяет также использовать судовую электрическую систему вместо специализированного блока питания, характерного для A-type и E-type. Одним из заметных отличий W-type от многих (хотя и не от всех) систем Ampelmann является то, что при передаче персонала стрела крана всегда имеет горизонтальное положение, а перемещение судна под действием волн и ветра компенсируется подъемом, поворотом и телескопированием. Такое решение объясняется тем, что обслуживание ветроэлектростанций требует значительного количества оборудования и технические специалисты предпочитают брать с собой тележку (по этой причине трап на W-type также немного шире, чем обычно), что возможно только при использовании горизонтального трапа. Кроме того, W-образный кран также обладает значительно большей грузоподъемностью в 2000 кг по сравнению с 1000 кг у E-type.

В дополнение к средствам W2W для безопасного перемещения технических специалистов между COV и ветрогенератором используются суда для перевозки персонала (СПП). Их также можно использовать для

пассажиро- и грузоперевозок между СОВ и базой снабжения. Изначально для этой задачи использовались разьездные катера, однако, учитывая важность остойчивости судна при перегрузочных операциях, а также расширение диапазона эксплуатации, еще на ранних этапах развития ВЭС стало очевидно, что суда с небольшой площадью смоченной поверхности и двухкорпусной конструкцией катамарана обладают преимуществами как с точки зрения поперечной остойчивости, так и с точки зрения низкого сопротивления. Еще одним соображением было использование носовых передаточных устройств, при этом резиновые кранцы уступили место захватным устройствам и средствам W2W (рис. 10а).

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены существующие типы судов для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций. Представлены характеристики современных судов для установки ветрогенераторов, кабельных судов, а также судов для постройки и обслуживания ветрогенераторов.

Анализ СУВ за последние 20 лет показал, что из-за необходимости устанавливать ветрогенераторы все большего размера каждое новое судно строится с увеличенным водоизмещением, а это ведет к росту главных размерений судов, увеличению палубных площадей, размера и мощности кранового и самоподъемного оборудования, мощности судовой энергетической установки.

Для кабельных судов, обслуживающих ВЭС, характерны свои отличительные особенности, реализованные в новом проекте судна *Fleeming Jenkin*. Предварительно можно сказать, что относительно прочих морских судов для укладки кабеля оно имеет небольшие размеры. Также оно характеризуется особыми размерами палубных и трюмных поворотных столов (катушек) для хранения кабеля.

СОВ используются для обслуживания и ремонта оборудования во время эксплуатации морской ВЭС, часто они представляют собой модернизированные суда снабжения и вмещают около 60 человек обслуживающего персонала. При использовании СОВ обычно заключается договор на долгосрочный чартер.

СПОВ в целом строятся специально для морских ВЭС и применяются для их строительства, установки и запуска в эксплуатацию, а также в гарантийный период. Они имеют большие размерения по сравнению с СОВ и вмещают около 120 техников. При использовании СПОВ обычно заключается договор на краткосрочный или среднесрочный чартер.

Назначение СОВ или СПОВ определяет специальные требования к их автономности, к обеспечению комфортных условий для экипажа и обслуживающего ветрогенераторы персонала, к наличию мастерских, кладовых и прочих вспомогательных помещений для оборудования и проведения ремонта деталей ветрогенераторов, к применению СДП и комплектованию судна системой пересадки персонала W2W.

Для перемещения оборудования, инструментов, запасных частей, генераторов, контейнеров, а иногда и персонала с судна на платформу ветрогенератора используются системы с 3D-компенсацией наклонов и перемещений судна. Грузоподъемность систем W2W на СОВ/СПОВ варьируется от 1 до 20 т, и в последнее время наметился тренд на увеличение размера и грузоподъемности кранового оборудования из-за увеличения мощности и, соответственно, размеров ветрогенераторов. Большинство используемых в настоящий момент систем этого типа имеют гидравлическое исполнение, но в последние годы наблюдается переход к полностью электрическим моделям, которые позволяют значительно снизить энергопотребление и повысить эффективность выполнения грузовых операций.

Зоны, в которых производится монтаж ВЭС, являются особыми зонами контроля выбросов судовых энергоустановок, в них предъявляются особые требования к экологической составляющей эксплуатации. СОВ/СПОВ представляют собой суда, используемые для обслуживания отрасли возобновляемых источников энергии, поэтому они должны концептуально соответствовать «зеленой» повестке. В настоящий момент при их проектировании в качестве источника энергии на борту рассматриваются аккумуляторные батареи повышенной емкости и системы электродвижения, использующие метанол в качестве топлива. В качестве декларируемых достоинств таких энергоустановок необходимо упомянуть их эффективность, демонстрируемое ими сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу и уменьшение шумового загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berezniński A. Wind turbine installation vessel of a new generation / A. Berezniński // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2011. — Vol. 5. — P. 329 — 334.
2. 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. — EDN MIMXNW.
3. Díaz H. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms / H. Díaz, C. Guedes Soares // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 209. — P. 107381.
4. Li M. A closed-loop maintenance strategy for offshore wind farms: Incorporating dynamic wind farm states and uncertainty-awareness in decision-making / M. Li, X. Jiang, J. Carroll, R.R. Negenborn // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2023. — Vol. 184. — P. 113535.
5. Sykes V. A review and analysis of the uncertainty within cost models for floating offshore wind farms / V. Sykes, M. Collu, A. Coraddu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2023. — Vol. 186. — P. 113634.
6. McAuliffe F.D. Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms / F.D. McAuliffe, F.M. Judge, J. Murphy // Applied Energy. — 2024. — Vol. 374. — P. 124001.
7. Горин Е.А. Мировое судоходство и морская техника. Часть 2. Проекты и технологии (по итогам «Norshipping-2015») / Е.А. Горин, К.С. Чернов // Морской вестник. — 2016. — № 1. — С. 119 — 124.
8. Kondratenko A.A. A holistic multi-objective design optimization approach for Arctic offshore supply vessels / A.A. Kondratenko, M. Bergström, A. Reutskii, P. Kujala // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — No. 10. — P. 5550. — DOI 10.3390/su13105550.
9. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года. СОЛАС. 2024.
10. Guidelines on the Application of the IMO International Safety Management (ISM) Code. 6th ed., 2024.
11. Кодекс по безопасности судов специального назначения 2008 года (Кодекс ССН 2008 г.). (MSC.266(84) с поправками). 2016.
12. Lie K.W.L. Inverse dynamics control for the Ampelmann system: MSc thesis / K.W.L. Lie; Delft University of Technology. 2017.

REFERENCES

1. Berezniński A. Wind turbine installation vessel of a new generation. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2011. Vol. 5. P. 329 — 334.
2. 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. EDN MIMXNW. (In Russ.)
3. Díaz H., Guedes Soares C. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 209. P. 107381.
4. Li M., Jiang X., Carroll J., Negenborn R.R. A closed-loop maintenance strategy for offshore wind farms: Incorporating dynamic wind farm states and uncertainty-awareness in decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 184. P. 113535.
5. Sykes V., Collu M., Coraddu A. A review and analysis of the uncertainty within cost models for floating offshore wind farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 186. P. 113634.
6. McAuliffe F.D., Judge F.M., Murphy J. Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms. *Applied Energy*. 2024. Vol. 374. P. 124001.
7. Gorin E.A., Chernov K.S. Mirovoe sudokhodstvo i morskaya tekhnika. Chast' 2. Proekty i tekhnologii (po itogam "Norshipping-2015") [World shipping and marine engineering. Part 2. Projects and technologies (based on the results of "Norshipping-2015")]. *Morskoi vestnik [Maritime Herald]*. 2016. No. 1. P. 119 — 124.
8. Kondratenko A.A., Bergström M., Reutskii A., Kujala P. A holistic multi-objective design optimization approach for Arctic offshore supply vessels. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 10. P. 5550. DOI 10.3390/su13105550.
9. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS). 2024.
10. Guidelines on the Application of the IMO International Safety Management (ISM) Code. 6th ed., 2024.
11. Code of Safety for Special Purpose Ships, 2008 (2008 SPS Code) (MSC.266(84)), as amended in 2016.
12. Lie K.W.L. Inverse dynamics control for the Ampelmann system: MSc thesis / Delft University of Technology. 2017.

УДК 629.5.01
EDN PELJHW

ОБЗОР РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВ И ОБСУЖДЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

О.В. Таровик, канд. техн. наук, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 6А, пом. 511, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

В статье описывается ход развития теории и практики раннего проектирования судов за последние 50 лет, анализируются основные отечественные и зарубежные источники. Последовательно обсуждаются особенности аналитического, оптимизационного и системотехнического подходов к постановке и решению проектной задачи, рассматриваются применяемые при различных подходах прикладные инструменты. Выполняется сопоставительный анализ трех указанных подходов, делаются предположения о дальнейших путях развития теории и практики проектирования с использованием технологий искусственного интеллекта и цифрового дублирования. Анализируются причины некоторой инертности теории проектирования судов в современных российских условиях и определенной паузы в создании прикладных инструментов для концептуального проектного анализа. Делается вывод о возможности дальнейшего развития теории проектирования судов с применением современных информационных и программных технологий.

Ключевые слова: теория проектирования судов, история развития, оптимизация судов, системотехнический подход, цифровой двойник проекта, методы искусственного интеллекта.

Для цитирования: Таровик О.В. Обзор развития теории проектирования судов и обсуждение перспектив создания цифровых проектных решений / О.В. Таровик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 124 — 136. — EDN PELJHW.

REVIEW OF THE EVOLUTION OF SHIP DESIGN THEORY AND DISCUSSION OF THE PROSPECTS OF DIGITAL DESIGN SOLUTIONS

O.V. Tarovik, PhD, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

This article describes the evolution of the theory and practice of early ship design over the past 50 years, and analyzes the main Russian and foreign sources. The features of the analytical-, optimization- and system-based approaches to the formulation and solution of the design problem are consistently discussed, and the applied tools used in different approaches are described. A comparative analysis of these three approaches is carried out. Several assumptions are made about the ways for further development of the theory and practice of ship design using artificial intelligence and digital duplication technologies. The article also analyzes the reasons for some inertia of the ship design theory in modern Russia and a certain pause in the development of applied tools for conceptual ship design and analysis. A conclusion is made about the possibility for further development of ship design theory using modern information and software technologies.

Keywords: ship design theory, history of development, ship optimization, system-based approach, digital twin, artificial intelligence.

For citation: Tarovik O.V. Review of the evolution of ship design theory and discussion of the prospects of digital design solutions. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 124 — 136. EDN PELJHW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Отечественное гражданское судостроение развивается в сложных условиях, которые сформировались из-за отсутствия ряда важных позиций судового и судостроительного оборудования, а также нелегкой конкуренции с более мощной индустрией азиатских стран. Непростые условия создания конечного продукта неизбежно спровоцировали и некоторую инертность теории проектирования судов — научной дисциплины, посвященной формированию принципиального облика судна и его оптимизации в составе транспортной системы. Известно, что ранние этапы проектирования судна исключительно важны, поскольку в ходе их выполнения принимаются концептуальные решения, которые во многом определяют будущую эффективность всего проекта. Однако не до конца изжитые последствия ослабления отечественной школы исследовательского проектирования в 1990-х гг. привели к тому, что в настоящее время новых разработок в этой сфере в России практически не появляется, а зарубежные методические наработки остаются во многом неизвестными отечественному судостроительному сообществу.

Настоящая статья призвана хотя бы отчасти заполнить этот пробел и описать развитие теории и практики раннего проектирования судов за последние 50 лет, обобщив основные отечественные и иностранные источники. Несмотря на сложность формального анализа процесса проектирования, который, как известно, является одновременно и технологическим, и творческим [1], имеющаяся литература позволяет достаточно точно проследить происходившую в этой области смену парадигм и принципиальных подходов. Сразу оговоримся, что под проектированием далее понимаются ранние стадии этого процесса, то есть концептуальный, эскизный и отчасти технический (по нормам классификационного общества) проекты. По степени детализированности и разнообразию возможных решений они сильно отличаются от более поздних этапов, на которых основное внимание уделяется соответствию проекта большому количеству норм, правил и стандартов, а также информационному обмену между проектантом и строителем судна [2].

В качестве основы для классификации подходов к проектированию судна принята работа проф., д.т.н. А.И. Гайковича [3], в которой было предложено выделять аналитический, оптимизационный и системотехнический подходы. Стоит также отметить, что границы приведенных далее этапов развития теории и практики проектирования судов не являются четкими, поскольку для этой сферы в целом характерно смешение и взаимопроникновение различных концепций, а также сильная связь теоретических подходов с имеющимися прикладными инструментами.

Дальнейшее изложение строится следующим образом. В разделах 1, 2 и 3 последовательно описываются особенности аналитического, оптимизационного и системотехнического подходов в части постановки и решения проектной задачи, а также применяемых прикладных методов. Краткий сопоставительный анализ трех указанных подходов выполнен в разделе 4. Возможные направления дальнейшего развития теории проектирования обозначены в разделе 5, а заключительный раздел посвящен обсуждению перспектив создания цифровых решений для выполнения прикладного проектного анализа, а также их влияния на дальнейшее развитие теории проектирования судов.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Согласно [3], период до 1960-х гг. включительно соответствует этапу докомпьютерного «аналитического проектирования». Основной особенностью аналитического подхода является представление проектируемого судна набором статистических, эмпирических и аналитических уравнений, характеризующих отдельные качества проекта: водоизмещение, вместимость, остойчивость, ходкость и др. [4]. Суть аналитического подхода обусловлена спецификой постановки задачи проектирования, которая в этот период формулируется в виде вопроса о том, какими должны быть детальные характеристики судна, чтобы удовлетворить заданным требованиям технического задания (ТЗ), то есть обеспечить требуемую грузоподъемность, скорость хода, ледопроходимость и другие базовые технико-эксплуатационные показатели [4]. Решение проектной задачи при таком подходе достигается в ходе эвристического поиска рационального компромисса между противоречивыми требованиями к различным качествам судна, отдельное улучшение каждого из которых приводит к ухудшению других. Сам процесс проектирования формализуется в виде традиционной «проектной спирали» [5] и «метода последовательных приближений» [4], которые иллюстрируют циклический характер процесса создания судна и необходимость уточнения его характеристик по мере накопления информации о проекте и разрешения проектных противоречий.

Прикладные методы аналитического подхода строились исходя из того, что требования ТЗ выступают некоей данностью, которой необходимо соответствовать, а вопрос о том, насколько они рациональны с точки зрения интегральной эффективности судна, считался выходящим за рамки проектной задачи и решался в отдельной постановке — в ходе технико-экономического обоснования (ТЭО) проекта [6]. Назначение судна, его грузоподъемность, скорость хода, тип энергетической установки и другие важнейшие параметры ТЗ в ходе ТЭО определялись, как правило, аналитически по критерию приведенных затрат. В качестве практических инструментов использовались такие технологии, как оценка провозоспособности судна на линии, анализ структуры грузопотоков и тенденций развития флота [6].

В рамках описываемого докомпьютерного периода было разработано множество прикладных аналитических и статистических методов для оценки самых разнообразных качеств проектируемого судна — от соотношений главных размерений и коэффициентов полноты до нагрузки масс судна порожнем [4]. Пересчет с судна-прототипа использовался как одна из базовых технологий проектирования, причем соответствующие алгоритмы пересчета были созданы практически для всех качеств судна, включая остойчивость, непотопляемость и даже кривые теоретического чертежа [7]. Полуэмпирическая по своей сути методология

использования прототипа была проработана в такой степени, что при отсутствии близкого прототипа предлагалось его специально спроектировать, а затем путем пересчета максимально приблизить характеристики проекта к требованиям ТЗ.

Главной задачей, на решение которой направлялся весь методический аппарат начального проектирования, было повышение точности предсказания значений проектных параметров, так как от этого зависит трудоемкость дальнейших детальных этапов [4]. Однако потенциал увеличения точности аналитического подхода ограничен его собственными методическими особенностями. Например, известно, что пересчет нагрузки масс с разных судов-прототипов на одно и то же проектируемое судно с использованием одних и тех же методик пересчета практически гарантированно приводит к разным результатам. Также отметим, что характерной особенностью отечественной школы аналитического проектирования было широкое использование дифференциальной формы для представления уравнений, описывающих различные качества судна [4], чего не наблюдалось у зарубежных авторов [8, 9].

2. ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД

С появлением первых вычислительных мощностей и на фоне развития математических методов исследования операций в 1970-х гг. начинается этап «оптимизационного проектирования» [3]. Проектная задача рассматривается в контексте поиска наилучшего решения в многомерном аналитическом пространстве в условиях противоречивости различных требований к судну. Процесс оптимизации охватывает как характеристики самого судна («внутренняя задача»), так и параметры морской транспортной системы (МТС) («внешняя задача»), в составе которой судно должно работать наиболее эффективно [10]. Параметрами внутренней оптимизационной задачи являются, например, соотношения главных размерений, параметры общего расположения и коэффициенты полноты, а в рамках внешней задачи производится поиск оптимальных значений параметров ТЗ [11]. То есть на данном этапе в сферу практических интересов проектантов попадает вопрос формального обоснования требований технического задания, который ранее столь подробно не рассматривался в контексте непосредственного проектирования судна. Изменение принципиального подхода к проектированию оказалось возможным благодаря появлению технологий для массового расчетного варьирования характеристик судна с использованием первых электронно-вычислительных машин. Критерием оптимизации в подавляющем большинстве случаев выступала экономическая эффективность [12, 13], а для поиска решения использовались различные методы нелинейного математического программирования [14]. Отметим, что из решения «внешней» задачи проектирования с применением методов дискретной комбинаторной оптимизации в зарубежной практике далее выросла отдельная школа морской логистики, посвященная проблемам определения состава флота (fleet sizing) и составления расписаний (vehicle scheduling) [15].

С точки зрения технологий проектирования на оптимизационном этапе происходит широкое внедрение регрессионных моделей взамен графических и табличных данных, что, собственно, и позволяет создавать аналитическое пространство для поиска оптимального решения на основе формальной математической модели. Например, оцифровываются диаграммы для пробора гребных винтов по результатам серийных испытаний [16], предлагаются регрессионные модели для расчета сопротивления воды [17], массы металлического корпуса [9], ледопроходимости [18] и других параметров проектируемого судна. Также в этот период появляются компьютерные модели судовой поверхности [19], благодаря которым существенно ускоряется работа с геометрией обводов по сравнению с чертежно-графическим методом построения теоретического чертежа (ТЧ), применявшимся на докомпьютерном этапе. Модели судовой поверхности обеспечили возможность параметрического управления деталями формы обводов, а не только интегральными гидростатическими характеристиками корпуса, как это было ранее [20]. В 1970-х гг. судовая поверхность моделируется преимущественно с использованием узкоспециализированных аналитических подходов [21], однако к 2000-м гг. в судостроении окончательно закрепляются универсальные NURBS-модели [22], допускающие параметризацию и дальнейшую оптимизацию обводов с помощью методов численной гидродинамики [23].

Основным результатом оптимизационного этапа периода 1970 — 1990-х гг. стало кардинальное изменение облика транспортного флота 1990-х по сравнению с периодом 1960-х. Сформировались характерные схемы общего расположения с кормовым размещением машинного отделения, многократно возросли размеры и грузоемкости судов, увеличились коэффициенты полноты, стали широко применяться носовые бульбы, были существенно оптимизированы формы обводов и снижены расходы топлива.

Значительные изменения затронули конструкционные материалы, судовое оборудование и системы различного назначения. Морская и береговая логистика стали тесно увязаны в единую интермодальную цепочку, которая накладывает дополнительные проектные ограничения на судно и на этапе проектирования, и в ходе эксплуатации. Наиболее ярко это проявилось в масштабной контейнеризации перевозок сухих грузов. В целом можно сказать, что принципиальный проектный облик современных транспортных судов практически всех типов (танкеры, газовозы, универсальные сухогрузы, контейнеровозы и мн. др.) окончательно сформировался к концу 1990-х – началу 2000-х гг. В дальнейшие годы развитие происходило главным образом за счет увеличения размеров, перехода на новые виды топлива (преимущественно СПГ) и исследования различных решений для повышения энергетической эффективности (кайтовые и роторные паруса, солнечные батареи и т.п.) [24]. Современная проблематика проектирования находится в основном в области анализа влияния этих аспектов на архитектурно-конструктивный тип и характер эксплуатации сложившихся ранее типов судов.

3. СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В 1990-х гг., одновременно с внедрением технологий объектно-ориентированного программирования (ООП) [25], ростом вычислительных возможностей компьютерной техники, появлением графических пользовательских интерфейсов, зарождаются тяжелые судостроительные САПР, а сам процесс проектирования постепенно переходит в цифровую форму. С одной стороны, происходит автоматизация и компьютеризация рутинных процессов проектирования [26], а с другой — многие приближенные аналитические методики, применявшиеся до этого на ранних этапах, перестают быть безальтернативными и зачастую заменяются прямым расчетом или численным моделированием. Это позволило, по утверждению акад. В.М. Пашина, «резко уменьшить зависимость от прототипов и статистических формул» [1]. В области концептуального проектирования судов начинается этап, названный в [3] «системотехническим», поскольку он предполагает рассмотрение судна как сложной технической системы, включающей различные подсистемы и функционирующей во внешней среде [27]. Под внешней средой понимается все многообразие технических, экономических, социальных и природных систем, с которыми взаимодействует проектируемое судно [28]. Таким образом, основным отличием системотехнического подхода от оптимизационного является выход за рамки конкретной аналитической постановки оптимизационной задачи и многократное увеличение количества информации и числа учитываемых факторов.

Начиная с 1990-х гг. в связи с объективными геополитическими причинами отечественная школа проектирования судов приобретает инертный характер [29], а основные методические разработки создаются за рубежом. Интересно отметить, что практически все новые идеи зарубежных авторов обсуждались в ходе международных конференций IMDC (International Marine Design Conference), по материалам которых можно достаточно подробно проследить ход мысли проектантов с момента первой конференции в 1982 г. и до настоящего времени [30].

Однако стоит сказать, что в 1990-х и первой половине 2000-х гг. во всем мире наблюдался определенный спад темпов развития методологии раннего проектирования, что обусловлено, на наш взгляд, глубоким изменением требований к специалисту-проектанту. Если до этого основная квалификация такого специалиста лежала в области судостроительных дисциплин и классической математики, то по мере компьютеризации процесса проектирования стала возникать острая необходимость в понимании не только технологий программной реализации простых инженерных приложений, но и новых математических методов, принципов ООП и архитектуры программных решений [31]. Поэтому основное развитие в период 1990-х гг. приходится на тяжелые судостроительные САПР (CAD/CAM/CAE-системы), создаваемые специализированными ИТ-компаниями на стыке программной разработки и судостроительных дисциплин. Основной задачей САПР-систем с момента их появления и до нынешнего времени является сопровождение детальных этапов проектирования (техно-рабочий и рабочий), поскольку именно они являются наиболее трудоемкими и для них компьютеризация позволяет добиться наибольшего экономического эффекта. При этом в 1990-х гг. задачи концептуального проектирования продолжали решаться в основном с использованием созданных ранее подходов, но с применением новых компьютерных инструментов.

К 2010-м гг. происходит накопление «критической массы» развития прикладных программных технологий и одновременное ознакомление с ними судостроительного сообщества. Появляется целый ряд новых подходов к проектированию, основанных на системотехнических принципах, реализация которых была бы невозможна без использования цифровых технологий. Происходит разделение обобщенного теорети-

ческого системотехнического подхода (system-based design) на различные прикладные разновидности, в рамках каждой из которых акцент ставится на той или иной составляющей судна или окружающей его внешней среды. Например, выделяются цель-ориентированный (goal-based design) [32], риск-ориентированный (risk-based design) [33, 34] и миссия-ориентированный (mission-based design) [35] подходы. Всех их объединяет та или иная степень учета морской транспортной системы, в составе которой работает судно, однако в некоторых случаях на этой составляющей делается особый акцент. В частности, в [36] изложена концепция логистически-ориентированного (logistics-based) подхода, призванного наладить взаимодействие между традиционно различными взглядами на судно со стороны условного «логиста» и условного «проектанта», в том числе при проектировании судов для работы в интермодальной транспортной системе [37]. Концепция междисциплинарного подхода, объединяющего проектный анализ и имитационное транспортно-логистическое моделирование работы судна во льдах, предложена в [38]. Примеры реализации этой концепции в рамках прикладных исследовательских проектов можно найти в [39] и [40].

Одной из основных особенностей прикладных моделей системотехнического типа является использование вариантного поиска наилучшего решения вместо формальной математической оптимизации в аналитическом пространстве, типичной для предыдущего этапа. Это обусловлено, на наш взгляд, двумя основными причинами. Во-первых, высокая вычислительная сложность проектных моделей судов и моделей их эксплуатации во внешней среде, обусловленная стремлением учесть множество факторов, затрудняет нахождение формального оптимума за разумное время. Во-вторых, отмеченные выше результаты оптимизационного этапа существенно ограничили возможность дальнейшего использования аналитических оптимизационных моделей из-за того, что процесс формальной оптимизации основных проектных характеристик судна оказался стеснен (1) ограничениями на габариты судов (образовались стандартные типоразмеры, такие как Handysize, Panamax, Aframax и др.), (2) размерами товарной партии перевозимого груза, на которую стала ориентироваться береговая часть логистической цепочки (например, европейская портовая инфраструктура СПГ ориентирована на единичную партию в размере 150 — 170 тыс. м³), (3) нецелесообразностью снижения скорости хода ниже экономичной (10 — 12 уз) и (4) традиционными сроками доставки грузов, которые ограничили возможности изменения проектных скоростей хода. В результате, в большинстве случаев предпочтительными оказываются либо граничные, либо логистически обусловленные значения основных проектных характеристик судна. В этих условиях оказывается оправданной вариантная оптимизация, подразумевающая фиксацию большинства основных параметров судна вблизи их оптимальных значений и детальное рассмотрение интересующих заказчика локальных опций. Например, типа пропульсивной установки, ледового класса, альтернативных решений в области энергоэффективности и т.п. Также стоит отметить, что на практике вариантная оптимизация, как правило, приобретает аспектно-ориентированный характер, то есть подразумевает детальное рассмотрение только одного или нескольких качеств судна.

Особое распространение системотехнический подход получает при проектировании либо нетипичных, либо относительно немногочисленных судов, таких как транспортные суда ледового плавания [41], суда смешанного река-море плавания [34], суда обеспечения буровых платформ [42, 43], суда для обслуживания морских ветрогенераторов [44], добычные суда [45]. Возможности оптимизации таких судов наиболее широки, чего нельзя сказать о традиционных и массовых транспортных судах, таких как нефтеналивные суда, балкеры, газовозы СПГ, контейнеровозы и некоторые другие.

С точки зрения прикладного проектирования на системотехническом этапе происходят существенные изменения, обусловленные новыми возможностями компьютерных технологий. Например, при конфигурировании судна и оптимизации общего расположения применяется метод, основанный на функциональных блоках (design building block approach) [46], при котором основные судовые помещения и отсеки представляются в виде отдельных программных сущностей. На методическом уровне звучит критика традиционных методов последовательных приближений на основе «спирали проектирования», высказываются идеи по их замещению методами прямого расчета [47]. Принципы цель-ориентированного подхода используются при анализе аварийной остойчивости [48, 49], параметрическом проектировании конструкций [50], оптимизации обводов корпуса и решении других прикладных задач. В области нормативного регулирования наблюдается тенденция отхода от проектирования, основанного на предписывающих детерминированных правилах, и замещение их оптимизацией судна под конкретные задачи эксплуатации [51], что призвано расширить пространство для поиска инновационных решений, однако значительно повышает требования к квалификации проектанта.

Выполнение практических расчетов становится практически невозможным без применения специализированных программных решений, которые охватывают множество областей, таких как расчет размеров конструкций, определение посадки и остойчивости, оценка сопротивления, проектирование гребных винтов и др. Соответствующие решения могут быть интегрированными в судостроительные САПР,

а могут существовать в виде отдельных приложений с собственным программным интерфейсом, что позволяет использовать их при создании проектных моделей.

Характерным примером в области прикладной реализации системотехнических принципов является проект HoliShip [52], который был нацелен на создание и практическую реализацию нового целостного подхода к проектированию (holistic approach) и разрабатывался при участии 40 крупных компаний-производителей программных решений для судостроения. Методическая суть этого подхода заключается в отказе от использования традиционной спирали проектирования (на каждом витке которой отсеивается множество возможных вариантов и оставляется только один), параллельном выполнении проектных расчетов с генерацией сотен возможных вариантов судна и последующем анализе и выборе лучшего. Практика проектирования судна на основе этого подхода подразумевает интеграцию в единый вычислительный процесс целого ряда уже существующих решений, таких как CAESES (параметрическое моделирование), NAPA (общее проектирование), Poseidon (проектирование конструкций), ShipFlow (численная гидродинамика) и др.

4. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В табл. 1 кратко обобщены описанные выше подходы к проектированию судна и указаны их основные особенности. При рассмотрении этой таблицы следует учитывать несколько деталей.

Таблица 1

Описание принципиальных подходов к проектированию судов на ранних стадиях

Подход	Формулировка задачи проектирования	Основные технологии проектного анализа
Аналитический (до 1960-х)	Найти такие значения параметров судна, чтобы его интегральные характеристики соответствовали требованиям технического задания и удовлетворяли различным общесудовым ограничениям (остойчивость, непотопляемость, технологичность и др.)	<ul style="list-style-type: none"> последовательные приближения; спираль проектирования; пересчет с известного прототипа; перестроение теоретического чертежа; аналитические уравнения нагрузок масс, вместимости, остойчивости и др.; чертежно-графическое представление судна
Оптимизационный (1970 — 1990)	Найти наилучшие параметры судна с точки зрения критерия оптимизационной задачи, которая может охватывать судно в целом (общее расположение, главные размерения, коэффициенты полноты и др.), его отдельные составляющие (конструкция корпуса, гребной винт, форма обводов и т.п.) или же всю МТС, в составе которой это судно работает (поиск оптимальной скорости и грузоемкости)	<ul style="list-style-type: none"> внутренняя и внешняя задачи проектирования; моделирование работы флота на линиях перевозок; регрессионные модели в прикладных судостроительных расчетах; специализированные аналитические параметрические модели корпуса судна; оптимизация характеристик судна и МТС в аналитическом пространстве (математическое программирование, дискретная комбинаторная оптимизация); функциональное программирование
Системотехнический (1990 — н.в.)	Определить наилучшие характеристики судна, выходя за узкие рамки конкретной постановки оптимизационной задачи и рассматривая судно как сложную техническую систему во всем множестве ее возможных проявлений и в контексте функциональной роли судна во внешней среде, которая, в свою очередь, объединяет все внешние по отношению к судну системы технического, экономического и природного характера.	<ul style="list-style-type: none"> вариантная оптимизация; компьютерные технологии во всех аспектах проектирования судна; акцент на отдельных аспектах судна и МТС (цель-, риск- и миссия-ориентированный подходы); концепция прямого расчета, численные методы; параметрическое описание корпуса на основе универсальных NURBS-моделей; объектно-ориентированный подход в общей компоновке судна; детализированные процессные модели работы судна во внешней среде (дискретно-событийные и агентные имитационные модели)

Во-первых, в области проектирования (как и в любой другой технической сфере) со временем происходит не только разработка новых технологий, но и потеря старых. Действительно, быстрые изменения компьютерной техники и совершенствование программного обеспечения, смена поколений исследователей и стремление молодых проектантов следовать за новыми трендами — все это приводит к тому, что восстановление старых технологий в их первоначальном виде становится практически невозможным, несмотря на наличие книг, статей и технических отчетов. В частности, по этой причине в настоящее время в

отечественной практике практически не используются подходы некогда мощной школы оптимизационного проектирования и согласованной оптимизации судовых подсистем, основные положения которой представлены в работах [10, 13, 14] и ряде других.

Во-вторых, несмотря на указанные в табл. 1 временные рамки и характерные технологии, каждый из подходов продолжает использоваться и эволюционировать. Например, практически ни одна современная проектная модель не обходится без расчетных методик аналитического типа для оценки составляющих нагрузки масс [53], а технологии пересчета с прототипа по-прежнему применяются в расчетах сопротивления воды движению судна [16]. Оптимизационные подходы широко распространены в проектировании геометрии обводов и движителей. Также существует целый класс методов для итеративной оптимизации общего расположения судна [54] с применением целочисленного программирования и имитационного моделирования движения персонала и пассажиров. Отдельной большой областью применения системотехнического подхода является создание новых энергоэффективных судов [24].

5. ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Изложенная логика совместного развития компьютерных технологий и методов проектного анализа позволяет предположить наиболее вероятные пути дальнейшего развития теории и практики раннего проектирования судов.

По нашему мнению, следующим знаковым технологическим этапом, безусловно, станет проектирование с использованием генеративного искусственного интеллекта (ИИ) (generative artificial intelligence) и больших языковых моделей (large language model) — технологий, которые сейчас переживают этап взрывного роста [55]. Подобные модели могут применяться в роли ассистента специалиста-проектанта, который имеет не только искусственное эвристическое мышление, но и большие вычислительные возможности благодаря подключению к расчетным модулям проектной модели судна. Подобно тому, как появление ООП сделало возможным практическую реализацию теоретических принципов системотехнического подхода, так и появление прикладного ИИ должно открыть новые возможности в области всестороннего проектного анализа в условиях все возрастающего количества подлежащих учету факторов, процессов и данных.

Однако в настоящее время ИИ-модели используются главным образом как алгоритмы для проектирования и оптимизации отдельных аспектов, например формы корпуса судна с точки зрения сопротивления на чистой воде [56, 57]. Поэтому, несмотря на возможную революционность этого направления и потенциал кардинального изменения взаимодействия человека-проектанта с компьютером [58], текущий уровень развития не позволяет делать какие-либо уверенные выводы или обобщения об облике такого «ИИ-проектанта» в инженерных областях. Кроме того, в настоящее время имеются некоторые системные проблемы ИИ-моделей, например склонность к «галлюцинированию», которая может не только вводить в заблуждение, но и создавать риски для отслеживания строгого и однозначного соответствия проекта различным правилам и нормам. Тем не менее можно уверенно говорить о том, что работы по созданию инженерных ИИ-ассистентов активно ведутся [59]. Вероятно, подобные решения сначала появятся в более массовых технических областях [60], а затем и в судостроении.

Важным этапом на пути дальнейшего внедрения ИИ в практику общего проектирования является создание цифрового двойника (или цифровой модели) проекта судна [61] — сущности, которая позволяет ИИ-системе однозначно и с высокой степенью точности отслеживать влияние изменений характеристик судна на его многочисленные проектные показатели. Дело в том, что для функционирования ИИ необходима цифровая виртуальная среда, моделирующая реальность. Цифровой двойник (ЦД) призван стать таким своеобразным виртуальным макетом проекта, допускающим произвольные изменения различных характеристик и отображающим результирующие показатели по известному принципу «что будет, если...?» [62]. Помимо потенциала дальнейшей интеграции с ИИ-моделями, на первоначальных этапах реализации ЦД управление им может быть ориентировано на человека-пользователя, что также имеет существенную практическую ценность и представляет собой отдельную методическую задачу. Обсуждению проблематики создания подобных прикладных моделей планируется посвятить отдельную статью.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе концептуального проектирования отечественные судостроители привыкли двигаться в пространстве проектных решений преимущественно «на ощупь», ориентируясь на собственный опыт, доступные прототипы, качественные закономерности и используя для получения количественных оценок приближенные соотношения или простые аналитические модели. Вследствие высокой трудоемкости САПР-ориентированных проектных проработок, подробное рассмотрение на концептуальной стадии стало возможным буквально для одного-двух выбранных вариантов судна. Если добавить к этому характерную для России относительно невысокую интенсивность проектирования крупных гражданских судов, то можно получить картину потери интереса индустрии к концептуальному проектированию и вытекающее отсюда стремление проектантов копировать зарубежные решения. В результате отечественная школа исследовательского проектирования гражданских судов впала в своеобразную автаркию, свелась к господству качественных экспертно-аналитических методов, преподаванию классических подходов и решению учебно-квалификационных задач. Выходом из этой ситуации, на наш взгляд, может стать акцент на создании прикладных проектных решений, направленных на поддержку прикладного исследовательского и концептуального проектирования судна, описанию которых посвящен раздел 3 настоящей работы. Однако следует признать, что движение по этому пути затруднено по нескольким причинам.

Препятствием организационно-экономического характера является то, что из-за относительно низкой стоимости ранних стадий проектирования [63] экономическим агентам (в первую очередь конструкторским бюро) становится невыгодно, а иногда и невозможно уделять таким проработкам значительное внимание. По объективным причинам наибольший интерес для конструкторских бюро представляют этапы детального проектирования, которые позволяют загрузить работой и обеспечить заработной платой достаточно большой коллектив специалистов.

Другой сдерживающий фактор имеет исторические корни. Дело в том, что отечественные проектанты привыкли создавать судно, не выходя за пределы требований технического задания, то есть следуя идее разделения судна и внешней среды, на основе которой еще в 1940 — 1960-х гг. строилась методология аналитического подхода. Проектант всегда интуитивно стремится узнать, какое судно нужно заказчику, и по возможности избежать сложной и требующей специальных компетенций работы над формированием рациональных требований к судну. Исторические причины этого хорошо иллюстрирует пример из советских времен, когда существовало два отдельных ведомства: Министерство морского флота (Минморфлот) и Министерство судостроительной промышленности (Минсудпром). Первое отвечало за формирование технических требований к судну (т.е. требований ТЗ) и его технико-экономическое обоснование, а второе — за реализацию данного судна согласно утвержденным требованиям. В текущих условиях такой подход оказывается нереализуем, поскольку системообразующие государственные структуры, функционально подобные Минморфлоту, отсутствуют. Заказчик же в большинстве случаев не может заниматься всесторонним поиском наилучшего решения, предпочитая ориентироваться на существующие проекты или мнения отдельных экспертов.

Существуют и трудности технического характера, такие как высокая сложность реализации проектных моделей из-за их многовариантности и насыщенности прикладными алгоритмами. При этом следует признать, что дополнительным фактором, сдерживающим выполнение соответствующих проектно-программных проработок, является ограниченность знаний отечественных проектантов в области компьютерных технологий. В особенности это характерно для сферы прикладного искусственного интеллекта [64].

Отмеченные негативные тенденции могут быть преодолены при наличии соответствующей отраслевой политики целенаправленного развития технологий проектного анализа. Выполненный выше обзор позволяет заключить, что дальнейшее развитие теории проектирования судов фактически невозможно без применения информационных и программных технологий, а также специализированных судостроительных программных решений. Другими словами, без тесной интеграции с ИТ-индустрией создание современных прикладных инструментов проектного анализа оказывается практически невозможным, а значит, невозможно и развитие теории проектирования, которая всегда имела прикладной характер и в значительной степени не столько создавала новые технологии, сколько использовала существующие.

В качестве наиболее интересных примеров для дальнейшего изучения, которые содержат множество методических и технических идей, можно рекомендовать проект HoliShip [52] и систему NAPA. Проект HoliShip, о котором имеется множество открытых публикаций, наиболее интересен в методическом смысле, а система NAPA представляет, на наш взгляд, главным образом технический интерес, поскольку содержит не только блоки концептуального проектирования судов, но и модели оперативного управления и оптимизации работы флота.

Дальнейшее развитие технологий цифрового дублирования и цифровых двойников проектируемого судна может стать одним из дополнительных направлений развития проектного анализа судов. В этой области имеется целый комплекс как теоретических, так и прикладных вопросов, однако эта тема заслуживает отдельного рассмотрения в дальнейшем.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своим коллегам из ООО «Бюро Гиперборей» за ценные комментарии и рекомендации по тексту настоящей работы. Особую благодарность выражаем Александру Алексеевичу Кондратенко, научному сотруднику Технического университета Софии (Болгария), за компетентные замечания и полезные ссылки по вопросам современного развития теории проектирования судов, а также Александру Сергеевичу Буянову, заместителю генерального директора АО «ЦНИИМФ», за описание опыта межведомственной кооперации при проектировании судов в советский период.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве», <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашин В.М. Еще раз о роли и задачах теории проектирования судов / В.М. Пашин // Судостроение. — 2012. — № 2. — С. 9 — 12.
2. Петров А.С. К 2027 году у судостроителей должна появиться российская САПР / А.С. Петров // Корабел.ру. — 2023. — № 3. — С. 112 — 121.
3. Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем / А.И. Гайкович. — СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001. — 432 с.
4. Ашик В.В. Проектирование судов / В.В. Ашик. — Л.: Судостроение, 1985. — 320 с.
5. Evans J.H. Basic design concepts / J.H. Evans // Journal of the American Society of Naval Engineers. — 1959. — Vol. 71, Issue 4. — P. 671 — 678. — DOI 10.1111/j.1559-3584.1959.tb01836.x.
6. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских грузовых судов / В.И. Краев, О.К. Ступин, Э.Л. Лимонов. — Л.: Судостроение, 1973. — 296 с.
7. Ногид Л.М. Теория проектирования судов / Л.М. Ногид. — Л.: Судпромгиз, 1955. — 480 с.
8. Schneekluth H. Ship design for efficiency and economy. 2nd ed. / H. Schneekluth, V. Bertram. — Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 1998. — 240 p.
9. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1 / D.G.M. Watson. — Amsterdam; New York: Elsevier, 1998. — 566 p.
10. Пашин В.М. Оптимизация судов / В.М. Пашин. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.
11. Everett J.L. Optimization of a fleet of large tankers and bulkers: A linear programming approach / J.L. Everett, A.C. Hax, V.A. Lewinson, D. Nudds // Marine Technology SNAME. — 1972. — No. 9. — P. 430 — 438. — DOI 10.5957/mtl.1972.9.4.430.
12. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов / В.И. Краев. — Л.: Судостроение, 1981. — 280 с.
13. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов / В.П. Соколов. — Л.: Судостроение, 1987. — 164 с.
14. Гайкович А.И. Применение современных математических методов в проектировании судов: уч. пос. / А.И. Гайкович. — Л.: Изд-во ЛКИ, 1982. — 89 с.
15. Christiansen M. Chapter 4. Maritime transportation / M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen, D. Ronen // Handbooks in Operations Research and Management Science / C. Barnhart, G. Laporte (eds.). — Elsevier, 2007. — Vol. 14. — P. 189 — 284. — DOI 10.1016/S0927-0507(06)14004-9.
16. Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я.И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 764 с.
17. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data / J. Holtrop // International Shipbuilding Progress. — 1984. — Vol. 31. — P. 272 — 276.
18. Цой Л.Г. Формула для определения ледопроеходимости и рекомендации по выбору формы обводов корпуса ледоколов и транспортных судов ледового плавания / Л.Г. Цой // Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходные и ледовые качества: сб. науч. тр. ЦНИИМФ. — М.: Транспорт, 1990. — С. 141 — 144.
19. Богданов А.А. Современные методы построения и согласования теоретического чертежа корпуса судна с помощью ЭВМ / А.А. Богданов // Судостроение за рубежом. — 1972. — № 8. — С. 18 — 31.
20. Lackenby H. On the systematic geometrical variation of ship forms / H. Lackenby // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. — 1950. — Vol. 92. — P. 289 — 315.
21. Ковалев В.А. Новые методы автоматизации проектирования судовой поверхности / В.А. Ковалев. — Л.: Судостроение, 1982. — 212 с.
22. Piegls L. The NURBS Book. 2nd ed. / L. Piegls, W. Tiller. — New York: Springer-Verlag, 1997. — 646 p. — DOI 10.1007/978-3-642-59223-2.
23. Percival S. Hydrodynamic optimization of ship hull forms / S. Percival, D. Hendrix, F. Noblesse // Applied Ocean Research. — 2001. — Vol. 23, No. 6. — P. 337 — 355. — DOI 10.1016/S0141-1187(02)00002-0.
24. Kondratenko A.A. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting / A.A. Kondratenko, M. Zhang, S. Tavakoli, E. Altarriba et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2025. — Vol. 121. — P. 115430. — DOI 10.1016/j.rser.2025.115430.
25. Вайсфельд М. Объектно-ориентированное мышление / М. Вайсфельд. — СПб.: Питер, 2014. — 304 с.

26. Вashedченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов: уч. пос. / А.Н. Вashedченко. — Л.: Судостроение, 1985. — 164 с.
27. Gaspar H.M. Handling complexity aspects in conceptual ship design / H.M. Gaspar, A.M. Ross, D.H. Rhodes, S.O. Erikstad // Proceedings of the 11th International Maritime Design Conference (IMDC-2012). Glasgow, UK, June 2012. — 14 p.
28. Andrews D.A. A comprehensive methodology for the design of ships (and other complex systems) / D.A. Andrews // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1998. — Vol. 454, No. 1998. — P. 187 — 211. — DOI 10.1098/rspa.1998.0154.
29. Пашин В.М. Роль науки в организации и становлении российского судостроения на современном этапе / В.М. Пашин // Судостроение. — 2007. — № 6 (775). — С. 3 — 6.
30. Papanikolaou A. Ship design in the era of digital transition / A. Papanikolaou, S. Harries, E. Boulougouris, S.O. Erikstad et al. // International Marine Design Conference (IMDC-2024). Amsterdam, Netherlands. June 2024. — 40 p. — DOI 10.59490/imdc.2024.784.
31. Волков В.В. Концепция объектно-ориентированного подхода к автоматизации исследовательского проектирования / В.В. Волков, С.А. Мешков, А.Т. Норов // Программные продукты и системы. — 1996. — № 1. — С. 19 — 23.
32. Kujala P. Goal-based ship design towards safe and sustainable shipping in ice-covered waters / P. Kujala, M. Bergström, S. Hirdaris // Transportation Research Procedia. — 2023. — Vol. 72. — P. 3956 — 3963. — DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.484.
33. Risk-based ship design: Methods, tools and applications / A. Papanikolaou (ed.). — Springer, 2009. — 379 p. — DOI 10.1007/978-3-540-89042-3.
34. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска / Г.В. Егоров. — СПб.: Судостроение, 2007. — 384 с.
35. Choi M. Mission based ship design under uncertain Arctic Sea ice conditions / M. Choi, S.O. Erikstad, S. Ehlers // Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-2015). St. John's, Newfoundland, Canada. May 31 — June 5, 2015. — DOI 10.1115/OMAE2015-41743.
36. Brett P.O. A methodology for logistics-based ship design / P.O. Brett, E. Boulougouris, R. Horgen, D. Konovessis et al. // Proceedings of 9th International Marine Design Conference (IMDC-2006). Ann Arbor, Michigan, USA, 16 — 19 May 2006.
37. Gkochari C.C. Optimization of ship design within an integrated multimodal transport system / C.C. Gkochari, A. Papanikolaou // Journal of Ship Production and Design. — 2010. — Vol. 26, No. 1. — P. 47 — 59. — DOI 10.5957/jspd.2010.26.1.47.
38. Таровик О.В. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев, А.А. Кондратенко // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 86 — 101.
39. Таровик О.В. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев, А.А. Кондратенко и др. // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 86 — 103.
40. Буянов А.С. Моделирование системы транспортно-логистического обеспечения месторождений Обской и Тазовской губ / А.С. Буянов, О.В. Таровик, А.Б. Крестьянцев, А.Г. Топаж и др. // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. — 2022. — № 2 (122). — С. 70 — 78.
41. Bergström M. Assessment of the applicability of goal- and risk-based design on Arctic sea transport systems / M. Bergström, S.O. Erikstad, S. Ehlers // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 128. — P. 183 — 198. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.10.040.
42. Erikstad S.O. System based design of offshore support vessels / S.O. Erikstad, K. Levander // Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC-2012). Glasgow, UK, June 2012. — 14 p.
43. Кондратенко А.А., Таровик О.В. Проектирование арктических судов снабжения с учетом структуры грузопотока транспортной системы / А.А. Кондратенко, О.В. Таровик // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 80 — 96. — DOI 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96.
44. Nykiel D. A sustainability-driven approach to early-stage offshore vessel design: A case study on wind farm installation vessels / D. Nykiel, A. Zmuda, T. Abramowski // Sustainability. — 2025. — Vol. 17, Issue 6. — P. 2752. — DOI 10.3390/su17062752.
45. Solheim A.V. System-based ship design of a deep-sea mining vessel / A.V. Solheim, B.R. Groven, J.M. Røsbjerg, A. Wigdahl et al. // Ship Technology Research. — 2024. — 15 p. — DOI 10.1080/09377255.2024.2396197.
46. Bole M. Early stage integrated parametric ship design / M. Bole, C. Forrest // Proceedings of 2nd International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS). — 2005. — P. 447 — 460.
47. Pawling R.G. A study into the validity of the ship design spiral in early stage ship design / R.G. Pawling, V. Percival, D.J. Andrews // Journal of Ship Production and Design. — 2017. — Vol. 33, Issue 2. — P. 81 — 100. — DOI 10.5957/JSPD.33.2.160008.
48. Tsakalakis N. Goal-based ship subdivision and layout / N. Tsakalakis, D. Vassalos, R. Pusa // Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB-2009). St. Petersburg, June 2009. — P. 687 — 696.
49. Papanikolaou A. GOALDS — Goal Based Damage Ship Stability and Safety Standards / A. Papanikolaou, R. Hamann, B.S. Lee, C. Mains et al. // Accident Analysis and Prevention. — 2013. — Vol. 60. — P. 353 — 365. — DOI 10.1016/j.aap.2013.04.006.
50. Peschmann J. IACS common structural rules as an element of IMO goal based standards for bulk carriers and oil tankers / J. Peschmann, H. Selle, J.R. Jankowski, G.E. Horn et al. // Progress in the Analysis and Design of Marine Structures. — London: CRC Press, 2017. — DOI 10.1201/9781315157368-39.
51. Resolution MSC.287(87) — Adoption of the international goal-based ship construction standards for bulk carriers and oil tankers / IMO. 2010. [Электронный ресурс] URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287\(87\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287(87).pdf) (дата обращения 29.05.2025).
52. Papanikolaou A.D. Holistic Approach to Ship Design / A.D. Papanikolaou // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, Issue 11. — P. 1717. — DOI 10.3390/jmse10111717.
53. Papanikolaou A. Ship Design. Methodologies of Preliminary Design / A. Papanikolaou. — Springer Verlag, 2014. — 628 p. — DOI 10.1007/978-94-017-8751-2.
54. Wang Z. Interactive ship cabin layout optimization / Z. Wang, X.Q. Yang, Yu.H. Zheng, W.C. Chen et al. // Ocean Engineering. — 2023. — Vol. 270. — P. 113647. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.113647.
55. Latent space [Электронный ресурс] URL: <https://www.latent.space/p/2025-papers> (дата обращения 14.02.2025).
56. Khan S. ShipHullGAN: a generic parametric modeller for ship hull design using deep convolutional generative model / S. Khan, K. Goucher-Lambert, K. Kostas, P. Kaklis // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2023. — Vol. 411. — P. 116051. — DOI 10.1016/j.cma.2023.116051.
57. Ao Y. Artificial Intelligence design for ship structures: A variant multiple-input neural network-based ship resistance prediction / Y. Ao, Y. Li, J. Gong, S. Li // ASME. Journal of Mechanical Design. — September 2022. — Vol. 144, Issue 9. — P. 091707. — DOI 10.1115/1.4053816.
58. Furtado L.S. A task-oriented framework for generative AI in design / L.S. Furtado, J.B. Soares, V. Furtado // Journal of Creativity. — 2024. — Vol. 34, Issue 2. — DOI 10.1016/j.joc.2024.100086.

59. Onatayo D. Generative AI applications in architecture, engineering, and construction: Trends, implications for practice, education & imperatives for upskilling — A review / D. Onatayo, A. Onososen, A.O. Oyediran, H. Oyediran et al. // *Architecture*. — 2024. — Vol. 4, Issue 4. — P. 877 — 902. — DOI 10.3390/architecture4040046.
60. Requejo W.S. Fostering creativity in engineering design through constructive dialogues with generative artificial intelligence / W.S. Requejo, F.F. Martínez, C.A. Vega, R.Z. Martínez et al. // *Cell Reports Physical Science*. — 2024. — Vol. 5, Issue 9. — DOI 10.1016/j.xcrp.2024.102157.
61. Kana A.A. Application of digital twins in the design of new green transport vessels / A.A. Kana, W. Li, I. van Noesel, Y. Pang et al. // *State-of-the-Art Digital Twin Applications for Shipping Sector Decarbonization* / B. Karakostas, T. Katsoulakos (eds.). IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 161 — 191 / — DOI 10.4018/978-1-6684-9848-4.ch008.
62. Mauro F. Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review / F. Mauro, A.A. Kana // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 269. — P. 113479. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113479.
63. Michalski J.P. Parametric method of preliminary prediction of the ship building costs / J.P. Michalski // *Polish Maritime Research*. — 2004. — Special issue. — P. 16 — 19.
64. Гайкович А.И. Проблемы теории проектирования судов и ее преподавания / А.И. Гайкович // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2020. — Спец. вып. 1. — С. 137 — 141. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-137-141.

REFERENCES

1. Pashin V.M. Eshche raz o roli i zadachakh teorii proektirovaniya sudov [Once again on the role and objectives of ship design theory]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2012. No. 2. P. 9 — 12.
2. Petrov A.S. K 2027 godu u sudostroitelei dolzhna poyavit'sya rossiiskaya SAPR [Shipbuilders should have a Russian CAD system by 2027]. *Korabel.ru*. 2023. No. 3. P. 112 — 121.
3. Gaikovich A.I. Osnovy teorii proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Fundamentals of the theory of design of complex technical systems]. St. Petersburg: NITs "Morintex", 2001. 432 p.
4. Ashik V.V. Proektirovanie sudov [Ship design]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 320 p.
5. Evans J.H. Basic design concepts. *Journal of the American Society of Naval Engineers*. 1959. Vol. 71, Issue 4. P. 671 — 678. DOI 10.1111/j.1559-3584.1959.tb01836.x.
6. Kraev V.I., Stupin O.K., Limonov E.L. Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovanii morskikh gruzovykh sudov [Economic evaluation in the design of seagoing cargo ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 296 p.
7. Nogid L.M. Teoriya proektirovaniya sudov [Ship design theory]. Leningrad: Sudpromgiz, 1955. 480 p.
8. Schneekloth H., Bertram V. Ship design for efficiency and economy. 2nd ed. Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 1998. 240 p.
9. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1. Amsterdam; New York: Elsevier, 1998. 566 p.
10. Pashin V.M. Ship optimization. Leningrad: Sudostroenie, 1983. 296 p.
11. Everett J.L., Hax A.C., Lewinson V.A., Nudds D. Optimization of a fleet of large tankers and bulkers: A linear programming approach. *Marine Technology SNAME*. 1972. No. 9. P. 430 — 438. DOI 10.5957/mt1.1972.9.430.
12. Kraev V.I. Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovanii morskikh sudov [Economic evaluation in the design of sea-going ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1981. 280 p.
13. Sokolov V.P. Postanovka zadach ekonomicheskogo obosnovaniya sudov [Objective-setting in economic evaluation of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1987. 164 p.
14. Gaikovich A.I. Primenenie sovremennykh matematicheskikh metodov v proektirovanii sudov [Application of modern mathematical methods in ship design: a study guide]. Leningrad: LKI, 1982. 89 p.
15. Christiansen M., Fagerholt K., Nygreen B., Ronen D. Chapter 4. Maritime transportation. *Handbooks in Operations Research and Management Science* / C. Barnhart, G. Laporte (eds.). Elsevier, 2007. Vol. 14. P. 189 — 284. DOI 10.1016/S0927-0507(06)14004-9.
16. Spravochnik po teorii korablya: v 3 t. / pod red. Ya.I. Voikunskogo [Handbook in ship theory: in 3 vols. / Ya.I. Voikunskii (ed.)]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 764 p.
17. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. *International shipbuilding progress*. 1984. Vol. 31. P. 272 — 276.
18. Tsoi L.G. Formula dlya opredeleniya ledoprokhodimosti i rekomendatsii po vyboru formy obvodov korpusa ledokolov i transportnykh sudov ledovogo plavaniya [Formula for determining ice-breaking capability and recommendations for selecting the hull shape of icebreakers and ice transport vessels]. *Perspektivnye tipy morskikh transportnykh sudov, ikh morekhodnye i ledovye kachestva [Prospective types of marine transport ships, their seaworthiness and ice performance: Transactions of the Central Research and Design Institute of the Marine Fleet]*. Moscow: Transport, 1990. P. 141 — 144.
19. Bogdanov A.A. Sovremennye metody postroeniya i soglasovaniya teoreticheskogo chertezha korpusa sudna s pomoshch'yu EVM [Modern methods of setting off and fairing the lines drawing of a ship with the help of computers]. *Sudostroenie za rubezhom [Foreign shipbuilding]*. 1972. No. 8. P. 18 — 31.
20. Lackenby H. On the systematic geometrical variation of ship forms. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*. 1950. Vol. 92. P. 289 — 315.
21. Kovalev V.A. Novye metody avtomatizatsii proektirovaniya sudovoi poverkhnosti [New methods of automation of ship surface design]. Leningrad: Sudostroenie, 1982. 212 p.
22. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1997. 646 p. DOI 10.1007/978-3-642-59223-2.
23. Percival S., Hendrix D., Noblesse F. Hydrodynamic optimization of ship hull forms *Applied Ocean Research*. 2001. Vol. 23, No. 6. P. 337 — 355. DOI 10.1016/S0141-1187(02)00002-0.
24. Kondratenko A.A., Zhang M., Tavakoli S., Altarriba E. et al. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 212. P. 115430. DOI 10.1016/j.rser.2025.115430.
25. Weisfeld M. Ob"ektno-orientirovannoe myshlenie [Object-oriented thinking]. St. Petersburg: Piter, 2014. 304 p.
26. Vashedchenko A.N. Avtomatizirovannoe proektirovanie sudov [Computer-aided ship design: a study guide]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 164 p.
27. Gaspar H.M., Ross A.M., Rhodes D.H., Erikstad S.O. Handling complexity aspects in conceptual ship design. *Proceedings of the 11th International Maritime Design Conference (IMDC-2012)*. Glasgow, UK, June 2012. 14 p.

28. Andrews D.A. A comprehensive methodology for the design of ships (and other complex systems). *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. Vol. 454, No. 1998. P. 187 — 211. DOI 10.1098/rspa.1998.0154.
29. Pashin V.M. Rol' nauki v organizatsii i stanovlenii rossiiskogo sudostroeniya na sovremennom etape [Role of science in organization and formation of Russian shipbuilding at the present stage]. *Sudostroenie*. 2007. No. 6 (775). P. 3 — 6.
30. Papanikolaou A., Harries S., Boulougouris E., Erikstad S.O. et al. Ship design in the era of digital transition. *International Marine Design Conference (IMDC-2024)*. Amsterdam, Netherlands. June 2024. 40 p. DOI 10.59490/imdc.2024.784.
31. Volkov V.V., Meshkov S.A., Norov A.T. Kontseptsiya ob'ektno-orientirovannogo podkhoda k avtomatizatsii issledovatel'skogo proektirovaniya [The concept of object-oriented approach to automating researching design]. *Programmye produkty i sistemy [Software products and systems]*. 1996. No. 1.
32. Kujala P., Bergström M., Hirdaris S. Goal-based ship design towards safe and sustainable shipping in ice-covered waters. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3956 — 3963. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.484.
33. Risk-based ship design. Methods, tools and applications / A. Papanikolaou (ed.). Springer, 2009. 379 p. DOI 10.1007/978-3-540-89042-3.
34. Egorov G.V. Proektirovanie sudov ogranichennykh raionov plavaniya na osnovanii teorii riska [Design of restricted area ships based on risk theory]. St. Petersburg: Sudostroenie, 2007. 384 p.
35. Choi M., Erikstad S.O., Ehlers S. Mission based ship design under uncertain Arctic Sea ice conditions. *Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE-2015)*. St. John's, Newfoundland, Canada. May 31 — June 5, 2015. DOI 10.1115/OMAE2015-41743.
36. Brett P.O., Boulougouris E., Horgen R., Konovessis D. et al. A methodology for logistics-based ship design. *Proceedings of 9th International Marine Design Conference (IMDC-2006)*. Ann Arbor, Michigan, USA, 16 — 19 May 2006.
37. Gkochari C.C., Papanikolaou A. Optimization of ship design within an integrated multimodal transport system. *Journal of Ship Production and Design*. 2010. Vol. 26, No. 1. P. 47 — 59. DOI 10.5957/jspd.2010.26.1.47.
38. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. Arctic marine transport system simulation: Multidisciplinary approach fundamentals and practical experience. *Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*. 2017. No. 1 (25). P. 86 — 101. (In Russ.)
39. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. et al. Kompleksnaya imitatsionnaya model' morskoi transportno-tekhnologicheskoi sistemy platformy «Prirazlomnaya» [Integrated simulation model of the offshore transportation and technological system of the Prirazlomnaya platform]. *Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*. 2017. No. 3. P. 86 — 103.
40. Buyanov A.S., Tarovik O.V., Krest'yantsev A.B., Topazh A.G. et al. Modelirovanie sistemy transportno-logisticheskogo obespecheniya mestorozhdenii Obskoi i Tazovskoi gub [Modeling of the system of transport and logistics support for the Ob and Taz Bay fields]. *NEFTEGAZ.RU*. 2022. No. 2 (122). P. 70 — 78.
41. Bergström, M., Erikstad, S.O., Ehlers, S. Assessment of the applicability of goal- and risk-based design on Arctic sea transport systems. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 128. P. 183 — 198. DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.10.040.
42. Erikstad S.O., Levander K. System based design of offshore support vessels. *Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC-2012)*. Glasgow, UK, June 2012. 14 p.
43. Kondratenko A.A., Tarovik O.V. Proektirovanie arkticheskikh sudov snabzheniya s uchetom struktury gruzopotoka transportnoi sistemy [Design of Arctic supply vessels with respect to the cargo flow structure of the transportation system]. *Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]*. 2019. No. 2 (34). P. 80 — 96. DOI 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96.
44. Nykiel D., Zmuda D., Abramowski T. A sustainability-driven approach to early-stage offshore vessel design: A case study on wind farm installation vessels. *Sustainability*. Vol. 17, Issue 6. P. 2752. DOI 10.3390/su17062752.
45. Solheim A.V., Groven B.R., Røsbjergen J.M., Wigdahl A. et al. System-based ship design of a deep-sea mining vessel. *Ship Technology Research*. 2024. 15 p. DOI 10.1080/09377255.2024.2396197.
46. Bole M., Forrest C. Early stage integrated parametric ship design. *Proceedings of 2nd International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS)*. 2005. P. 447 — 460.
47. Pawling R.G., Percival V., Andrews D.J. A study into the validity of the ship design spiral in early stage ship design. *Journal of Ship Production and Design*. 2017. Vol. 33, Issue 2. P. 81 — 100. DOI 10.5957/JSPD.33.2.160008.
48. Tsakalakis N., Vassalos D., Pusa R. Goal-based ship subdivision and layout. *Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB-2009)*. St. Petersburg, June 2009. P. 687 — 696.
49. Papanikolaou A., Hamann R., Lee B. S., Mains C. et al. GOALDS — Goal Based Damage Ship Stability and Safety Standards. *Accident Analysis and Prevention*. 2013. Vol. 60. P. 353 — 365. DOI 10.1016/j.aap.2013.04.006.
50. Peschmann J., Selle H., Jankowski J.R., Horn G.E. et al. IACS common structural rules as an element of IMO goal based standards for bulk carriers and oil tankers. *Progress in the Analysis and Design of Marine Structures*. London: CRC Press, 2017. DOI 10.1201/9781315157368-39.
51. Resolution MSC.287(87) — Adoption of the international goal-based ship construction standards for bulk carriers and oil tankers / IMO. 2010. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287\(87\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.287(87).pdf) (accessed 29.05.2025).
52. Papanikolaou A.D. Holistic Approach to Ship Design. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, Issue 11. P. 1717. DOI 10.3390/jmse10111717.
53. Papanikolaou A. Ship Design. Methodologies of preliminary design. Springer Verlag, 2014. 628 p. DOI 10.1007/978-94-017-8751-2.
54. Wang Z., Yang X.Q., Zheng Yu.H., Chen W.C. et al. Interactive ship cabin layout optimization. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. P. 113647. DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.113647.
55. Latent space. URL: <https://www.latent.space/p/2025-papers> (accessed 14.02.2025).
56. Khan S., Goucher-Lambert K., Kostas K., Kaklis P. ShipHullGAN: a generic parametric modeller for ship hull design using deep convolutional generative model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 411. P. 116051. DOI 10.1016/j.cma.2023.116051.
57. Ao Y., Li Y., Gong J., Li S. Artificial Intelligence design for ship structures: A variant multiple-input neural network-based ship resistance prediction. *ASME Journal of Mechanical Design*. September 2022. Vol. 144, Issue 9. P. 091707. DOI 10.1115/1.4053816.
58. Furtado L.S., Soares J.B., Furtado V. A task-oriented framework for generative AI in design. *Journal of Creativity*. 2024. Vol. 34, Issue 2. DOI 10.1016/j.joc.2024.100086.
59. Onatayo D., Onososen A., Oyediran A.O., Oyediran H. et al. Generative AI applications in architecture, engineering, and construction: Trends, implications for practice, education & imperatives for upskilling — A review. *Architecture*. 2024. Vol. 4, Issue 4. P. 877 — 902. DOI 10.3390/architecture4040046.

60. Requejo W.S., Martínez F.F., Vega C.A., Martínez R.Z. et al. Fostering creativity in engineering design through constructive dialogues with generative artificial intelligence. *Cell Reports Physical Science*. 2024. Vol. 5, Issue 9. DOI 10.1016/j.xcrp.2024.102157.
61. Kana A.A., Li W., van Noesel I., Pang Y. et al. Application of digital twins in the design of new green transport vessels. *State-of-the-Art Digital Twin Applications for Shipping Sector Decarbonization* / B. Karakostas, T. Katsoulakos (eds.). IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 161 — 191. DOI 10.4018/978-1-6684-9848-4.ch008.
62. Mauro F., Kana A.A. Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 269. P. 113479. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113479.
63. Michalski J.P. Parametric method of preliminary prediction of the ship building costs. *Polish Maritime Research*. 2004. Special issue. P. 16 — 19.
64. Gaikovich A.I. Ship design theory and its teaching. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special edition 1. P. 137 — 141. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-137-141.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.12
EDN WRURVX

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМЫ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНОГО ТУРБОАГРЕГАТА АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА ПРОЕКТА 22220

В.А. Гулый, канд. техн. наук, КБ «Автоматика», 198188 Россия, Санкт-Петербург, ул. Возрождения 20А, лит. А, e-mail: gbavladimir@yandex.ru

В.В. Кондратьев, главный инженер, ФГУП «Атомфлот», 183038 Мурманск, тер. Мурманск-17, 1, e-mail: lleddokoll@gmail.com

Целью настоящей статьи является формулирование некоторых перспективных направлений развития и совершенствования системы парораспределения и силового электрогидравлического комплекса управления паровыми клапанами турбоагрегата главной паротурбинной установки ПТУ-72, устанавливаемой на ледоколы проекта 22220 и являющейся базовой для применения на перспективных ледокольных судах и плавучих атомных электростанциях.

В статье рассмотрены конструктивные особенности паровых клапанов и приводной части системы управления турбоагрегатом, которые, по мнению авторов, требуют доработки в рамках модернизации энергоустановок атомных ледоколов в течение их эксплуатации, а также требуют учета при разработке новых перспективных судовых энергоагрегатов.

Возможности совершенствования системы парораспределения рассмотрены в двух направлениях: конструкции собственно регулирующих паровых клапанов и конструкции электрогидравлического силового комплекса управления паровыми клапанами. Сформулированы следующие предложения, которые целесообразно обсудить при разработке конструкций новых паротурбинных агрегатов атомных судов:

- 1) исключить неоправданное дублирование паровых клапанов на ГТА перспективных проектов и вернуться к отработанной схеме подвода пара на турбинах атомных ледоколов предыдущего поколения;
- 2) применить неметаллические композиционные материалы в конструкции перспективных органов парораспределения турбомашин;
- 3) провести унификацию паровых клапанов регулирующего и травления, исключив из клапана травления разгрузочный клапан с заменой его каналом разгрузки и конструктивно обеспечив процесс самоустановки поршня на штоке внутри перфорированной втулки;
- 4) в перспективных проектах ледоколов — уменьшить давление рабочей среды в гидросистеме управления паровыми клапанами ГТА, что определенно снизит требования к элементам гидроуправления и позволит перейти к более простым техническим решениям с переходом на отечественные средства гидроуправления, а возможно — к электромеханическому исполнению сервоприводов управления паровыми клапанами;
- 5) изменить алгоритм управления регулирующими клапанами турбоагрегатов серийных атомных ледоколов проекта 22220, дополнив алгоритм функционалом, обеспечивающим увеличение ресурса паровых клапанов, осуществив модернизацию электронной цифровой части системы управления паровой турбиной.

Предложения по совершенствованию системы парораспределения серийных атомных ледоколов могут найти применение в проектируемых СЭУ атомного ледокола проекта 10510 «Лидер», а также в турбогенераторных установках атомных плавучих энергоблоков, где применение разгруженных паровых клапанов может открыть дорогу применению электромеханических силовых приводов паровых клапанов в турбоагрегатах с исключением из приводов гидравлических высоконапорных сред.

Ключевые слова: атомный ледокол, турбоагрегат, система парораспределения, силовой электрогидравлический комплекс управления, унификация паровых клапанов, неметаллический композиционный материал, шток клапана, перфорированная втулка, средства гидроуправления, электромеханический сервопривод, ресурс паровых клапанов.

Для цитирования: Гулый В.А. Некоторые предложения по совершенствованию системы парораспределения главного турбоагрегата атомного ледокола проекта 22220 / В.А. Гулый, В.В. Кондратьев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 137 — 147. — EDN WRURVX.

SOME SUGGESTIONS FOR IMPROVING THE STEAM DISTRIBUTION SYSTEM OF THE MAIN TURBINE UNIT OF THE NUCLEAR ICEBREAKER PROJECT 22220

V.A. Gulyi, PhD, Avtomatika Design Bureau, 198188 Russia, St. Petersburg, ul. Vozrozhdeniya 20A, lit. A, e-mail: gbavladimir@yandex.ru

V.V. Kondratiev, Chief Engineer of FSUE Atomflot, 183038 Murmansk, ter. Murmansk-17, 1, e-mail: lleddokkoll@gmail.com

The purpose of this article is to determine some prospective areas for the development and improvement of the steam distribution system and the electrohydraulic power control system for steam valves of the turbine unit of the main steam turbine unit PTU-72, installed on icebreakers of project 22220, and which is the base for use on prospective icebreaking vessels and floating nuclear power plants.

The article considers the design features of steam valves and of the drive part of the turbine control system, which, according to the authors, require further development as part of the modernization of nuclear icebreaker power plants during their operation, and also require consideration when developing new advanced marine power units.

Possible ways to improve the steam distribution system are considered in two areas: the design of control steam valves themselves and the design of electrohydraulic power complex for controlling steam valves.

The following suggestions are formulated for consideration in the design of new steam turbine units for nuclear-powered vessels:

- 1) to consider the issue of eliminating unjustified duplication of steam valves on the main turbine unit (MTU) of prospective projects and returning to the proven scheme of steam supply on turbines of nuclear icebreakers of the previous generation;
- 2) to consider the use of non-metallic composite materials in the design of prospective turbomachinery steam distribution systems;
- 3) to unify the steam control and etching valves with the exclusion of the relief valve from the etching valve, replacing it with an unloading channel, and structurally ensuring the process of self-mounting the piston on the rod inside the perforated sleeve;
- 4) in prospective icebreaker projects, to consider the possibility of reducing the pressure of the working medium in the hydraulic control system of the MTU steam valves, which will obviously reduce the requirements for hydraulic control elements and allow for simpler technical solutions with the transition to domestic hydraulic control systems, and possibly to the electromechanical design of steam valve control servos;
- 5) to change the control algorithm for control valves of turbine units of serial nuclear icebreakers of the project 22220, supplementing the algorithm with functionality that ensures an increase in the service life of steam valves by modernizing the electronic digital part of the steam turbine control system.

The proposed suggestions on improving the steam distribution system for serial nuclear icebreakers may be considerably useful in newly designed nuclear icebreaker power plants of the 10510 Leader project, as well as in turbine-generating plants of the actively developing field of nuclear floating power units.

The use of unloaded steam valves in steam distribution systems of turbogenerator installations of nuclear floating power units may pave the way for the use of electromechanical power drives of steam valves in turbine units with the exclusion of hydraulic high-pressure media from the drives.

Keywords: nuclear icebreaker, turbine unit, steam distribution system, electrohydraulic power control system, unification of steam valves, non-metallic composite material, valve stem, perforated sleeve, hydraulic controls, electromechanical servo drive, steam valve life.

For citation: Gulyi V.A., Kondratiev V.V. Some suggestions for improving the steam distribution system of the main turbine unit of the nuclear icebreaker project 22220. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 137 — 147. EDN WRURVX. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

История ледокольного флота СССР и Российской Федерации указывает на то, что длительность сроков эксплуатации атомных ледоколов может достигать нескольких десятков лет, например, ледокол «Таймыр» был принят в эксплуатацию и вошел в состав флота в 1989 г. и до настоящего времени находится в эксплуатации [1].

Следует отметить, что к моменту ввода в эксплуатацию ледоколов агрегаты и механизмы должны быть спроектированы и завершены заводскими и приемо-сдаточными испытаниями, а это означает, что технические решения, реализованные во вступивших в строй ледоколах, могут отставать по уровню от новых решений, которые находятся в непрерывном развитии.

В качестве примера можно привести разработку проекта главных турбоагрегатов ГТА-642 для атомных ледоколов типа «Арктика», которая была выполнена конструкторским бюро Ленинградского Кировского завода в период 1967 — 1973 гг. [2] и легла в основу, с относительно небольшими изменениями, изготовления и комплектации атомных ледоколов второго поколения типа «Арктика» проекта 10520.

Следует отметить, что специфика, сложность и важность гражданского атомного судостроения обусловила необходимость функционирования в составе Российского морского регистра судоходства специального структурного подразделения — Филиала РС по атомным судам, привлечь внимание которого к рассматриваемым вопросам в том числе имеет целью настоящая статья.

Турбоагрегаты атомных ледоколов «Таймыр» и «Вайгач» проекта 10580 в части систем парораспределения существенно отличаются от турбоагрегатов ГТА-642 тем, что укомплектованы паровыми клапанами с системами регулирования и защиты ГТА разработки и поставки немецких компаний Siemens и REXROTH.

После создания турбоагрегатов базового проекта 10520 ко времени начала разработки главного турбогенератора (2013 — 2014 гг.) в составе паротурбинной установки для атомных ледоколов проекта 22220 прошло более 40 лет. В рассматриваемый период в СССР произошли известные политические события, что привело к длительной приостановке поступательного развития судового энергомашиностроения.

Возобновление работ в области создания нового поколения атомных ледоколов для арктического флота Российской Федерации началось с разработки и строительства головного универсального атомного ледокола проекта 22220.

За указанный 40-летний период отсутствия новых разработок турбоагрегатов большая часть специалистов в этой области ушла по естественным причинам, не подготовив молодую смену, и работы пришлось начинать, преодолевая разрыв в научно-техническом развитии энергомашиностроения для атомных ледоколов, организуя и обучая специалистов из других отраслей.

Учитывая положительный опыт эксплуатации атомных ледоколов типа «Арктика» проекта 10520, а также ледоколов «Таймыр» и «Вайгач», в основу новой разработки системы парораспределения турбоагрегатов ледоколов проекта 22220, были заложены базовые конструктивные решения паровых клапанов ГТА-642 атомных ледоколов типа «Арктика» в симбиозе с техническими решениями гидроприводных систем Siemens и REXROTH.

К сегодняшнему дню на основе выполненных новых разработок изготовлено и прошло полный комплекс испытаний энергооборудование, комплектующее первые универсальные атомные ледоколы (УАЛ) проекта 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия», которые уже находятся в эксплуатации. Естественно, что наступило самое интересное время для разработчиков энергооборудования, когда эксплуатационная проверка принятых технических решений показывает возможные инженерные недочеты и дает основу для возвращения к естественному ходу технического развития судовых ледокольных энергоустановок.

Настоящая статья посвящена анализу и определению некоторых перспективных направлений развития и совершенствования очень важной части турбоагрегата главной паротурбинной установки ПТУ-72, устанавливаемой на ледоколы проекта 22220, а именно системы парораспределения и силового электрогидравлического комплекса управления паровыми клапанами турбины.

Проведение анализа конструкции системы парораспределения и комплекса управления клапанами сегодня особенно актуально с точки зрения оптимизации приборного состава и возможности построения комплекса с использованием отечественных комплектующих изделий.

На рис. 1 представлен общий вид паротурбинного агрегата одного борта атомного ледокола проекта 22220 с выделенным фрагментом, касающимся гидроприводной части паровых регулирующих клапанов паровой турбины.

Рассмотрение предложений о возможных направлениях совершенствования системы парораспределения проведем в следующей последовательности:

- 1) рассмотрение конструкции собственно регулирующих паровых клапанов;
- 2) рассмотрение конструкции электрогидравлического силового комплекса управления паровыми клапанами.

1. РАССМОТРЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОБСТВЕННО РЕГУЛИРУЮЩИХ ПАРОВЫХ КЛАПАНОВ И ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ

1.1. Единичные мощности каждого из двух турбоагрегатов составляют:

- на ледоколе проекта 10520 — 27,5 МВт;
- на ледоколе проекта 22220 — 36 МВт.

Указанные единичные мощности весьма близки, но при этом конструкции органов парораспределения ледоколов названных проектов существенно отличаются, в частности:

- на ледоколах проектов 10520 и 10580 предусмотрена подача пара в турбину через один паропровод и один регулирующий клапан, управляемый одним сервомотором с одним комплектом гидроаппаратуры;
- на ледоколе проекта 22220 предусмотрена подача пара в турбину через два паропровода, в каждом из которых установлен свой регулирующий клапан со своим сервомотором и своим комплектом гидроаппаратуры (рис. 1).

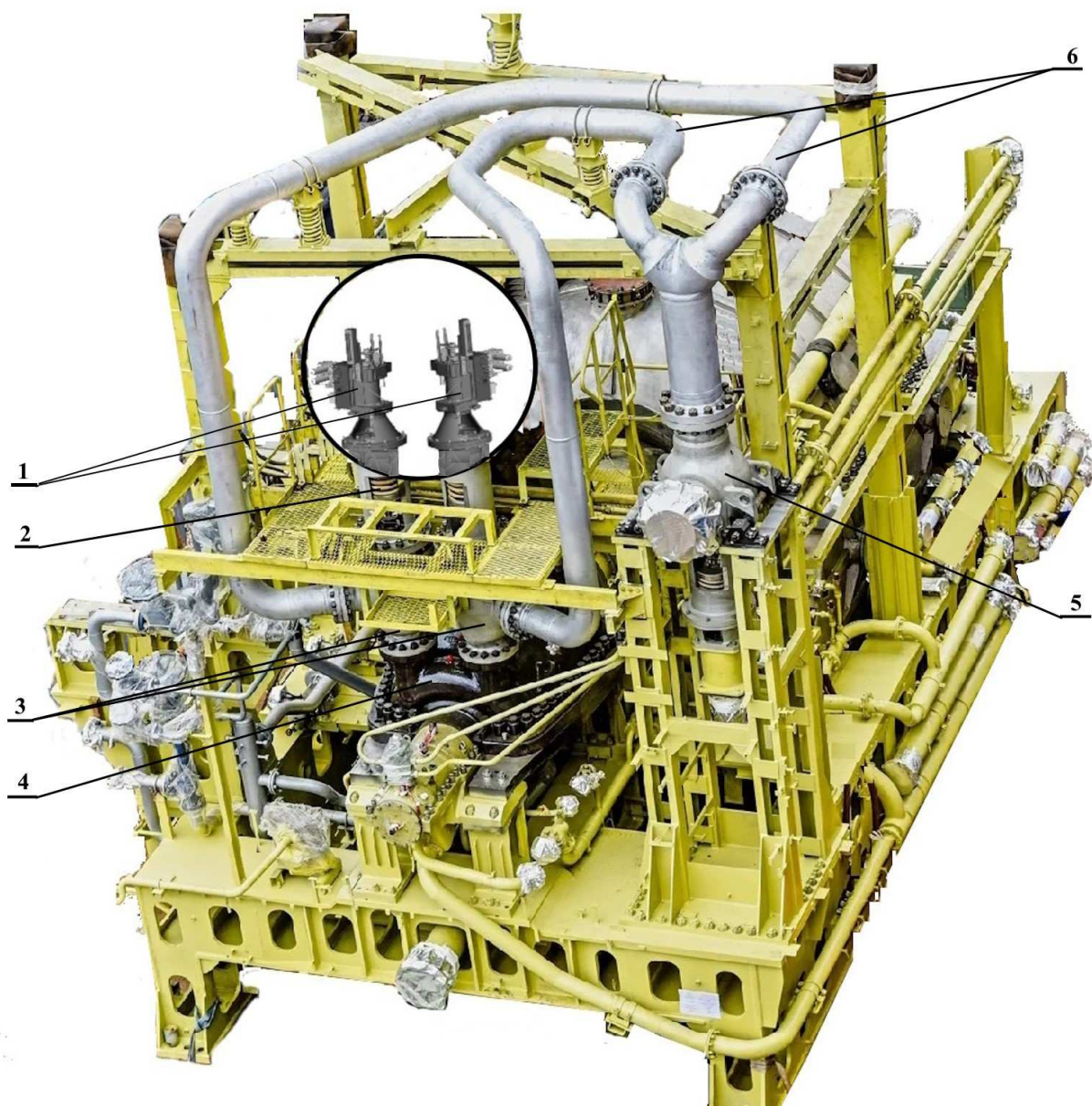


Рис. 1. Общий вид турбоагрегата а/л проекта 22220:

- 1 — гидроприводы регулирующих клапанов; 2 — пружинные блоки регулирующих клапанов;
 3 — регулирующие клапаны; 4 — верхняя половина корпуса ЦВД турбоагрегата; 5 — быстрозапорный клапан;
 6 — трубопроводы подвода пара к регуливающим клапанам

Вызывает вопрос о целесообразности применения на ГТА ледокола проекта 22220 двух подводов пара в турбину. Если разделенному подводу пара в турбину можно найти оправдание в том, что, по мнению разработчика проточной части турбины, обеспечивается большая равномерность распределения пара по лопаткам первой ступени, то напрашивается более рациональное решение двухпоточной подачи пара, но через один регулирующий клапан.

На рис. 2 представлен эскиз компоновки трубопровода подачи пара в турбину с использованием одного парового клапана. При этом очевидно, что в два раза снижается себестоимость системы подачи пара в турбину, исключая двойной комплект регулирующих клапанов 3 и гидроприводов 1 с пружинными блоками 2 (см. рис. 1).

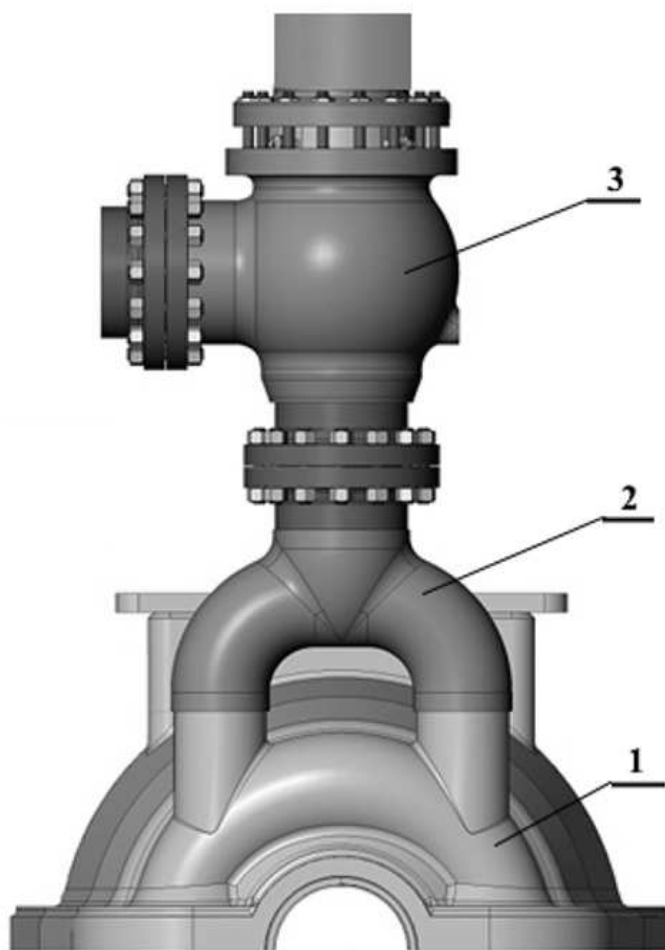


Рис. 2. Эскиз установки регулирующего клапана на верхнюю половину корпуса ЦВД:
1 — верхняя половина корпуса ЦВД турбоагрегата; 2 — двухпоточный паропровод; 3 — регулирующий клапан

Предложение 1.

Рассмотреть вопрос об исключении дублирования паровых клапанов на ГТА перспективных проектов.

1.2. Достойным внимания является техническое решение, примененное в конструкции собственно паровых частей как регулирующих клапанов ГТА, так и клапанов травления избытков пара, возникающих в различных динамических режимах управления движением ледокола.

Использование в системе парораспределения ГТА проекта 22220 перфорированных клапанов с уплотняющими поршневыми кольцами, аналогично ГТА проекту 10520, не вызывает нареканий.

Известны случаи при эксплуатации ледоколов, когда при работе уплотнительных металлических поршневых колец в трущихся металлических парах при перемещении паровых клапанов ГТА случались задиры и заклинивания клапанов.

Было бы интересным и перспективным рассмотреть применение в клапанах неметаллических композитных поршневых колец 5, находящихся в контакте со стенками перфорированных втулок 4 и направляющих втулок 3 штоков клапанов (см. рис. 3).

По опыту создания «сухих» поршневых компрессоров для работы в составе автомобильных газонаполнительных метановых компрессорных станций известно применение в цилиндропоршневых группах газовых поршневых компрессоров флуороновых уплотнений, при том что режим эксплуатации поршневых колец в цилиндрах поршневых компрессоров несравнимо более жесткий по сравнению с работой поршневых колец в регулирующих клапанах ледокольных турбоагрегатов. При разработке паровых клапанов ГТА пр. 22220 была сделана попытка заказать разработку поршневых колец из неметаллического композиционного материала BARS с рабочими температурой до 300 °С и давлением до 100,0 МПа [3] взамен металлических поршневых колец на поршне парового клапана. Однако недостаток времени и ограниченность средств не позволили решить эту задачу.

Предложение 2.

Рассмотреть вопрос применения неметаллических композиционных материалов в конструкции перспективных органов парораспределения турбомашин.

1.3. В паровых клапанах турбоагрегатов, в свое время построенных на Ленинградском Кировском заводе, в том числе ГТА-642 ледоколов типа «Арктика» проекта 10520, традиционно использовалась разгрузка клапанов для уменьшения сил отрыва клапанов от седел из полностью закрытого состояния и движения в сторону открытия.

Это, в частности, объяснялось тем, что давление рабочих сред в гидроцилиндрах управления паровыми клапанами составляло $10 - 12 \text{ кгс/см}^2$, а усилие, которое надо создавать при отрыве клапана от седла, могло составлять до $2,5 - 3 \text{ тс}$.

В паровых клапанах нового ледокола проекта 22220 традиционно предусмотрена их разгрузка, проиллюстрированная на рис. 3 [4].

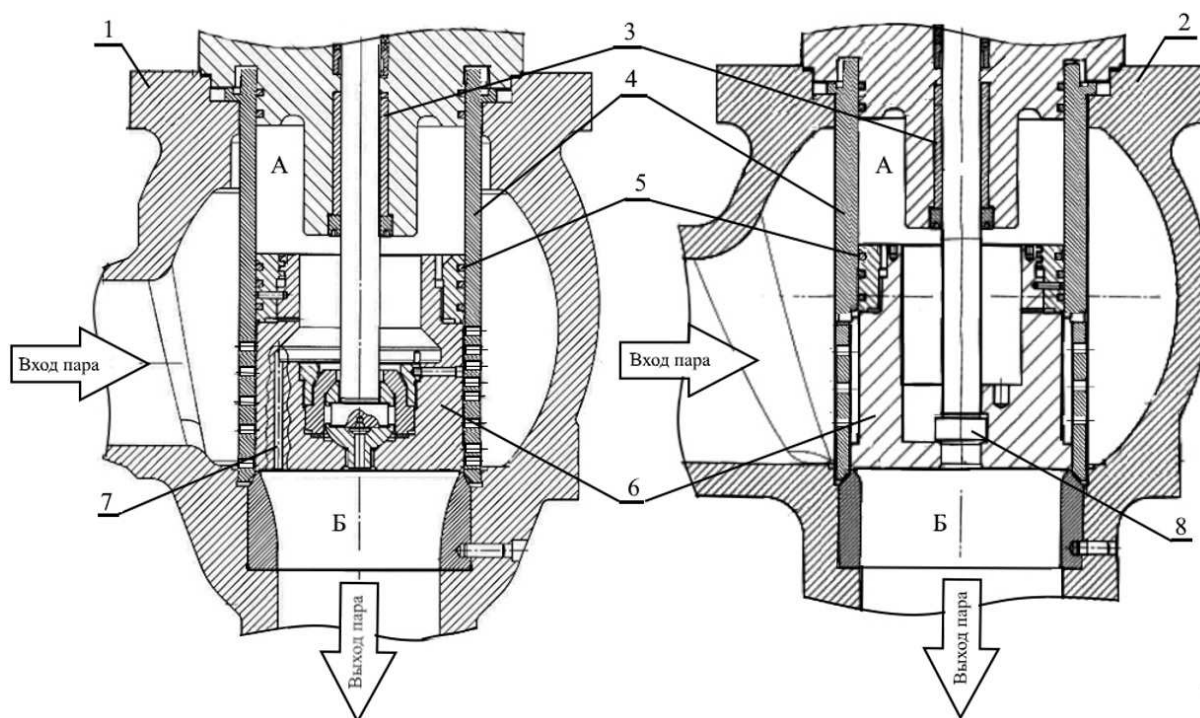


Рис. 3. Общие виды регулирующего клапана и клапана травления ГТА атомного ледокола проекта 22220:

- 1 — регулирующий клапан; 2 — клапан травления; 3 — направляющие втулки штоков;
4 — перфорированные втулки; 5 — поршневые кольца; 6 — поршни клапанов; 7 — разгрузочный паровой канал;
8 — разгрузочный паровой клапан

В клапане травления 2 разгрузка выполнена подобно использованной в ГТА-642 с наличием специального разгрузочного клапана 8, который предварительно открывается в начале (при $3 - 5 \%$ от полного открытия клапана травления) движения клапана травления в сторону открытия, что определяет своего рода «люфт» в месте сочленения штока и поршня клапана.

В регулирующем клапане 1 разгрузка предусмотрена «безлюфтовая» простым наличием канала 7, связывающего полость А перед клапаном и полость Б за клапаном, уравнивая в них давления и снижая усилие отрыва клапана от седла. Опыт эксплуатации подобного регулирующего клапана на всех ледоколах проекта 22220 подтвердил полную работоспособность клапана с разгрузочным каналом.

Из рис. 3 видно, что конструкция регулирующего клапана 1 реализует более гибкую, с элементами самоустановки, стыковку штока и поршня клапана с использованием узла с шаровидной опорой, а также обеспечивает выемку поршня 6 клапана без демонтажа перфорированной втулки 4, что существенно облегчает процесс замены поршневых колец.

Предложение 3.

Провести унификацию паровых клапанов регулирующего и травления с исключением из клапана травления разгрузочного клапана, заменив его каналом разгрузки и конструктивно обеспечив процесс самоустановки поршня на штоке внутри перфорированной втулки.

2. РАССМОТРЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СИЛОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВЫМИ КЛАПАНАМИ

2.1. На ледоколах «Таймыр» и «Вайгач», укомплектованных системой парораспределения разработки компании Siemens с гидросистемой компании REXROTH, разгрузка паровых клапанов не предусматривалась. При этом усилие на паровых клапанах при страгивании может достигать 20 тс [5].

Указанное значение силы потребовало использования в гидроприводах клапанов рабочих сред с давлением около 170 кГс/см^2 , что в ≈ 15 раз больше упомянутых давлений в гидроприводах клапанов ГТА-642.

Следует отметить, что положительный опыт длительной эксплуатации ледоколов «Таймыр» и «Вайгач» определил решение заказчика и разработчика принять на ледоколах проекта 22220 уровень давления рабочей среды в гидросистеме, а также элементную базу электро-гидроаппаратуры в номенклатуре систем компаний Siemens и REXROTH. Однако в гидросистеме управления ГТА ледокола проекта 22220 имеются существенные отличия:

1) полное дублирование гидроприводных каналов управления гидроприводами регулирующего клапана и клапана травления, где используется давление среды 170 кГс/см^2 ;

2) разделение в питающей гидростанции контуров высокого давления (170 кГс/см^2) и низкого давления (14 кГс/см^2) [6];

3) в гидроприводах регулирующего клапана и клапана травления предусмотрено устройство контроля целостности уплотнений гидроцилиндров [7];

4) использование в системе управления быстрозапорным клапаном относительно низкого давления (не более 14 кГс/см^2), что позволило в конструктивных решениях клапана и привода применить отработанную конструкцию клапана ГТА-642 ледоколов проекта 10520 [4];

5) полное дублирование насосных агрегатов питающей гидростанции;

6) учитывая, что на ледоколах проекта 22220 построена единая электроэнергетическая система с существенно более жесткими требованиями к качеству электроэнергии, с целью повышения надежности удержания частоты вращения при возможных аварийных срабатываниях защит турбогенераторов, вызывающих скачкообразную разгрузку турбин, в гидросистеме управления регулирующими клапанами ГТА а/л проекта 22220, в отличие от системы REXROTH, предусмотрен дополнительный контур [8] с дискретными гидроклапанами, обеспечивающий дополнительное закрывающее воздействие на регулирующий клапан при приближении оборотов турбины к значению срабатывания быстрозапорного клапана ГТА.

Быстродействия гидроприводов регулирующего клапана и клапана травления, измеренные в период стендовых испытаний ГТА а/л проекта 22220, составили 0,8 — 1,0 сек при перемещении клапана на полный рабочий ход с максимальной скоростью, что в 2 — 2,5 раза превышает быстродействие гидроприводов системы REXROTH [5].

В итоге имеет место некоторое завышение давлений гидравлической среды в спроектированном и серийно изготавливаемом автономном электрогидравлическом силовом комплексе управления паровыми клапанами ГТА а/л проекта 22220.

Предложение 4.

В перспективных проектах ледоколов рассмотреть возможность уменьшить давление рабочей среды в гидросистеме управления паровыми клапанами ГТА, что заметно снизит требования к элементам гидроуправления и позволит перейти к более простым техническим решениям с переходом на отечественные средства гидроуправления, а возможно — к электромеханическому исполнению сервоприводов управления паровыми клапанами.

2.2. Вернемся к критикуемому в пункте 1.1 техническому решению с двумя регулирующими клапанами, размещенными на турбине, обусловившему избыточность и неэкономичность в изготовлении силового электрогидравлического комплекса в целом.

Если уж неоправданное дублирование органов парораспределения ГТА — регулирующих паровых клапанов — на ледоколах проекта 22220 принято, то было бы целесообразно попытаться оптимизировать алгоритм их использования, а именно увеличить ресурс клапанов, в первую очередь ресурс поршневых колец и перфорированных втулок, которые постоянно находятся в соприкосновении, а при изменениях режимов работы ГТА — в движении друг относительно друга (см. рис. 3, 4-5).

Очевидно, что моторесурсы механизмов управления двумя регулирующими клапанами турбины при синхронном их движении в режимах поддержания заданной частоты вращения турбогенератора используются нерационально.

Гораздо рациональнее было бы организовать работу регулирующих клапанов таким образом, чтобы один из них на разных мощностных режимах турбины фиксировался в разных, но неподвижных положениях, а второй обеспечивал динамические режимы регулирования частоты вращения турбины, сопряженные с непрерывной отработкой изменения нагрузки турбины. По прошествии заданного временного интервала клапаны менялись бы местами с точки зрения режима работы.

Следствием указанного способа управления клапанами является условное «растягивание» суммарного ресурса регулирующих клапанов путем поочередной выработки ресурса каждого из клапанов.

Такое решение было предложено разработчиками системы управления ГТА [9], но, к сожалению, не реализовано в проекте.

На рис. 4 представлена упрощенная схема электрогидравлической системы регулирования турбогенератора, которая позволяет решить названную задачу.

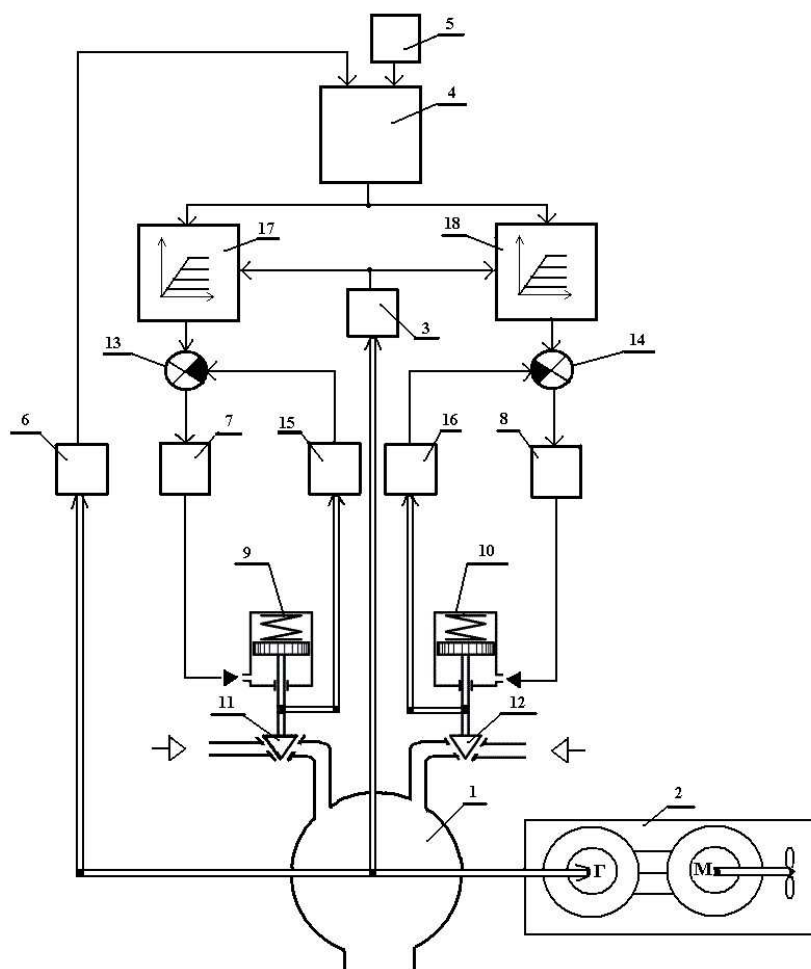


Рис. 4. Схема системы управления регулируемыми клапанами паровой турбины с двумя регулируемыми клапанами:
 1 — паровая турбина; 2 — турбогенераторная гребная электрическая установка; 3 — счетчик моторесурса турбины;
 4 — регулятор частоты вращения; 5 — задатчик частоты вращения; 6 — датчик частоты вращения;
 7 и 8 — электрогидравлические преобразователи; 9 и 10 — силовые гидроприводы; 11 и 12 — регулирующие клапаны;
 13 и 14 — сумматоры сигналов; 15 и 16 — датчики обратных связей; 17 и 18 — программируемые ограничители сигнала

В представленной схеме регулирующие клапаны перемещаются таким образом, что расходы пара через все регулирующие клапаны в сумме обеспечивают мощностной режим турбины. Управление каждым отдельным клапаном с применением своих механизмов управления осуществляют предварительно подсчитав наработку каждого из них в общей наработке турбины и после достижения заранее заданного времени наработки включают в работу последовательно каждый из механизмов управления регулируемыми клапанами турбины.

В эксплуатационном режиме турбина 1 вращает ротор генератора Г, питающего гребной электродвигатель М, приводящий во вращение гребной винт судовой гребной электрической установки 2. При отклонениях фактической частоты вращения ротора турбины 1 от заданной, сформированных сигналами от задатчика 5 и датчика 6 частоты вращения турбины, поступающими на вход регулятора 4, выходной сигнал регулятора 4 воздействует через сумматоры 13 и 14, электрогидравлические преобразователи 7 и 8 на силовые гидроприводы 9 и 10, перемещающие регулирующие клапаны 11 и 12 турбины 1 в новое положение. При этом в сумматорах 13 и 14 происходит компенсация сигналами обратных связей датчиков 15 и 16 выходных сигналов управляемых ограничителей сигналов 17 и 18.

Таким образом, каждому значению выходных сигналов ограничителей 17 и 18 в установившихся режимах работы турбины будет соответствовать определенное положение регулирующих клапанов, при этом суммарный расход пара через оба регулирующих клапана обеспечивает мощный режим турбины.

Сигналы, поступающие на управляющие входы программируемых ограничителей сигналов 17 и 18 от счетчика моторесурса 3, вызывают изменение уровней ограничения сигнала, поступающего на ограничители с выхода регулятора 4 частоты вращения ротора турбины 1.

Причем изменение уровней ограничения в программируемых ограничителях 15 и 16 происходит по-разному.

Например, в первый заранее заданный период времени эксплуатации турбины 1, отсчитываемый счетчиком 3 моторесурса турбины 1, ограничение сигнала от регулятора 4 происходит в ограничителе 17, следствием чего является некоторое прикрытие и фиксация в неподвижном состоянии регулирующего клапана 11. В этом положении обеспечивается сохранение моторесурса собственно клапана 11 и механизма управления регулирующим клапаном 11, включая гидропривод 9, что увеличивает его срок службы и, соответственно, надежность всей системы регулирования и парораспределения паровой турбины.

В рассматриваемой ситуации происходит некоторое снижение частоты вращения ротора турбины 1, уменьшается сигнал с датчика 6 частоты вращения, и регулятор 4 частоты вращения, увеличивая свой выходной сигнал, увеличивает открытие регулирующего клапана 12, выводя частоту вращения ротора турбины 1 на заданное значение, сформированное задатчиком 5.

Таким образом, произошла компенсация недостающего расхода пара через регулирующий клапан 11 за счет увеличения расхода пара через регулирующий клапан 12, который находится в работе и вырабатывает свой моторесурс. Изменение мощностного режима при этом возможно и происходит за счет перемещения только одного регулирующего клапана, а именно 12.

Далее, через заранее заданный отрезок времени, рассчитываемый по результатам счетчика моторесурса 3, в программируемом ограничителе 17 происходит программное изменение уровня ограничения, и регулирующие клапаны 11 и 12 и их гидроприводы 9 и 10 занимают новые положения при неизменном мощностном режиме турбины. При этом зона перемещений клапана 12 сдвинется, что обеспечит более равномерную выработку деталей механизма управления клапанами в местах их соприкосновения и трения.

Аналогичным образом осуществляется работа системы регулирования при включении в работу программируемого ограничителя 18. При этом происходит выработка моторесурса регулирующего клапана 11, а клапан 12 фиксируется в неподвижном состоянии, в котором экономится моторесурс клапана 12 и его механизма управления с гидроприводом 10.

Динамические изменения расходов пара в турбину производят путем воздействия на один из двух механизмов управления регулирующими клапанами: один клапан из двух удерживается в неподвижном состоянии, а второй работает, что определяет изменение во времени зон статических положений гидромеханической и паровой частей парораспределительных органов турбины, при котором более равномерно и в меньшей степени вырабатываются поверхности деталей в местах трения.

Отработка возмущений турбины в установившихся эксплуатационных режимах осуществляется поочередно одним и другим парораспределительным органом при неподвижном соседнем в соответствии с заранее заданным и запрограммированным алгоритмом в программируемых ограничителях. Такая запрограммированная во времени поочередная работа парораспределительных органов турбины позволяет увеличивать их суммарный срок службы.

Предложение 5.

Изменить алгоритм управления регулирующими клапанами турбоагрегатов серийных атомных ледоколов проекта 22220, дополнив алгоритм функционалом, обеспечивающим увеличение ресурса паровых клапанов, осуществив модернизацию электронной цифровой части системы управления техническими средствами без каких-либо изменений в гидромеханической части электрогидравлического силового комплекса управления паровыми клапанами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На сегодняшний день находятся в эксплуатации четыре атомных ледокола проекта 22220 — «Арктика», «Сибирь», «Урал» и «Якутия», закладываются следующие ледоколы этой серии. Вопросы, поднятые в статье, было бы полезным рассмотреть при формировании программы модернизации ледоколов в периоды их заводского ремонта.

2. Рассмотренные в статье предложения по совершенствованию системы парораспределения серийных атомных ледоколов могут оказаться весьма полезными для применения во вновь проектируемых энергетических установках атомного ледокола проекта 10510 «Лидер», а также в турбогенераторных установках активно развивающегося направления создания атомных плавучих энергоблоков.

3. Применение разгруженных паровых клапанов в системах парораспределения турбогенераторных установок атомных плавучих энергоблоков (после проведения измерений усилий на штоках поршней клапанов при начале их движения в сторону открытия, а также во всем эксплуатационном режиме их работы) может открыть дорогу применению электромеханических силовых приводов паровых клапанов в турбоагрегатах с исключением из приводов гидравлических высоконапорных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турбоагрегаты для атомных ледоколов и подводных лодок. 01.02.2011. [Электронный ресурс] URL: <https://proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&id=mbghlssni501549432> (дата обращения 03.06.2025).
2. Проект 10580 «Таймыр» и «Вайгач» // История Росатома: Эволюция отрасли: История основных систем: История ледоколов. [Электронный ресурс] URL: <https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-powered-icebreakers/10580/> (дата обращения 03.06.2025).
3. Бессмазочные уплотнения из композиционных материалов группы BARS 700 для работы в условиях высоких давлений. [Электронный ресурс] URL: <https://barrens.ru/pdf/bars700.pdf> (дата обращения 03.06.2025).
4. Гулый В.А. Управление судовыми главными реверсивными паротурбинными агрегатами / В.А. Гулый. — СПб.: Реноме, 2022. — 176 с.
5. Адрианов А.А. Система автоматического управления «Siemens» для главных турбин а/л «Таймыр». Часть I. Регуляторы главных турбин: уч. пос. / А.А. Адрианов, Ю.Г. Татьянченко. — СПб.: Медицинская пресса, 2004.
6. Патент на изобретение № 2670470. Гидросистема управления клапанами паровой турбины: F01D 17/22 (2006.01) RU: заявл. 13.11.2017: опубл. 23.10.2018, БИ № 30 / Гулый В.А., Ильин О.К., Островский В.Г.; заявитель ПКБ «Автоматика».
7. Патент на изобретение № 2675030. Гидропривод: F15B 15/204 (2018.08); F16J 15/56 (2018.08) RU: заявл. от 02.11.2017: опубл. 14.12.2018, БИ № 35 / Григорьев И.И., Гулый В.А., Ильин О.К., Комаров В.А., Матусевич С.И., Кондратьев В.В.; заявитель ПКБ «Автоматика».
8. Патент на изобретение № 2669146. Электрогидравлическая система автоматического регулирования частоты вращения ротора паровой турбины привода электрогенератора судовой гребной электрической установки: F01D 17/22 (2006.01) RU: заявл. от 31.10.2017: опубл. 08.10.2018, БИ № 28 / Гайкова Н.А., Гулый В.А., Ильин О.К., Кашка М.М., Князевский К.Ю., Островский В.Г.; заявитель ПКБ «Автоматика».
9. Патент на изобретение № 2680905. Способ управления регулирующими клапанами паровой турбины ледокольной турбогенераторной гребной электрической установки и устройство для его осуществления: F01D 17/26 (2006.01) RU: заявл. 19.12.2017: опубл. 28.02.2019, БИ № 7 / Васильев О.Л., Гулый В.А., Ильин О.К., Касьянов А.Д., Князевский К.Ю., Комаров В.А., Хаюшко М.В.; заявитель ПКБ «Автоматика».

REFERENCES

1. Turboagregaty dlya atomnykh ledokolov i podvodnykh lodok [Turbine units for nuclear icebreakers and submarines]. URL: <https://proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&id=mbghlssni501549432> (accessed 03.06.2025).
2. Project 10580 "Taimyr" and "Vaigach". URL: <https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-powered-icebreakers/10580/> (accessed 03.06.2025).
3. Bessmazochnye uplotneniya iz kompozitsionnykh materialov gruppy BARS 700 dlya raboty v usloviyakh vysokikh davlenii [Lubricant-free composite seals from the BARS 700 group for high-pressure applications]. URL: <https://barrens.ru/pdf/bars700.pdf> (accessed 03.06.2025).
4. Guliy V.A. Upravlenie sudovymi glavnymi reversivnymi paroturbinnymi agregatami [Control of ship main reversible steam turbine units]. St. Petersburg: Renome, 2022. 176 p.
5. Adrianov A.A., Tat'yanchenko Yu.G. Sistema avtomaticheskogo upravleniya "Siemens" dlya glavnykh turbin a/l "Taimyr". Chast' I. Regulatory glavnykh turbin [Automatic control system "Siemens" for the main turbines of the nuclear icebreaker "Taimyr". Part I. Main turbine regulators: a study guide]. St. Petersburg: Meditsinskaya pressa, 2004.
6. Gidrosistema upravleniya klapanami parovoi turbiny [Hydraulic control system for steam turbine valves]: Patent for invention No. 2670470, F01D 17/22 (2006.01) RU dated 11.13.2017, publ. on 10.23.2018, bul. No. 30 / Guliy V.A., Il'in O.K., Ostrovskii V.G.; applicant Avtomatika Design Bureau.
7. Gidroprivod [Hydraulic actuating gear]: Patent for invention No. 2675030, F15B 15/204 (2018.08); F16J 15/56 (2018.08) RU dated 02.11.2017, publ. on 14.12.2018, bul. No. 35 / Grigor'ev I.I., Guliy V.A., Il'in O.K., Komarov V.A., Matusevich S.I., Kondratiev V.V.; applicant Avtomatika Design Bureau.

8. Elektrogidravlicheskaya sistema avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya rotora parovoi turbiny privoda elektrogenatora sudovoi grebnoi elektricheskoi ustanovki [Electrohydraulic system for automatic speed control of the rotor of a steam turbine for driving an electric generator of a marine rowing electric installation]: Patent for invention No. 2669146, F01D 17/22 (2006.01) RU dated 31.10.2017, publ. on 08.10.2018, bul. No. 28 / Gaikova N.A., Gulyi V.A., Il'in O.K., Kashka M.M., Knyazevskii K.Yu., Ostrovskii V.G.; applicant Avtomatika Design Bureau.
9. Sposob upravleniya reguliruyushchimi klapanami parovoi turbiny ledokol'noi turbogeneratornoi grebnoi elektricheskoi ustanovki i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [A method for controlling the control valves of a steam turbine of an icebreaking turbine generator electric propulsion system and a device for its implementation]: Patent for invention No. 2680905, F01D 17/26 (2006.01) RU dated 19.12.2017, publ. on 28.02.2019, bul. No. 7 / Vasil'ev O.L., Gulyi V.A., Il'in O.K., Kas'yanov A.D., Knyazevskii K.Yu., Komarov V.A., Khayuzko M.V.; applicant Avtomatika Design Bureau.

УДК 629.12 + 62-61
EDN YYPHNE

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА РОССИЙСКИХ МОРСКИХ СУДАХ (2019 — 2024)

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

А.Е. Чугаева, стажер, Российский морской регистр судоходства, 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: chugaeva.ae@rs-class.org

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

В статье проведен анализ потребления различных видов судового топлива на российских судах за период с 2019 по 2024 г. по данным российских судовладельцев, представляемым в ИМО. Полученные данные сравниваются с цифрами из отчетов ИМО о потреблении на судах мирового флота. Приведены данные по использованию альтернативного топлива на морских судах валовой вместимостью 5000 и более. Сравниваются эксплуатационные показатели энергоэффективности СП (рейтинг эксплуатационной углеродоемкости) российских судов и судов мирового флота. Сделаны выводы о незначительном росте потребления СПГ, для повышения которого необходимо развитие бункеровочной инфраструктуры в портах. Целью настоящей статьи является сравнение показателей энергоэффективности российских судов и судов мирового флота.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, альтернативные виды топлива, энергоэффективность, показатель энергоэффективности, углеродная интенсивность.

Для цитирования: Шурпьяк В.К. Анализ потребления топлива и энергоэффективности на российских морских судах (2019 — 2024) / В.К. Шурпьяк, А.Е. Чугаева, А.О. Березин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 148 — 163. — EDN YYPHNE.

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY AND FUEL CONSUMPTION ON RUSSIAN SEA-GOING SHIPS (2019 — 2024)

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

A.E. Chugaeva, intern, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: chugaeva.ae@rs-class.org

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

The article analyzes the consumption of various types of marine fuel on Russian ships in 2019 — 2024 according to data from Russian shipowners submitted to IMO. The data obtained are compared with figures on the consumption of various types of fuel taken from IMO reports on the consumption of the global fleet. Data on the use of alternative fuels on marine vessels with a gross tonnage of 5,000 and more are presented. The comparison of the operational energy efficiency index CII (Carbon Intensity Indicator) of Russian ships and ships of the world fleet is carried out. Conclusions are drawn about a minor increase in LNG consumption, for which further growth requires the development of bunkering infrastructure in ports. The purpose of this article is to compare the energy efficiency indicators of Russian vessels with the energy efficiency indicators of the global fleet.

Keywords: greenhouse gas emissions, alternative fuels, energy efficiency, energy efficiency index, carbon intensity.

For citation: Shurpyak V.K., Chugaeva A.E., Berezin A.O. Analysis of energy efficiency and fuel consumption on Russian sea-going ships (2019 — 2024). *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 148 — 163. EDN YYPHNE.

ВВЕДЕНИЕ

По данным четвертого исследования ИМО по выбросам парниковых газов [1] доля международного судоходства от совокупных общемировых выбросов парниковых газов (далее ПГ) увеличилась с 2,2 % в 2012 г. до 2,89 % в 2018 г. (рост на 31 %). И это несмотря на то, что в среднем по сектору международного судоходства интенсивность выбросов за рейс улучшилась к 2018 г. по сравнению с 2008 г. на 21 — 29 % в зависимости от типа судна. Причина увеличения доли выбросов от международного судоходства лежит в уменьшении выбросов в береговом секторе в связи с принимаемыми государствами мерами по сокращению выбросов в промышленности и стационарной энергетике.

Данные ИМО о выбросах парниковых газов ПГ в отрасли за 2019 — 2023 гг., приведенные далее, говорят о крайне незначительном совокупном уменьшении выбросов CO_2 с судов. При этом, по данным ООН [2] за период 2000 — 2023 гг., наблюдается ежегодный рост морских перевозок грузов в среднем около 3 % в год к предыдущему году (диаграмма на рис. 1), что говорит об увеличении грузооборота морских перевозок за эти годы в два раза.



Рис. 1. Рост объема морских перевозок в тоннах и тонно-милиях за период 2000 — 2024 гг. (изменение в % к предыдущему году) [2]

Таким образом, меры по энергоэффективности морских перевозок, принимаемые ИМО, не позволяют выдержать темп уменьшения выбросов от стационарной энергетики. Это происходит потому, что задачи, решаемые для повышения энергоэффективности, в судоходстве гораздо сложнее, чем в промышленности и стационарной энергетике. Например, перевод электростанции с угля на газ уменьшает выбросы CO_2 в два раза, в то время как перевод судна с мазута на СПГ приводит к уменьшению выбросов на 30 %. «Догнать» стационарную энергетику в судоходстве возможно за счет уменьшения потребления топлива путем экономии и более рационального использования или с помощью технологий получения энергии с нулевыми или околонулевыми выбросами CO_2 . Последние, к сожалению, не находят сколько-нибудь существенного применения на судах, и их широкое использование не просматривается в обозримом будущем. Остается экономия топлива, в первую очередь за счет уменьшения эксплуатационной скорости судов, а также своевременного проведения техобслуживания и докования.

Как известно, любая экономия продукта, в данном случае топлива, всегда начинается с его учета и контроля его расходования. ИМО начало контролировать расход топлива на судах с 2019 г., и сейчас можно подвести некоторые итоги.

ДОКУМЕНТЫ ИМО, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ СБОР ДАННЫХ О РАСХОДЕ ТОПЛИВА НА СУДАХ

В целях снижения влияния парникового эффекта и опасности изменения климата в 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН), в которой изложены общие принципы борьбы с изменением климата на планете. Конвенция вступила в силу 21 марта 1994 г. Позднее, в 1997 г., в рамках РКИК был подписан Киотский протокол, который стал первым глобальным соглашением об охране окружающей среды, основанным на рыночном механизме регулирования — механизме международной торговли квотами на выбросы парниковых газов.

В целях дальнейшей борьбы с изменением климата в 2015 г. было подписано Парижское соглашение по климату, которое обязало подписавшие его государства принять меры по сокращению антропогенного влияния на изменение климата, разработав национальные планы по снижению выбросов, которые должны пересматриваться каждые 5 лет. Основной целью этого документа провозглашено ограничение роста глобальной средней температуры до 1,5 °С, что значительно сократит риски и последствия изменения климата для человечества. Россия подписала Парижское соглашение 22 апреля 2016 г. и приняла его постановлением Правительства от 21 сентября 2019 г.

Исходя из температурных целей Парижского соглашения, страны-участники определили для себя сроки достижения углеродной нейтральности. Российская Федерация приняла Стратегию социально-экономического развития России до 2050 г. (Распоряжение от 29 октября 2021 г. № 3052-р), где определила сроком достижения углеродной нейтральности 2060 г. США, Великобритания, Канада, страны ЕС, Япония, Южная Корея и др. планируют достичь углеродной нейтральности к 2050 г. В планах Китая и Саудовской Аравии достижение полной углеродной нейтральности к 2060 г., Индия определила для себя целевым 2070 г.

Согласно Киотскому протоколу, судоходство рассматривается как рассредоточенный глобальный сектор мирового хозяйства, поэтому выбросы CO₂ от судоходства не включаются в национальную статистику. Организацией, ответственной за ограничение, контроль и регулирование выбросов от международного судоходства, определена ИМО, регулятивным нормативным документом по выбросам CO₂ с судов ИМО определила Приложение VI МК МАРПОЛ.

Один из основополагающих принципов работы ИМО заключается в отсутствии дискриминационных ограничений вне зависимости от национальной принадлежности и флага регистрации судна. Международная торговля подразумевает участие двух и более стран, поэтому, исходя из принципа отсутствия дискриминации, все суда, осуществляющие международные перевозки, должны соответствовать одним и тем же согласованным на многосторонней основе требованиям. Для сокращения выбросов парниковых газов Приложение VI МК МАРПОЛ следует рассматривать как универсальную нормативно-правовую базу, регулиющую, кроме прочего, процесс декарбонизации в отношении всех судов независимо от их флага регистрации, страны базирования судовладельца и района эксплуатации.

Согласно Резолюции МЕРС.278(70) [3], принятой на 70-й сессии Комитета по защите морской среды ИМО (далее — КЗМС), были введены поправки к Приложению VI МАРПОЛ, которые требуют от судовладельцев начиная с 2019 календарного года для каждого судна валовой вместимостью 5000 и более сообщать в администрации флага данные о потреблении топлива наряду с дополнительными данными о параметрах эксплуатации судов (пройденном расстоянии, времени в пути, виде топлива и методе замера). Позднее, на КЗМС-76, принятые ранее поправки были оформлены в виде Правила 27 «Сбор и представление данных по расходу топлива судами» Приложения VI к МК МАРПОЛ [4], которое действует в настоящее время.

Для сбора данных о годовом расходе судового топлива на судах допускается использовать три метода замера: по накладным на поставку бункерного топлива (НБТ), на основе использования расходомеров и путем измерения количества топлива в танках. При этом данные о расходе судового топлива должны включать все судовое топливо, потребляемое на борту, включая топливо, используемое главными и вспомогательными двигателями, котлами и генераторами инертного газа, с разбивкой по видам применяемого топлива, независимо от того, находится ли судно в плавании или нет.

По мнению авторов, полученная информация о потреблении топлива на морских судах за прошедшие шесть лет представляет интерес для определения тенденций развития отрасли. Поэтому было решено провести анализ полученных от российских судовладельцев данных и сравнить их с данными по мировому флоту, обобщенными ИМО. Секретариат ИМО ежегодно представляет собственный анализ потребления топлива судами, участвующими в международных перевозках. Последний такой документ [4] доступен за 2023 г.

В отчетах о потреблении топлива за 2023 и 2024 гг., помимо данных о расходе топлива, должна также присутствовать информация об эксплуатационном показателе энергоэффективности судов СП.

Сравнение результатов обобщенных показателей энергоэффективности отрасли российского судоходства за 2023 и 2024 гг. с общемировыми данными ИМО за 2023 г. и анализ влияния различных факторов на энергоэффективность можно определить как цель настоящей работы.

АНАЛИЗ ДАННЫХ О ПОТРЕБЛЕНИИ ТОПЛИВА НА МОРСКИХ СУДАХ

1. Выброс CO_2 в атмосферу с судов мирового флота по данным ИМО.

Общемировые тенденции по изменению потребляемого топлива можно проследить по информации, приведенной секретариатом ИМО в документе МЕРС 82/6/38 [5], где собраны и просуммированы данные отчетов морских администраций (МА) за 2023 г. о потреблении топлива на судах валовой вместимостью $\text{GT} \geq 5000$, подпадающих под действие Правила 27 Приложения VI МК МАРПОЛ, представленных в 2024 г. Всего в мире таких судов 35 143 под флагами 135 МА, в ИМО поступили данные о 28 620 судах, что составило 81,4 % от количества судов и 90,5 % от суммарного тоннажа (1301 млн GT из 1438 млн GT мирового флота судов с $\text{GT} \geq 5000$).

На рис. 2 показана диаграмма потребления отраслью различных видов топлива за последние годы, данные взяты из [5]. Данные ИМО по расходу топлива были пересчитаны в выбросы CO_2 с использованием переводных коэффициентов C_f из Руководства 2018 года по методу вычисления фактического конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ) для новых судов (МЕРС.308(73) [6]), изменение которых показано на рис. 3.

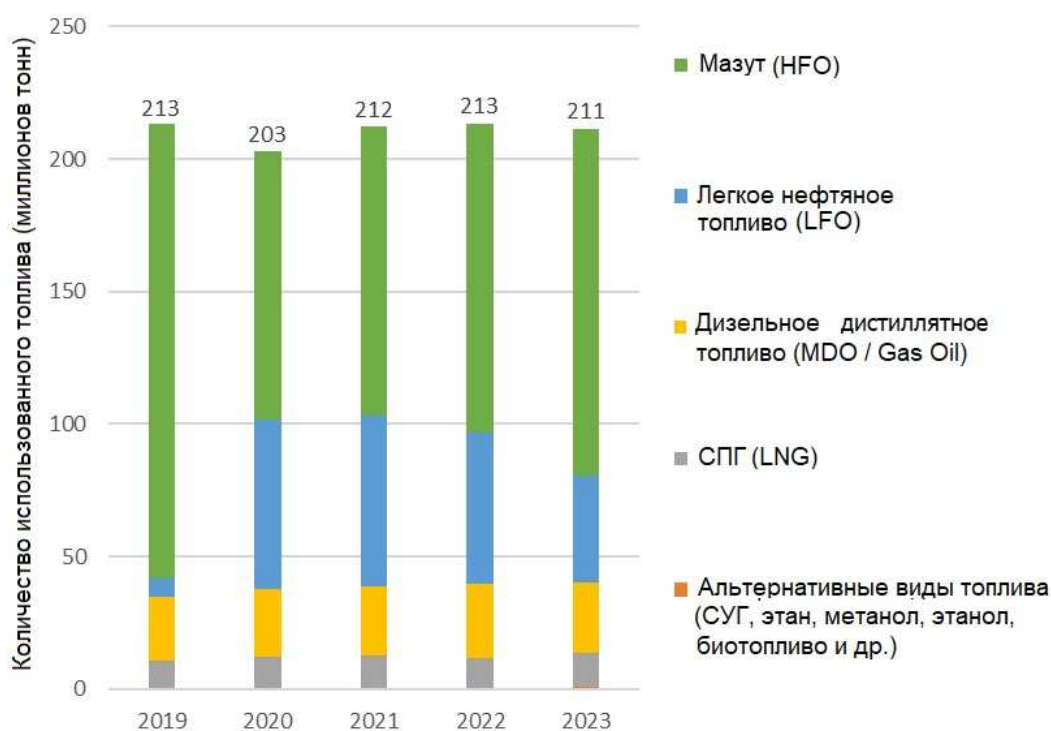


Рис. 2. Совокупное потребление морскими судами GT 5000 и более различных видов топлива по данным ИМО [2]

Данные о выбросах парниковых газов (далее — ПГ) в отрасли за 2019 — 2023 гг. говорят о крайне незначительном уменьшении выбросов CO_2 от международного судоходства — менее 1 % за шесть лет. Некоторое уменьшение выбросов на 5 % в 2020 г. объясняется уменьшением перевозок в связи с эпидемией ковида. Такие незначительные изменения стоит рассматривать как колебания в связи с изменением конъюнктуры в мировом судоходстве; от структуры потребления топлива, которая более чем на 90 % состоит из нефтяных видов топлива, суммарный объем выбросов не зависит.

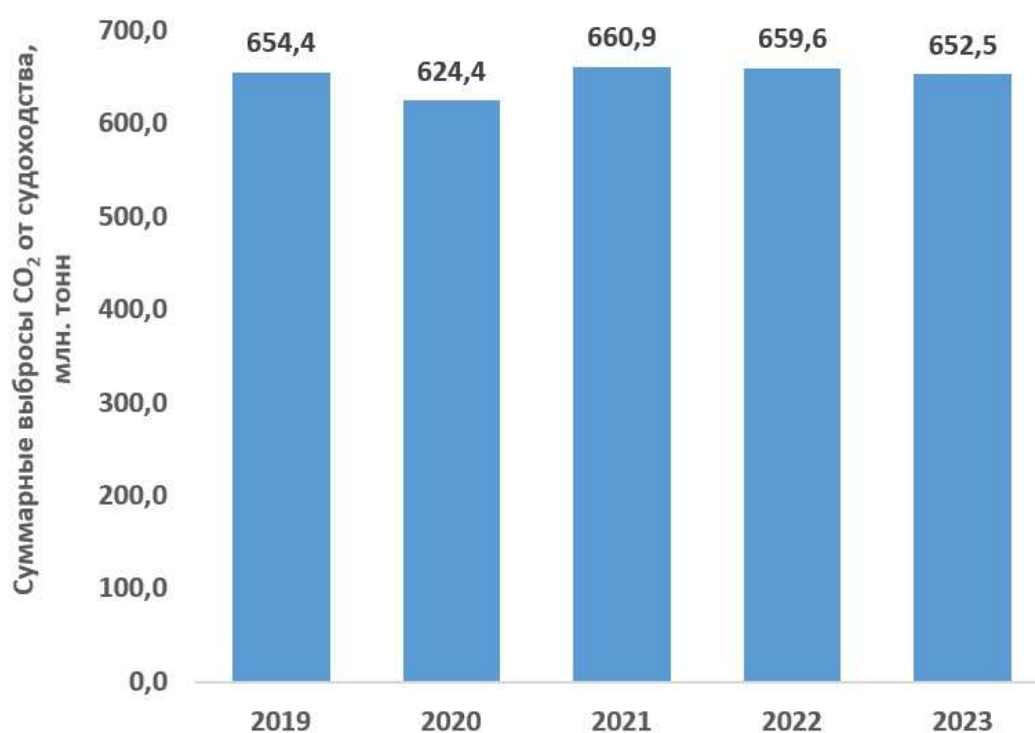


Рис. 3. Совокупные выбросы CO₂ морскими судами GT 5000 и более, рассчитанные по данным ИМО с учетом различных видов топлива

За рассмотренный период произошло только одно серьезное резкое изменение в структуре потребления топлива — после введения с 01.01.2020 ограничений на содержание серы в топливе: допустимое содержание серы в топливе не более 0,5 %, в особых зонах с 2015 г. — не более 0,1 %. Для решения образовавшихся проблем судовладельцы в основном выбрали наименее затратный путь — перешли на потребление топлива с низким содержанием серы. Другим, не менее популярным решением для очистки выхлопных газов от оксидов серы стало использование скруббера для очистки выхлопных газов от SO_x. Это отчетливо прослеживается в данных ИМО о потреблении топлива на рис. 2: в 2020 г. произошло резкое уменьшение потребления тяжелого топлива — по сравнению с 2019 г. оно уменьшилось в 1,6 раза, примерно на 70 млн т. Если в 2019 г. доля тяжелого топлива от общего количества традиционного топлива нефтяного происхождения составляла примерно 80 %, то в 2020 г. эта цифра уменьшилась до 50 %. При этом потребление дистиллятных сортов топлива изменилось незначительно, большая часть мазута была замещена легкими сортами топлива. Начиная с 2021 г. просматривается обратный процесс: доля мазута постоянно увеличивается за счет установки на судах систем очистки выхлопных газов от SO_x; в 2021 г. доля мазута — 51 %, в 2022 г. — 55 %, в 2023 г. доля мазута составила уже 65 %.

Согласно представленным данным ИМО, традиционное топливо нефтяного происхождения (кроме пропана и бутана) в общем потреблении топлива на судах составляет около 94 % (чуть менее 93,52 % в 2023 г., 94,65 % в 2022 г., 93,95 % в 2021 г.).

Потребление СПГ в 2023 г. составило чуть менее 6,5 %, увеличившись на 0,43 % по сравнению с данными 2021 г. Из общего количества СПГ, использованного как топливо, 89,5 % пришлось на газовозы, где этот вид топлива используется традиционно многие десятилетия.

Потребление СПГ как топлива находит более широкое применение на судах, не являющихся газовозами СПГ, то есть использующих его как альтернативное топливо в соответствии в Кодексом IGF. На рис. 5 показано распределение таких судов в % от их потребления СПГ (по массе).

В табл. 1 для сравнения приведены данные распределения в % для различных типов судов, использующих СПГ как топливо, за 2021 г., которые ранее проводились в работе [7]. Из таблицы следует, что потребление СПГ за три года более всего возросло на судах-контейнеровозах.

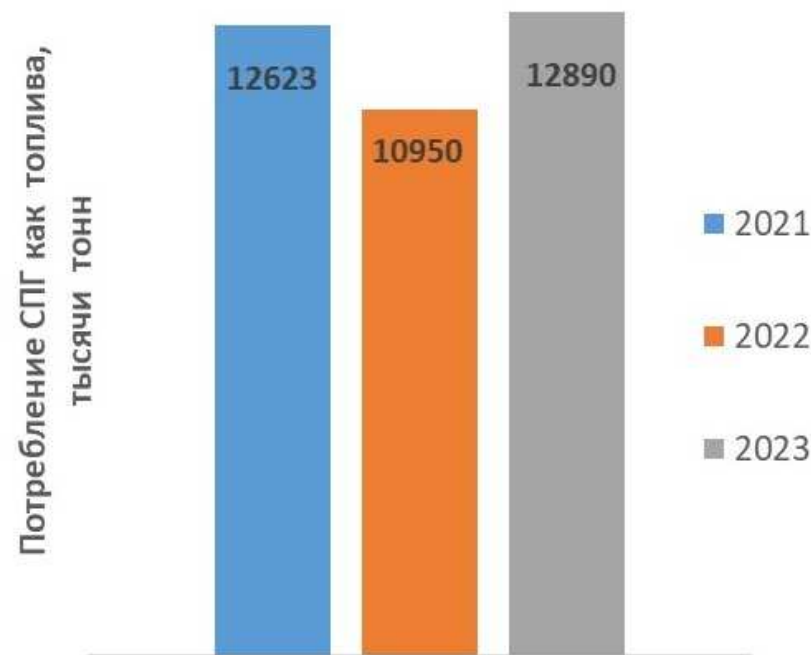


Рис. 4. Изменение количества СПГ, потребляемого судоходной отраслью в качестве топлива, тыс. т



Рис. 5. Потребление СПГ на морских судах, не являющихся газовозами СПГ, по данным ИМО за 2023 г. [5]

Таблица 1
Распределение (в %) потребления СПГ как топлива на судах GT>5000 (кроме газовозов СПГ) по данным ИМО за 2021 г. [7] и 2023 г. [5]

Типы судов	2021	2023
Балкеры	7	4,9
Контейнеровозы	31	34,5
Круизные пассажирские суда	11	11,7
Пассажирские суда	1	6,9
Газовозы	0	5,7
Суда для генгруза	1	1,4
Рефрижераторы	0	2,8
РО-РО грузовые	4	4,8
РО-РО пассажирские	18	9,6
Танкеры	19	15,3
Прочие	8	2,6

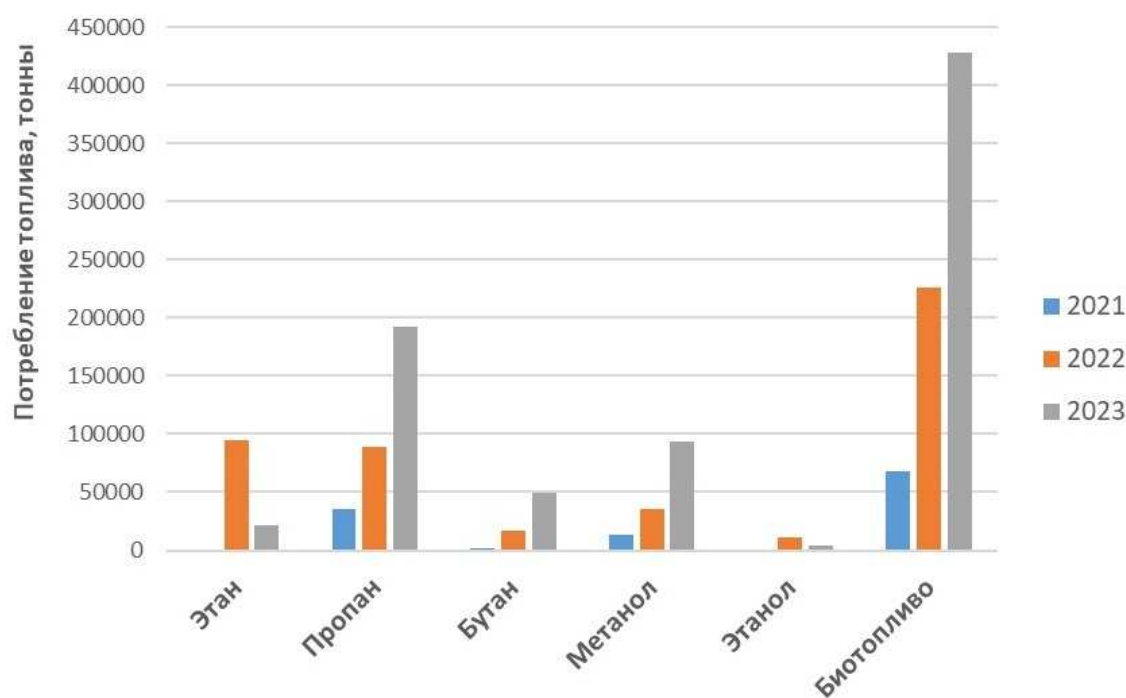


Рис. 6. Изменение количества различных видов альтернативного топлива, потребляемого судоходной отраслью в качестве топлива, т

В судоходстве расходы на топливо в настоящее время составляют значительную часть общих эксплуатационных расходов. В зависимости от размера судна, его энергоэффективности и дальности перевозки расходы на топливо могут составлять до двух третей общих издержек по содержанию судна [8, 9]. Так как цена на альтернативные топлива по сравнению со стоимостью обычного остается высокой, переход на более чистые виды топлива приводит к дальнейшему увеличению издержек судовладельцев и дополнительным затратам на дооборудование судов. Несмотря на это виден определенный рост доли потребления альтернативных топлив на диаграмме (рис. 6), составленной по данным ИМО [5, 10, 11]. Наиболее заметный рост за три последних года показывает биотопливо, а потребление этанола и этана уменьшилось.

Хотя по росту потребления биотопливо опережает прочие виды альтернативных топлив, оно по-прежнему в разы меньше потребления СПГ на судах, не являющихся газовозами, в 2023 г. — приблизительно в три раза (1 359 226 т СПГ против 428 263 т биотоплива).

В сумме все виды альтернативных топлив, используемых на судах, составили по массе топлива чуть более одного процента без учета разницы в теплоте сгорания топлива. Помимо пропана, бутана, метанола, этанола и биотоплива к альтернативным видам топлива отнесен СПГ, используемый как топливо на судах, не являющихся газовозами. Таким образом, использование всех видов альтернативного топлива на судах в 2023 г. составило 1,05 %, что не может сколько-нибудь существенно влиять на общее количество выбросов от судоходства.

Большая часть потребления метанола пришлась на танкеры (93 %) и на суда для генеральных грузов (6,6 %).

2. Выброс CO_2 в атмосферу с судов российского флота.

Сбор данных о потреблении различных сортов судового топлива с последующим пересчетом в выбросы CO_2 ведется ФАУ «Российский морской регистр судоходства» по поручению Министерства транспорта РФ с 2019 г. для обеспечения выполнения требований МК МАРПОЛ для судов валовой вместимостью (GT) 5000 и более. Изменение числа представленных отчетов судов валовой вместимостью GT > 5000 по годам приведено в табл. 2.

Таблица 2

Количество представленных отчетов о потреблении топлива на российских судах

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Всего судов GT > 5000 в классе Регистра	471	501	518	476	514	477
Суда GT > 5000 под флагом РФ	350	375	410	427	467	435

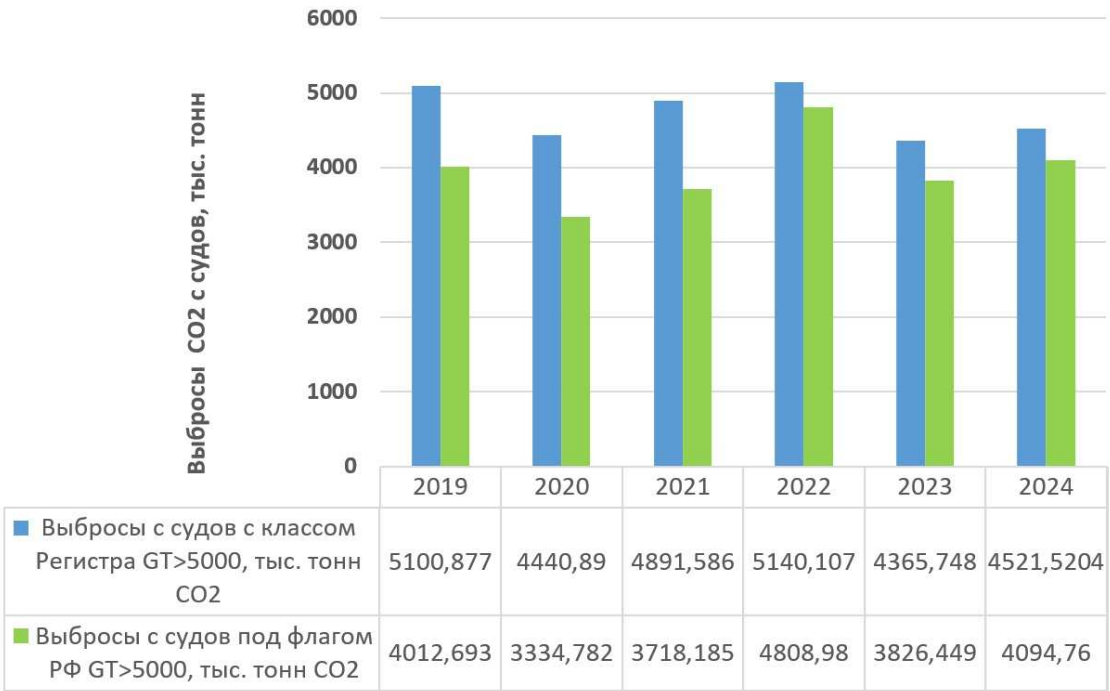


Рис. 7. Изменение общего объема выбросов CO₂ с морских судов валовой вместимостью (GT) более 5000

На рис. 7 показано изменение выбросов CO₂ за период 2019 — 2024 гг. по предварительным данным, полученным от судовладельцев на 20.03.2025. В таблице под диаграммой указаны общие объемы выбросов CO₂ по годам.

В настоящее время Правила Регистра позволяют использовать на судах в качестве топлива следующие виды альтернативных топлив: СПГ, СНГ (пропан-бутан), метанол и этанол. За последние шесть лет из этого перечня на судах под российским флагом нашел применение только СПГ. Сжигание СПГ и других альтернативных видов топлива приводит к более низким выбросам CO₂ (примерно на 20 %) по сравнению с традиционным топливом на основе нефти из-за более низкого отношения числа атомов углерода к числу атомов водорода, но подавляющее количество выбросов парниковых газов с судов по-прежнему производится за счет сжигания жидкого топлива нефтяного происхождения.

Выбросы за счет сжигания СПГ составляют около 2 % по массе CO₂, динамика изменения этого показателя приведена на рис. 8. Изменение количества СПГ, использованного на судах в качестве топлива, показано на рис. 9.



Рис. 8. Динамика изменения доли СПГ в выбросах CO₂ от сжигания топлива с судов в % от общего количества выбросов CO₂ с судов под флагом РФ

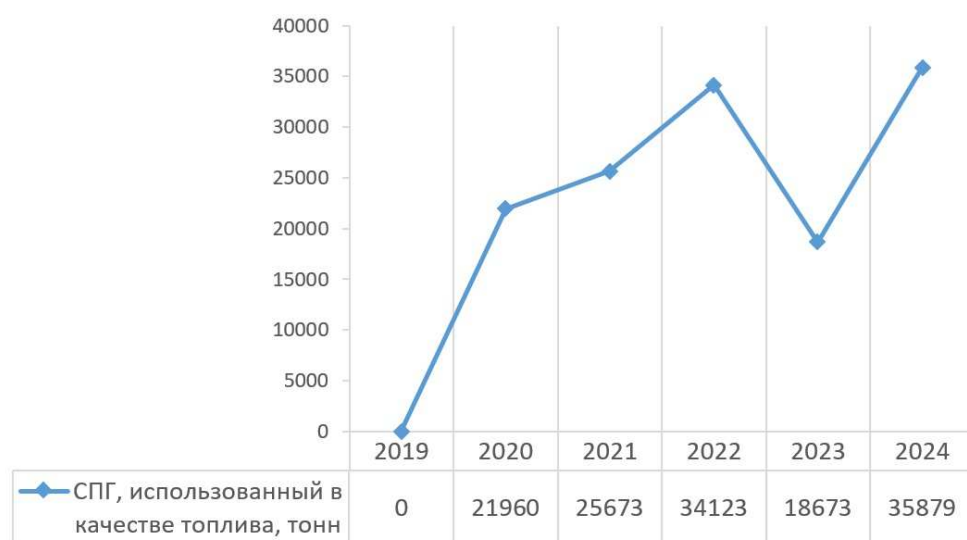


Рис. 9. Динамика изменения количества СПГ, т, использованного в качестве топлива на судах под флагом РФ

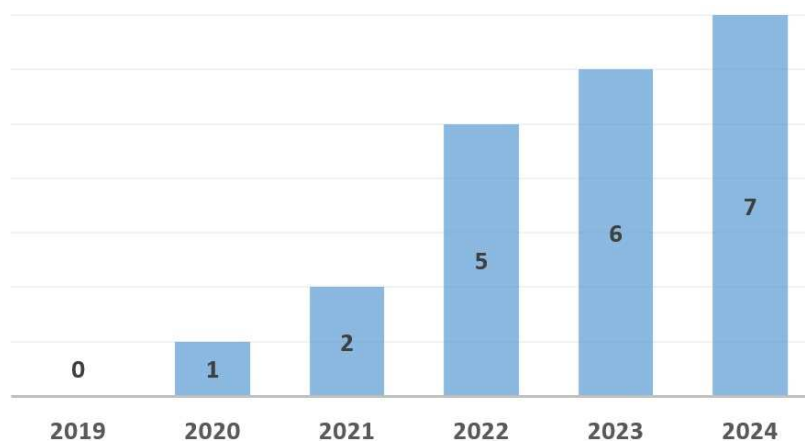


Рис. 10. Изменение общего числа судов под флагом РФ, оборудованных для использования СПГ в качестве топлива

Доля СПГ в потреблении топлива на российских судах, использующих СПГ в качестве топлива, сильно зависит от назначения судна и района плавания. Среди российских судов, использующих СПГ, по назначению присутствуют три типа судна: газовозы СПГ, накатные суда на линии Санкт-Петербург — Калининград и нефтеналивные танкеры. На судах-газовозах СПГ составляет в среднем более 90 % от потребленного топлива. На судах РО-РО, рассчитанных на использование СПГ, — около 70 %, а нефтеналивные танкеры используют не более 20 % СПГ. Объясняется это отсутствием возможности бункеровать СПГ в портах назначения. По информации, полученной от компании, управляющей танкерами, причина малой доли использования СПГ заключается в изменении запланированного района плавания. Вместо рейсов в европейские порты, где возможно произвести бункеровку СПГ, судам приходится поставлять нефтепродукты в более отдаленные районы. Следует также отметить, что доля СПГ увеличивается по мере увеличения срока эксплуатации судна после ввода его в строй.

В отчете секретариата ИМО о расходе топлива за 2023 г. (документ МЕРС 82/6/38) указано, что по результатам эксплуатации в 2023 г. 5,4 % судов, представивших отчет, (1541 из 28 620), относятся к рейтингу E, а рейтинг D присвоен 13,7 % судов. С учетом ежегодного ужесточения норм по требуемому СП задача повышения энергоэффективности приобретает практическое значение для многих тысяч судов.

3. Анализ изменения показателя энергоэффективности СП и влияния различных факторов.

КЗМС-76 принял поправки к Приложению VI МАРПОЛ (MEPC.328(76)) [4], которые требуют, чтобы все суда рассчитывали свой эксплуатационный показатель энергоэффективности СП с определением рейтинга и включали его в ежегодный отчет о расходе топлива. Углеродоемкость связывает выбросы парниковых газов с количеством перевозимого груза и пройденным расстоянием. Но для упрощения расчетов в показателе СП вместо реально перевезенного груза используется дедвейт, то есть условно считается, что суда эксплуатируются с полной загрузкой. Судам присваивается рейтинг энергоэффективности А, В, С, D, E, где А является высшей оценкой. Суда, имеющие рейтинг E или в течение трех лет подряд рейтинг D, должны представить план корректирующих действий, показывающий, каким способом судно при эксплуатации в следующем календарном году достигнет требуемого показателя (рейтинга С или выше). Поправки к Приложению VI к Конвенции MARPOL (принятые в виде сводного пересмотренного Приложения VI) вступили в силу 1 ноября 2022 г., а требования к контролю и отчетности по СП — с 1 января 2023 г. со сроком представления в первом квартале следующего после отчетного года. Таким образом, в настоящее время доступны сведения об энергоэффективности российских судов за 2023 и 2024 гг. ИМО пока опубликовало обобщенный отчет только за 2023 г.

Распределение в процентах российских судов по рейтингам СП за 2023 и 2024 гг. показано на диаграмме рис. 11 оранжевым и серым цветом соответственно. Желтым на диаграмме для сравнения показано распределение судов ИМО за 2023 г. Из диаграммы следует, что в 2023 г. 77,8 % судов мирового флота имели удовлетворительные рейтинги (А, В или С), тогда как для российских судов эта цифра составила 69,6 %. В 2024 г. последняя цифра практически не изменилась, увеличившись до 70,7 %. Но число судов с высшими рейтингами А и В существенно уменьшилось в пользу рейтинга С. На рис. 12 показано изменение доли российских судов для каждого из рейтингов за 2024 г.

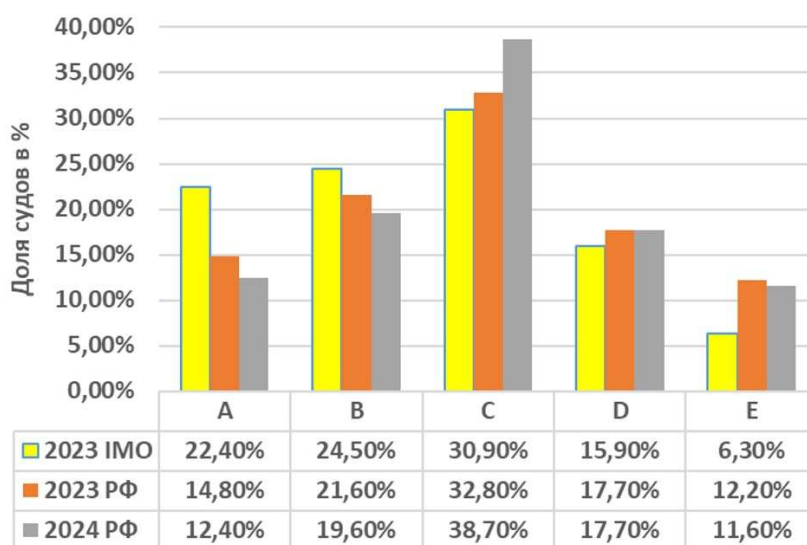


Рис. 11. Распределение в % российских судов по рейтингам СП в 2023 и 2024 гг. и распределение судов ИМО за 2023 г.

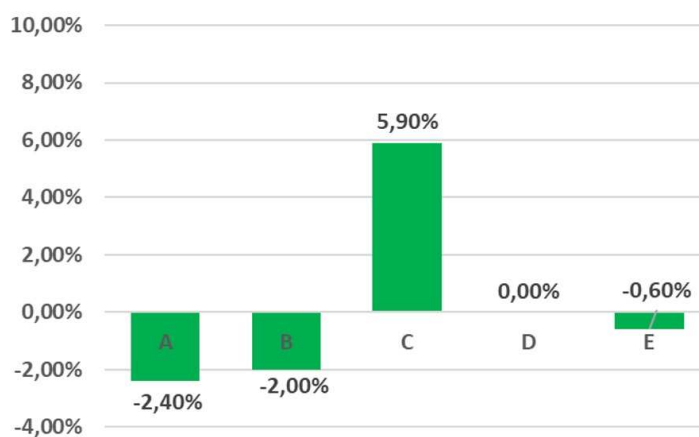


Рис. 12. Изменение рейтингов СП российских судов в 2024 г. по сравнению с 2023 г.

Рассматривая параметры, которые влияют на энергоэффективность судна вообще и на критерий СП в частности, авторы предположили, что из доступных данных, которые сообщаются судовладельцами и на которые можно повлиять в ходе эксплуатации судна, наиболее важными являются два: средняя скорость эксплуатации судна и коэффициент ходового времени. Кроме этого, можно предположить, что существенное влияние оказывают ледовый класс судна и способ замера расхода топлива. Подробный разбор влияния на показатели энергоэффективности различных конструктивных параметров судна, двигателя, топлива и эксплуатационных параметров выходит за рамки настоящей статьи, но здесь, опираясь на полученные данные, можно проверить, заметно ли вообще влияние этих факторов.

Для проверки этих предположений проанализируем, как изменяется средняя скорость и коэффициент ходового времени судов с различными рейтингами СП.

Под средней скоростью судна за год $V_{\text{ср}}$ будем понимать дистанцию S , которую прошло судно за год, разделенную на время в пути в течение года T , которые сообщаются судовладельцем ежегодно вместе с данными по расходу топлива согласно Резолюции МЕРС.278(70) [3]. Под коэффициентом ходового времени K подразумеваем время в пути в течение года T , разделенное на количество часов в году.

На рис. 13 — 15 показано изменение средних значений средней эксплуатационной скорости судов для различных рейтингов СП для российских судов.

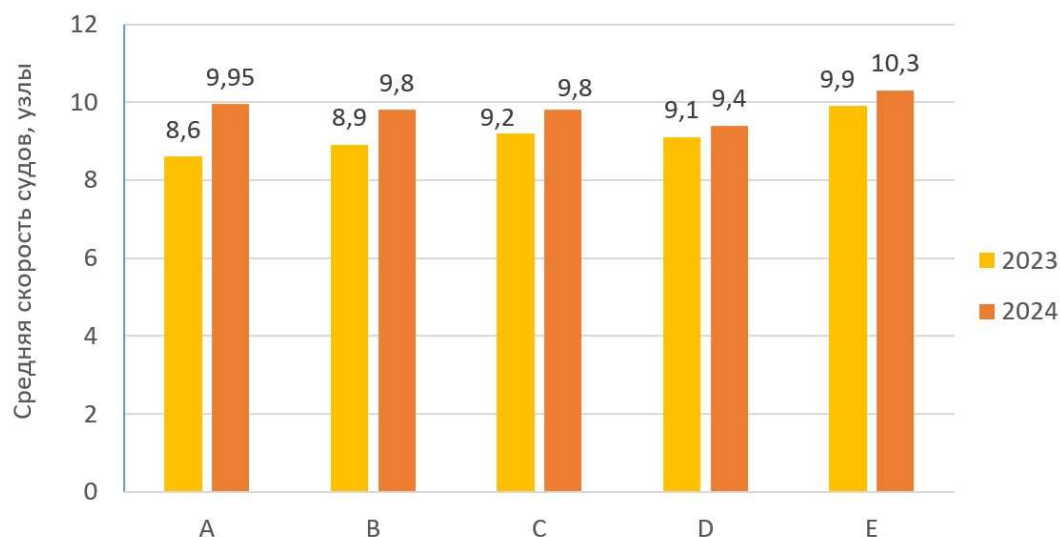


Рис. 13. Средняя скорость эксплуатации российских судов с различными рейтингами СП (учитывались все суда, совершающие транспортную работу)

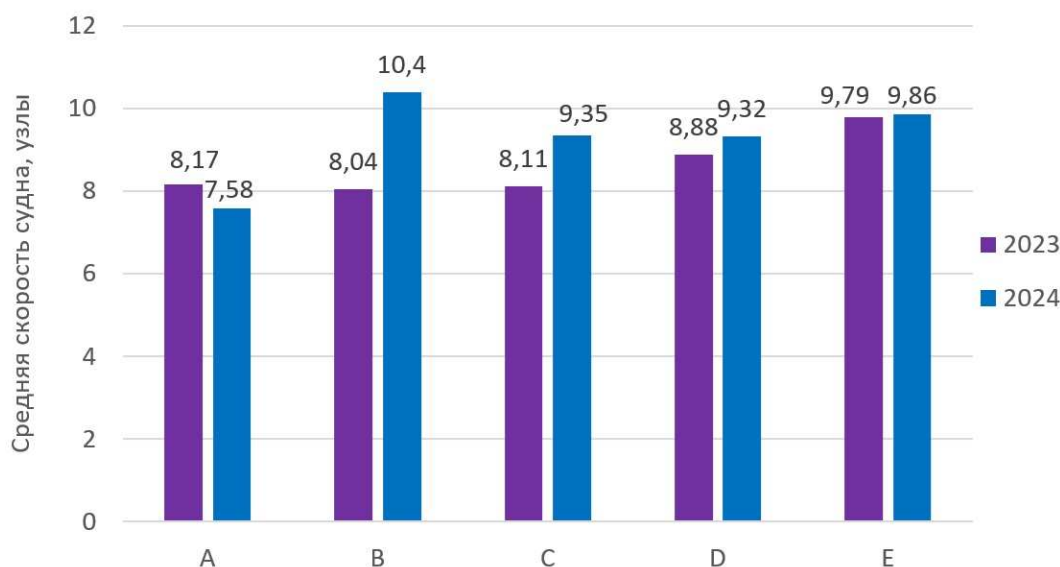


Рис. 14. Средняя скорость эксплуатации российских судов для генеральных грузов с различными рейтингами СП

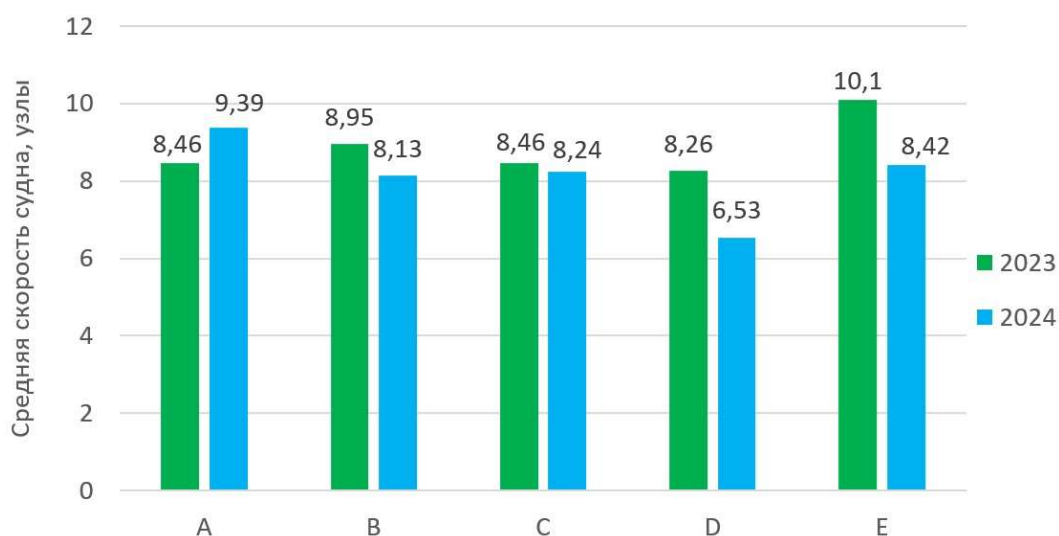


Рис. 15. Средняя скорость эксплуатации российских нефтеналивных судов и химовозов с различными рейтингами СИ

На рисунках 16 — 18 показано изменение средних значений коэффициента ходового времени судов для различных рейтингов СИ для российских судов.

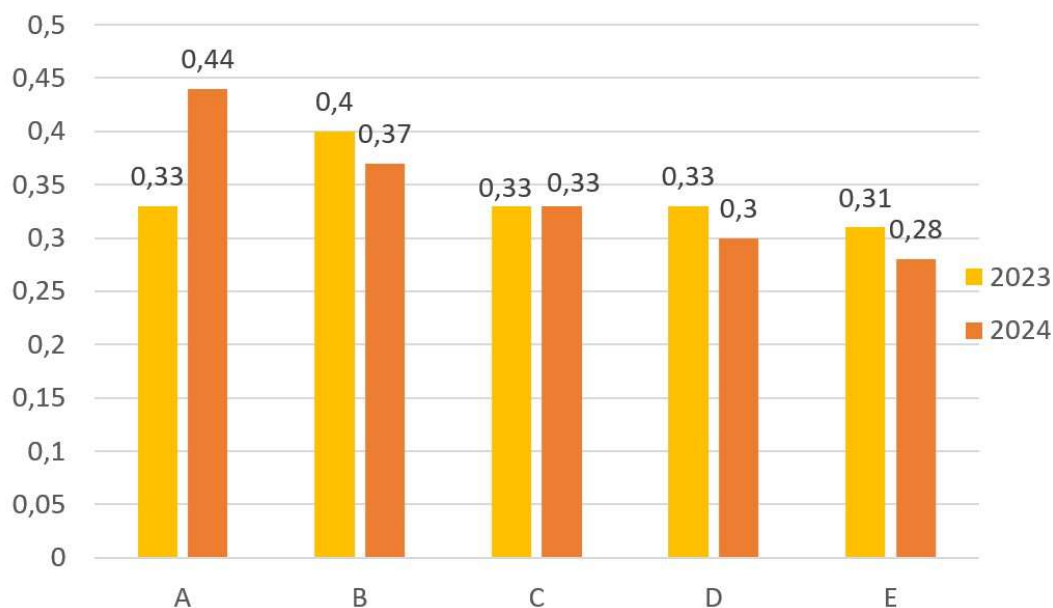


Рис. 16. Средний коэффициент ходового времени российских судов с различными рейтингами СИ (учитывались все суда, совершающие транспортную работу)

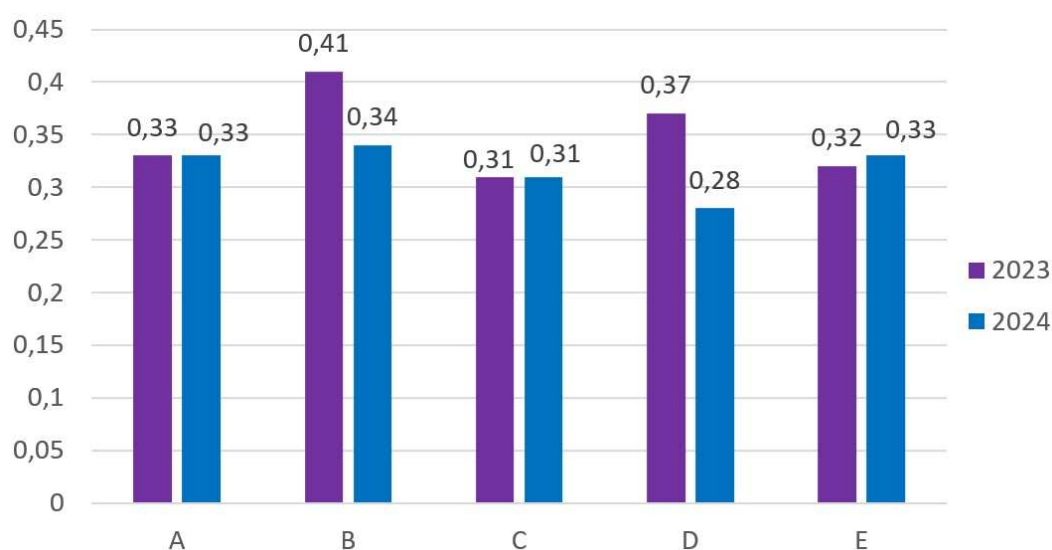


Рис. 17. Средний коэффициент ходового времени российских судов для генеральных грузов с различными рейтингами СП

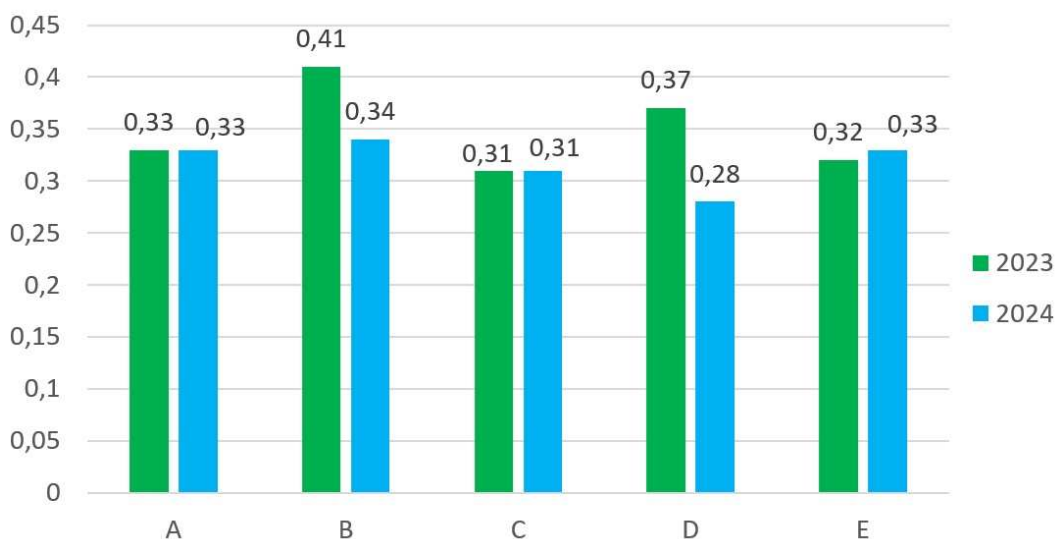


Рис. 18. Средний коэффициент ходового времени российских нефтеналивных судов и химовозов с различными рейтингами СП

Из диаграмм можно сделать вывод, что увеличение средней эксплуатационной скорости судов отрицательно сказывается на рейтинге, а увеличение коэффициента ходового времени сказывается положительно.

В табл. 3 приведено сравнение средней скорости $V_{\text{ср}}$ и среднего коэффициента ходового времени K российских судов и судов мирового флота по данным ИМО за 2023 г. [5]. Из таблицы следует, что скорость российских судов в среднем на 1,5 — 2 уз меньше, чем мирового флота, что положительно сказывается на показателях энергоэффективности, но отрицательно на экономике перевозок, так как понижает грузооборот.

Таблица 3

Сравнение средних эксплуатационных параметров российских судов и судов мирового флота по данным ИМО

	Средняя скорость судов $V_{\text{ср}}$		Средний коэффициент ходового времени K	
	РФ 2024	ИМО 2023	РФ 2024	ИМО 2023
Нефтеналивные суда и химовозы	8,3	10,9	0,31	0,56
Суда для генгруза	9,5	10,1	0,32	0,48
Рефрижераторные суда	11,7	13,4	0,32	0,47
Все суда	9,8	11,5	0,34	0,57

Еще более важный для грузооборота показатель — коэффициент ходового времени K — в среднем для российских судов меньше в 1,5 раза. Среднее время нахождения судов в российских портах, как правило, больше, чем в портах зарубежных. Это связано с совокупностью факторов, включая более быстрое таможенное оформление грузов, более совершенную инфраструктуру и более высокую производительность труда в иностранных портах. Низкий коэффициент ходового времени влияет отрицательно на эксплуатационные показатели энергоэффективности, так как расход топлива на обеспечение судна паром и электроэнергией производится при неподвижно стоящем судне, когда оно не совершает транспортной работы.

Еще один параметр, который не может не влиять на показатель СП, это способ определения количества израсходованного топлива. Из трех способов замера, допускаемых МЕРС.328(76) [4] для сбора данных о годовом расходе судового топлива, наиболее точным является способ с использованием расходомеров, однако он требует от судовладельцев дооборудования судов приборами расхода для всех потребителей топлива на судне. В методике двух других способов замера (путем измерения количества топлива в танках и по накладным на поставку бункерного топлива) заложена ошибка в сторону увеличения расхода, так как не все топливо, попавшее на судно, используется судовыми потребителями. Часть топлива сепарируется и сдается на берег в виде нефтеостатков и льяльных вод. Влияние способа замера можно проследить по данным, приведенным в табл. 4, из которых следует, что у судов, производящих замеры расхода топлива с помощью расходомеров, отрицательные рейтинги D и E встречаются примерно в два раза реже по сравнению с судами, отчитывающимися по замерам уровня в топливных танках и бункеровочным накладным.

Таблица 4

Распределение судов по рейтингам СП в зависимости от метода замера расхода топлива

Метод замера	Все суда GT ≥ 5000	Суда, совершающие транспортную работу	Суда с положительным рейтингом СП (А, В или С)	Суда с отрицательным рейтингом СП (D или E)
Использование расходомеров	12 %	8 %	85 %	15 %
Измерение количества топлива в танках	42 %	44 %	72 %	28 %
По накладным на поставку топлива (НБТ)	46 %	48 %	67 %	33 %

К сожалению, в отчетах ИМО о потреблении топлива [5, 10, 11] нет информации о том, какими способами производятся замеры расхода топлива, поэтому сравнение российских данных с данными мирового флота произвести невозможно.

Данные по расходу топлива на российских судах показывают, что ледовый класс судна — это еще один важный параметр, влияющий на показатели энергоэффективности. На рис. 19 показано изменение доли судов с отрицательным рейтингом в зависимости от ледового класса судна. Если для судов без ледового класса и с ледовым классом Ice1 доля судов с рейтингом E или D составляет 22 %, то для классов Ice2, Ice3, IB и IC — 29 %, а для классов Arc5, Arc4, финско-шведских классов IAS, IA, классов МАКО PC6, PC7 эта цифра 43 %. Хотя при расчете СП применяются поправочные коэффициенты для учета уменьшения дедвейта судна, этого явно недостаточно, чтобы учесть дополнительные затраты энергии судна при совершении плавания на свободной воде.

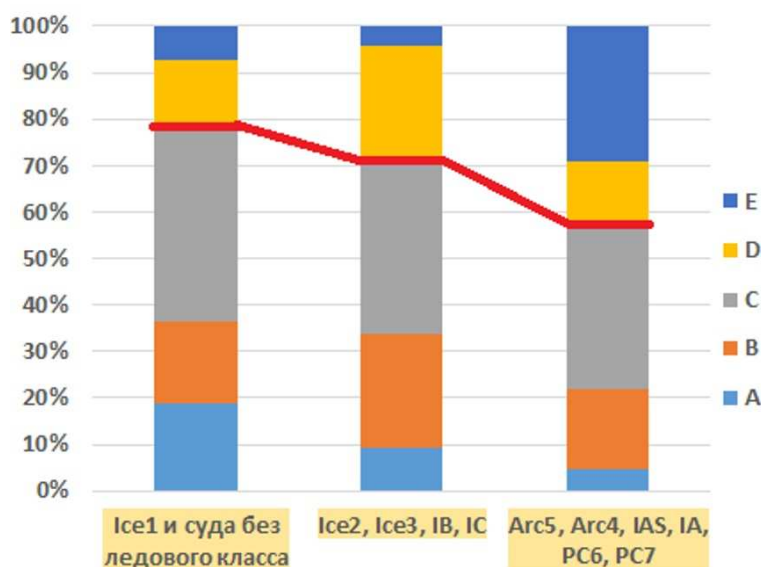


Рис. 19. Доля судов с различными рейтингами СП в зависимости от ледового класса судна по данным о расходе топлива на российских судах за 2024 г.

ВЫВОДЫ

1. В отчете ООН [2] о развитии морского транспорта делается совершенно справедливый вывод, который подтверждается данными по российскому и иностранному морскому флоту, что соблюдение мер ИМО по повышению энергоэффективности приведет к снижению эксплуатационной скорости судов и уменьшению фактической провозной способности морского флота. Для того чтобы компенсировать это уменьшение провозной способности, придется либо уменьшать грузооборот морского транспорта, что отрицательно скажется на мировой экономике и международном разделении труда, либо увеличивать число судов в эксплуатации.

2. Для достижения приемлемого значения показателя СП (рейтинги А, В и С) необходимо обеспечить более эффективную эксплуатацию судов, в частности путем выбора оптимальных маршрутов, топлива и скорости. В 2023 г. 78 % судов мирового флота получили оценку от А до С, что соответствует установленным требованиям. Доля российских судов с аналогичными рейтингами существенно меньше, в 2023 г. она составила 69,6 %, а в 2024 г. — 70,7 %.

3. Несмотря на более высокие средние скорости эксплуатации судов, зарубежные судовладельцы добиваются более высоких рейтингов СП по сравнению с российскими. Объяснить это можно более высоким коэффициентом ходового времени благодаря более быстрой разгрузке в портах, меньшим временем ожидания на рейде, то есть меньшим временем работы судна в режиме, когда происходит расход топлива без совершения судном транспортной работы. Кроме того, на показатель СП существенно влияет возможность приема электропитания с берега в европейских портах и отсутствие такой возможности в портах российских. В Российской Федерации отсутствуют причалы, оборудованные для приема транспортными судами электропитания с берега, и, насколько известно авторам, планов по развитию такой инфраструктуры нет.

4. Потребление альтернативных топлив пока не оказывает заметного влияния на выбросы CO₂ с судов как в Российской Федерации, так и за рубежом. Выбросы от сжигания различных видов альтернативных топлив (без учета сжигания СПГ на газовозах СПГ) составляют около 1 %, но динамика процесса положительная. Особенно показателен в этом плане значительный рост потребления биотоплива на иностранных судах.

5. В Российской Федерации только один порт (Большой порт Санкт-Петербург) обладает инфраструктурой для бункеровки судов СПГ. Другие порты РФ не располагают средствами для бункеровки СПГ, равно как и другими видами альтернативных топлив. Без расширения инфраструктуры для бункеровки СПГ в российских портах не приходится ожидать значительного увеличения потребления альтернативных топлив.

6. В настоящей работе на основе анализа распределения рейтингов СП показано наличие связи индекса СП с такими параметрами, как коэффициент ходового времени, средняя эксплуатационная скорость судна, ледовый класс и способ контроля расхода топлива. При этом повышение средней эксплуатационной скорости судна влияет на рейтинг СП отрицательно, а увеличение коэффициента ходового времени, напротив, положительно. Существенно отрицательно влияет на рейтинг СП ледовый класс судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020 / International Maritime Organization (IMO). — July 2020.
2. UNCTAD/RMT/2023 (Overview). Обзор морского транспорта. 2023 год / Конференция ООН по торговле и развитию. — Организация Объединенных Наций, Женева, 2023 год.
3. MEPC 70/18/Add.1 Annex 3 — Resolution MEPC.278(70). Amendments to MARPOL Annex VI (Data collection system for fuel oil consumption of ships). 2016.
4. MEPC 76/15/Add.1 Annex 1 — Resolution MEPC.328(76). 2021 Revised MARPOL Annex VI.
5. MEPC 82/6/38 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2023).
6. Resolution MEPC.308(73) — 2018 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships.
7. 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.
8. 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. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23 — 34. — EDN WZWOPO.
9. Березин А.О. Закономерности развития экспорта зерновых культур из южных регионов России водным транспортом / А.О. Березин, Я.А. Сперанская, К.В. Прозоров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 690 — 699. — DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699. — EDN FJOTBH.
10. MEPC 81/6 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2022).
11. MEPC 79/6/1 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2021).

REFERENCES

1. MEPC 75/7/15 — Fourth IMO GHG Study 2020 / International Maritime Organization (IMO). July 2020.
2. UNCTAD/RMT/2023 Review of Maritime Transport 2023 (Overview) / United Nations Conference on Trade and Development. Geneva, 2023.
3. MEPC 70/18/Add.1 Annex 3 — Resolution MEPC.278(70). Amendments to MARPOL Annex VI (Data collection system for fuel oil consumption of ships). 2016.
4. MEPC 76/15/Add.1 Annex 1 — Resolution MEPC.328(76). 2021 Revised MARPOL Annex VI.
5. MEPC 82/6/38 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2023).
6. Resolution MEPC.308(73) — 2018 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships.
7. 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. EDN QYFSKP. (In Russ.)
8. 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.)
9. Berezin A.O., Speranskaya Y.A., Prozorov K.V. Patterns of development of export cargo flows of grain crops from the southern regions of Russia. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 690 — 699. DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699. EDN FJOTBH. (In Russ.)
10. MEPC 81/6 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2022).
11. MEPC 79/6/1 — Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2021).



ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ

УДК 691.714.124
EDN ZLFPFA

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ИНОСТРАННЫХ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОБЩЕСТВ К ОТЛИВКАМ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ

А.А. Грибанькова, д-р пед. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: Gribankova@smtu.ru

В.И. Трусов, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: vtrui2008@mail.ru

М.А. Агиевич, канд. хим. наук, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071 Россия, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4, e-mail: agievichmaria@mail.ru

В статье проанализированы требования иностранных классификационных обществ (КО) за 2023 — 2024 гг. к отливкам из коррозионностойких сталей, применяемых в судостроении. Рассмотрены правила шести следующих иностранных организаций, разрабатывающих и применяющих технические стандарты в области проектирования, строительства и надзора за морскими объектами: Индийский регистр судоходства, Китайское КО, Бюро Веритас, Американское бюро судоходства, Норвежский Веритас и Итальянский морской регистр. Изложены механические свойства современных литейных сплавов на основе железа, их химические составы, возможные дефекты и требования к коррозионным испытаниям. Излагаются сведения и приводятся рекомендации по производству отливок из коррозионностойких сталей, получивших широкое применение в судостроении и разработанных в последнее время. Результаты исследования позволят предъявлять обоснованные требования к организации судостроительного производства и подбирать судостроительные материалы с заданными свойствами, обеспечивающие требуемые сроки эксплуатации. Выполнение требований способствует безопасности мореплавания, охране человеческой жизни и окружающей среды.

На основании проведенных исследований были разработаны требования к отливкам из коррозионностойких сплавов на основе железа и предложения для внедрения в нормативные документы Российского морского регистра судоходства (РС).

Ключевые слова: литейные стали, коррозионностойкие стали, иностранные классификационные общества, отливки, аустенитная сталь, ферритно-аустенитная сталь.

Для цитирования: Грибанькова А.А. Анализ требований иностранных классификационных обществ к отливкам из коррозионностойких сталей, применяемых в судостроении / А.А. Грибанькова, В.И. Трусов, М.А. Агиевич // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 164 — 173. — EDN ZLFPFA.

ANALYSIS OF REQUIREMENTS OF FOREIGN CLASSIFICATION COMMUNITIES TO CASTINGS OF CORROSION-RESISTANT STEELS USED IN SHIPBUILDING

A.A. Gribankova, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: agribankova@smtu.ru

V.I. Trusov, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vtrui2008@mail.ru

M.A. Agievich, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, 119071 Russia, Moscow, Leninskii pr., 31, korp. 4, e-mail: agievichmaria@mail.ru

The aim of this paper is to analyze the requirements of foreign classification societies for 2023–2024 to stainless steel castings intended for use in shipbuilding. The rules of six foreign organizations (Indian register of shipping, China classification society, Bureau Veritas, American bureau of shipping, Det Norske Veritas, Registro Italiano navale) developing and applying technical standards in the field of design, construction and supervision of offshore facilities were studied. The mechanical properties of modern cast iron-based alloys, their chemical compositions, possible defects and requirements for corrosion tests were presented. Information and recommendations were given for the production of stainless-steel castings widely used in shipbuilding and developed recently. The paper gives valuable information that helps to make reasonable requirements to the organization of shipbuilding production and to select shipbuilding materials with specified properties that ensure the required service life. Compliance with the requirements contributes to safety of navigation, protection of human life and environment.

On the basis of the research, requirements to castings from corrosion-resistant iron-based alloys and suggestions for implementation in the regulatory documents of the Maritime Register of Shipping (RS) were developed.

Key words: cast steels, corrosion-resistant steels, foreign classification societies, castings, austenitic steel, ferritic-austenitic steel.

For citation: Gribankova A.A., Trusov V.I., Agievich M.A. Analysis of requirements of foreign classification societies to castings or corrosion-resistant steels used in shipbuilding. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 164 — 173. EDN ZLFPFA. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный рост и реорганизация судостроения требует дальнейшего расширения объема производства коррозионностойких сталей и сплавов [1]. При этом в связи с развитием новой техники возникла необходимость создания материалов, которые удовлетворяли бы возросшим требованиям в отношении механических, коррозионных и технологических свойств. В ряде случаев используемые в современном судостроении коррозионностойкие сплавы на основе железа слабо противостоят воздействию сильноагрессивных сред. Для придания литым деталям особых свойств, например повышенной коррозионной стойкости, в литейные сплавы вводят специальные легирующие элементы: хром, никель, титан, алюминий, медь, молибден, ванадий и др. [2].

Убытки, связанные с коррозией судов, из-за их исключительной металлоемкости особенно велики. Опыт показывает, что только при правильном проектировании судовых конструкций и использовании эффективных средств защиты от коррозии можно на 50 — 70 % уменьшить ущерб от коррозии, на 10 — 30 % снизить металлоемкость судов за счет уменьшения строительных трещин корпуса, увеличить грузоподъемность и эксплуатационный период судов.

За последнее десятилетие отечественными и зарубежными учеными накоплено много данных о свойствах коррозионностойких сплавов на основе железа, применяемых в судостроении. Следует отметить, что свои подходы и принципы в области классификации сталей и стальной продукции имеются практически у каждого государства и отражены в национальных стандартах [3].

Более 50 организаций по всему миру определяют свою деятельность как предоставление услуг по классификации морских судов, однако не все они входят в Международную ассоциацию КО. В обзоре систематизированы данные по анализу и обобщению требований к отливкам из коррозионностойких сплавов на основе железа следующих иностранных КО: Индийский регистр судоходства (Indian register of shipping, IRS), Китайское КО (China classification society, CCS), Бюро Веритас (Bureau Veritas, BV), Американское бюро судоходства (American bureau of shipping, ABS), Норвежский Веритас (Det Norske Veritas, DNV) и Итальянский морской регистр (Registro Italiano navale, RINA).

1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

К сталям, используемым для океанских и морских судов, выдвигаются строгие требования по коррозионной стойкости, в том числе потому, что помимо хлоридов, присутствующих в соленой воде, образование ржавых язв на металле вызывают сероводород и остатки нефтепродуктов. В табл. 1 представлен химический состав девяти коррозионностойких сталей (304, 304L, 316, 316L, 317, 317L, 347, 2205, 2507), рекомендованных к применению Американским бюро судоходства [4].

Таблица 1

Химический состав отливок из коррозионностойкой стали (ABS)

Класс			Химический состав, %										
Аустенитные коррозионностойкие стали													
Тип	Марка	Отливка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Другие
304	J92600	CF8; CF8A	0,080	2,00	1,50	0,040	0,030	18,0 – 21,0	8,0 – 11,0	0,50	—	—	—
304L	J92500	CF3; CF3A	0,030	2,00	1,50	0,040	0,030	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	0,50	—	—	—
316	J92900	CF8M	0,080	1,50	1,50	0,040	0,030	17,0 – 21,0	9,0 – 13,0	2,00 – 3,00	—	—	—
316L	J92800	CF3M	0,030	1,50	1,50	0,040	0,030	17,0 – 21,0	9,0 – 13,0	2,00 – 3,00	—	—	—
317	J93000	CG8M	0,080	1,50	1,50	0,040	0,030	18,0 – 21,0	9,0 – 13,0	3,00 – 4,00	—	—	—
317L	J92288	CG3M	0,030	1,50	1,50	0,040	0,030	18,0 – 21,0	9,0 – 13,0	3,00 – 4,00	—	—	—
347	J92710	CF8C	0,080	2,00	1,50	0,040	0,030	18,0 – 21,0	9,0 – 12,0	—	—	—	Nb, 10 × C мин, 1,00 макс.
Ферритно-аустенитные дуплексные нержавеющие стали													
2205	J92202 (S3803)	CD3MN-4A	0,030	1,00	1,50	0,035	0,020	21,0–23,0	4,5 – 6,5	2,50 – 3,50	—	0,15 – 0,20	—
2507	J93404	CE3MN-5A	0,030	1,00	1,50	0,035	0,020	24,0–26,0	6,0 – 8,0	2,50 – 3,50	—	0,10 – 0,30	—

Итальянский регистр [5] и Бюро Веритас [6] для изготовления отливок рекомендуют 5 классов коррозионностойкой стали, применяемой в судостроении (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав отливок из коррозионностойкой стали (RINA, BV)

Класс	Химический состав, %								
	C max	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	Ni	Mo	Другие
304L	0,030	2,0	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
304	0,080	2,0	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
316L	0,030	2,0	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	9,0 – 13,0	2,0 – 3,0	—
316	0,080	2,0	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	9,0 – 13,0	2,0 – 3,0	—
347	0,080	2,0	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	9,0 – 13,0	—	10 × C ≤ Nb ≤ 0,080

Индийский регистр судоходства [7] приводит требования к отливкам из аустенитных нержавеющих сталей, используемых в трубопроводных системах судов для сжиженных газов с расчетной температурой не ниже – 165 °C и наливных химовозов (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав отливок из аустенитной коррозионностойкой стали (IRS)

Тип стали	Химический состав (%)								
	C макс.	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Другие
304L	0,03	0,20 – 1,5	0,50 – 2,0	0,040 макс.		17,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0	—
304	0,08	0,20 – 1,5	0,50 – 2,0	0,040 макс.		17,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0	—
316L	0,03	0,20 – 1,5	0,50 – 2,0	0,040 макс.		17,0 – 21,0	2,0 – 3,0	9,0 – 13,0	—
316	0,08	0,20 – 1,5	0,50 – 2,0	0,040 макс.		17,0 – 21,0	2,0 – 3,0	9,0 – 13,0	—
317	0,08	0,20 – 1,5	0,50 – 2,0	0,040 макс.		17,0 – 21,0	3,0 – 4,0	9,0 – 12,0	—
347	0,06	0,20 – 1,5	0,50 – 2,0	0,040 макс.		17,0 – 21,0	—	9,0 – 12,0	Nb ≥ 8 × C ≤ 0,90

В правилах Китайского КО [8] приведены составы 5 отливок из аустенитной нержавеющей стали (табл. 4) для трубопроводных систем, используемых в низкотемпературной среде и требующих коррозионной стойкости. В табл. 5 представлен химический состав отливок из коррозионностойкой стали, рекомендованный Норвежским Веритас [9].

Таблица 4

Химический состав отливки из аустенитной коррозионностойкой стали (CCS)

Марка стали	Химический состав (%)								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Другие элементы
00Cr18Ni10	≤0,03	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	≤0,04	≤0,04	16,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0	—
0Cr18Ni9	≤0,08	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	≤0,04	≤0,04	16,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0	—
00Cr17Ni14Mo3	≤0,03	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	≤0,04	≤0,04	16,0 – 21,0	2,0 – 3,0	9,0 – 13,0	—
0Cr18Ni9Ti	≤0,08	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	≤0,04	≤0,04	16,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0	5C ≤ Ti ≤ 0,70
1Cr18Ni11Nb	≤0,06	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	≤0,04	≤0,04	16,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0	8C ≤ Nb ≤ 0,90

Американским бюро судоходства разрешено к применению 9 типов коррозионностойких сталей для производства отливок, что почти в два раза превышает количество типов сталей, разрешенных к применению другими исследованными КО. В целом можно отметить, что все КО рекомендуют к применению для производства отливок следующие коррозионностойкие стали: 304, 304L, 316, 316L, 317, 317L, 347. Национальные аналоги этих сталей: 08X18H10T, 12X18H10T, 03X17H14M3, 10X17H13M3T.

Таблица 5

Химический состав отливок (пределы) из коррозионностойкой стали (DNV)

Тип стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
GX 2 CrNi 18 10 (304L)	0,03	2,0	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	—	8,0 – 12,0
GX 5 GrNi 19 9 (304)	0,08	2,0	1,5	0,040	0,030	18,0 – 21,0	—	8,0 – 11,0
GX 6 CrNiNb 19 10 (347)	0,08	2,0	1,5	0,040	0,030	18,0 – 21,0	—	9,0 – 12,0
GX 2 CrNiMo 19 11 2 (316L)	0,03	1,5	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	2,0 – 3,0	9,0 – 13,0
GX 5 CrNiMo 19 11 2 (316)	0,08	1,5	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	2,0 – 3,0	9,0 – 12,0
GX 5 CrNiMo 19 11 3 (317)	0,08	1,5	1,5	0,040	0,030	17,0 – 21,0	3,0 – 4,0	9,0 – 13,0

Коррозионностойкие стали, которые используются для изготовления отливок и описанные в Бюро Веритас (Bureau Veritas), предназначены для изготовления грузовых танков, сосудов, работающих под давлением и трубопроводной арматуры для химических реактивов и/или эксплуатации при низких температурах, а также литья и ремонта новых гребных винтов и лопастей. Требования к химическому составу и механическим свойствам упомянутых марок могут быть использованы при ремонте и проверке воздушных винтов, поврежденных в процессе эксплуатации.

Составы отливок из аустенитной коррозионностойкой стали, приведенные в Правилах постройки судов Китайского КО, применяются к стали для трубопроводных систем, используемых в условиях низких температур (где расчетная температура не ниже – 165 °С, например, на судах для перевозки сжиженного газа) и требующих коррозионной стойкости (например, на танках для перевозки химических веществ).

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

К основным механическим свойствам, определяемым при производстве отливок, относятся твердость, прочность, пластичность (вязкость), усталость, износостойкость и др. К литым заготовкам в настоящее время предъявляются высокие требования по усталостной прочности, износостойкости, коррозионной стойкости, плотности, пластическим и другим физико-механическим свойствам [2, 10]. Требования к механическим свойствам отливок из коррозионностойкой стали Американского бюро судоходства указаны в табл. 6.

По правилам Индийского регистра судоходства образцы для механического испытания на растяжение должны быть изготовлены из материала, представляющего каждую отливку или партию отливок. Кроме того, если отливки предназначены для изготовления оборудования для перевозки сжиженного газа, где расчетная температура ниже – 55 °С, необходимо подготовить один комплект из трех образцов для испытания на ударный изгиб по Шарпи. В табл. 7 представлены механические свойства отливок из аустенитной нержавеющей стали согласно Индийскому регистру судоходства и Итальянскому морскому регистру.

Таблица 6

Требования к механическим свойствам отливок из коррозионностойкой стали (ABS)

Сорт			Предел прочности, МПа (ksi), мин.	Предел текучести, МПа (ksi), мин. $R_{p0,2}$	Удлинение, 50 мм, % мин.	Испытание на ударный изгиб по Шарпи	
Тип	Национальный стандарт	Марка отливки				Средняя энергия (Дж)	Тестовая температура °C
Аустенитная коррозионностойкая сталь							
304	J92600	CF8; CF8A	485 (70)	205 (30)	35	41	– 196
304L	J92500	CF3; CF3A	485 (70)	205 (30)	35		
316	J92900	CF8M	485 (70)	205 (30)	30		
316L	J92800	CF3M	485 (75)	205 (30)	30		
317	J93000	CG8M	515 (75)	240 (45)	25		
317L	J92288	CG3M	515 (75)	240 (35)	25		
347	J92710	CF8C	485 (70)	205 (30)	30		
Ферритно-аустенитная дуплексная коррозионностойкая сталь							
2205	J92202 (S31803)	CD3MN-4A	620 (90)	415 (60)	25	41	– 20
2507	J93404	CE3MN-5A	690 (100)	515 (75)	18		

Таблица 7

Механические свойства отливок из аустенитной коррозионностойкой стали (IRS, RINA)

Тип стали	Предел прочности, R_m (н/мм ²) мин.	Предел текучести, $R_{p1,0}$ (н/мм ²) мин.	Удлинение на $5,65\sqrt{s_0}$, (%) мин.	Относительное сужение, Z (%) мин.	Испытание на ударный изгиб по Шарпи	
					Температура (°C)	Энергия (Дж)
304L	430	215	26	40	– 196	41
304	480	220	26	40	– 196	41
316L	430	215	26	40	– 196	41
317	480	240	26	40	– 196	41
347	480	215	22	35	– 196	41

В правилах о материалах Бюро Веритас установлены требования к механическим свойствам отливок из коррозионностойкой стали (табл. 8). Из каждого испытываемого образца необходимо отобрать один образец испытания на растяжение и три образца для испытания на ударный изгиб по Шарпи. Если не оговорено иное, испытания на удар аустенитных марок должны проводиться при расчетной температуре ниже – 105 °C и при температуре – 196 °C. В случае использования отливок для производства изделий, используемых для транспортировки и хранения сжиженных газов, применяются следующие условия:

- испытания на удар необходимы для отливок из стали марок 316 и 316L (содержащих молибден) независимо от расчетной температуры и должны проводиться при температуре – 196 °C. Сокращение количества испытаний может быть разрешено при расчетных температурах выше – 60 °C по согласованию Бюро Веритас;
- испытания на удар необходимы для отливок из стали марок 304, 304L, 321 и 347 при расчетной температуре ниже – 60 °C и должны проводиться при – 196 °C.

Таблица 8

Механические свойства (BV)

Обозначение марки	Предел текучести $R_{p1,0}$ (н/мм ²) мин.	Предел прочности R_m (н/мм ²) мин.	Удлинение A_5 (%) мин.	Относительное сужение, Z мин. (%)	Средняя энергия удара мин KV при – 196 °C
304L	215	430	26	40	41
304	220	480	26	40	41
316L	215	430	26	40	41
316	240	480	26	40	41
347	215	480	22	35	41

В требованиях к материалам и сварке Китайского КО указано, что из каждой отливки или партии отливок должно быть приготовлено не менее одного образца для испытаний. Из каждого испытательного образца следует вырезать не менее одного образца для испытания на растяжение. Если отливки предназначены для работы со сжиженным газом и расчетная температура ниже, чем – 55 °C, также необходимо взять один комплект из трех образцов для испытания на ударный изгиб по Шарпи, если этого требует China Classification Society. Механические свойства отливок должны соответствовать требованиям, приведенным в табл. 9.

Таблица 9

Механические свойства отливок из коррозионностойкой стали (CCS)

Марка стали	Предел прочности (н/мм ²) мин.	Предел текучести (н/мм ²) мин.	Удлинение A_5 (%) мин.	Относительное сужение, Z мин. (%)	Испытание на ударный изгиб по Шарпи	
					Температура испытания (°C)	Средняя энергия, Дж мин
00Cr18Ni10	400	200	26	40	– 196	41
0Cr18Ni9	440	220	26	40	– 196	41
00Cr17Ni14Mo3	430	215	26	40	– 196	41
0Cr18Ni9Ti	480	240	22	35	– 196	41
1Cr18Ni11Nb	480	240	22	35	– 196	41

Норвежский морской регистр указывает на следующие механические свойства отливок из коррозионностойкой стали согласно табл. 10.

Таблица 10

Механические свойства отливок из коррозионностойкой стали (DNV)

Тип стали	Предел текучести $R_{p0,2}$ мин. (н/мм ²)	Предел прочности R_m (н/мм ²) мин.	Удлинение A_5 (%) мин.	Испытание на ударный изгиб по Шарпи	
				Температура (°C)	Энергия (Дж)
GX 2 CrNi 18 10 (304L)	180	440	30	– 196	41
GX 5 GrNi 19 9 (304)	180	440	30	– 196	41
GX 6 CrNiNb 19 10 (347)	180	440	25	– 196	41
GX 2 CrNiMo 19 11 2 (316L)	180	440	30	– 196	41
GX 5 CrNiMo 19 11 2 (316)	180	440	30	– 196	41

3. ДЕФЕКТЫ

При литье по выплавляемым моделям поверхности тонкостенных отливок из нержавеющей высокохромистых сталей часто поражены специфическими точечными дефектами. Наличие такого вида дефектов на поверхности отливок снижает чистоту поверхности, ухудшает товарный вид литой заготовки [11]. Китайское классификационное общество классифицирует дефекты отливок по объему сварочного ремонта:

1) капитальным ремонтом считается ремонт, глубина которого превышает 25 % толщины стенки или 25 мм, в зависимости от того, что меньше, или когда общая площадь сварного шва на отливке превышает 2 % поверхности отливки, с учетом того, что если ширина расстояния между двумя сварными швами меньше их средней ширины, то их следует рассматривать как один сварной шов;

2) мелким ремонтом считается ремонт, при котором общая площадь сварного шва (длина × ширина) превышает 500 мм²;

3) косметический ремонт — это все остальные сварные швы, не включенные в пункты (1) и (2) выше.

В требованиях Американского бюро судоходства указано, что дефекты следует считать незначительными, если полость, подготовленная к сварке, имеет глубину не более 20 % фактической толщины стенки, но ни в коем случае не более 25 мм и не имеет линейных размеров, превышающих более чем в четыре раза толщину стенки. Неглубокие канавки или углубления, образовавшиеся в результате устранения дефектов, допускаются при условии, что они не приводят к заметному снижению прочности отливки. Образовавшиеся канавки или углубления впоследствии следует зашлифовать и убедиться в полном удалении дефектного материала с помощью капиллярной жидкости. Ремонт мелких дефектов, требующих сварки, следует рассматривать как ремонт сваркой и устранять в соответствии с утвержденной процедурой. Незначительные дефекты в критических местах следует рассматривать и устранять так же, как и крупные дефекты.

Дефекты могут быть устранены шлифованием или скалыванием при условии сохранения приемлемых размеров детали. Получающиеся в результате канавки должны иметь радиус дна, в три раза превышающий глубину канавки, и должны сливаться с окружающей поверхностью, чтобы избежать резких контуров. Полное устранение дефектного материала должно быть подтверждено методом капиллярного контроля.

Ремонт отливок сваркой должен получить предварительное одобрение Американского бюро судоходства. В таких случаях на утверждение должны быть представлены полные сведения об объеме и месте ремонта, предлагаемой процедуре сварки, термообработке и последующих процедурах контроля.

Индийским бюро судоходства также определены требования к термообработке отливок из коррозионностойкой стали. Тип применяемой термообработки будет зависеть от химического состава отливки, а также размеров, положения и характера ремонта и не должен влиять на свойства отливки. По предварительному согласованию с Индийским бюро судоходства особое внимание может быть уделено отказу от термообработки после сварки или использованию термообработки для снятия локальных напряжений, если ремонтируемый участок небольшой. По завершении термообработки ремонтные швы и прилегающий материал должны быть отшлифованы и проверены магнитопорошковым методом или капиллярным методом. В зависимости от размеров и характера исходного дефекта может быть проведено дополнительное ультразвуковое или рентгенографическое исследование.

Дефекты отливок, которые могут ухудшить их эксплуатационные характеристики, например крупные неметаллические включения, усадочные полости, дыры и трещины, не допускаются. Они могут быть удалены одним из разрешенных КО способов и отремонтированы.

К литым заготовкам в настоящее время предъявляются высокие требования по усталостной прочности, износостойкости, коррозионной стойкости, плотности, пластическим и другим физико-механическим свойствам. В табл. 11 представлены сводные данные по химическому составу отливок из коррозионностойких сталей, рекомендованных иностранными КО.

Таблица 11

Сводная таблица требований к химическому составу отливок из коррозионностойкой стали

Марка стали	Химический состав								
	C _{макс}	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Другие
304	Американское бюро судоходства								
	0,08	2,00	1,50	0,04	0,03	18,0 – 21,0	8,0 – 11,0	0,50	—
	Итальянский морской регистр и Бюро Веритас								
	0,08	1,50	2,0	0,04	0,03	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
	Индийский регистр судоходства								
	0,08	0,20 – 1,50	0,5 – 2,0	0,04	0,04	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
	Норвежский Веритас								
	0,08	2,0	1,5	0,04	0,03	18,0 – 21,0	8,0 – 11,0	—	—
0Cr18Ni9	Китайский морской регистр								
	0,08	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	0,04	0,04	16,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
304L	Американское бюро судоходства								
	0,03	2,0	1,50	0,04	0,03	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	0,5	—
	Итальянский морской регистр и Бюро Веритас								
	0,03	1,50	2,0	0,04	0,03	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
	Индийский регистр судоходства								
	0,03	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	0,04	0,04	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
	Норвежский Веритас								
	0,03	2,0	1,05	0,04	0,04	17,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—
00Cr18Ni10	Китайский морской регистр								
	0,03	0,20 – 1,50	0,50 – 2,0	0,04	0,04	16,0 – 21,0	8,0 – 12,0	—	—

Продолжение — табл. 11

Марка стали	Химический состав								
	C _{макс}	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Другие
316	Американское бюро судоходства								
	0,08	2,0	1,50	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
	Итальянский морской регистр и Бюро Веритас								
	0,08	1,50	2,0	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
	Индийский регистр судоходства								
	0,08	0,20 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
	Норвежский Веритас								
	0,08	1,50	1,5	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 12,0	2,0 — 3,0	—
316L	Американское бюро судоходства								
	0,03	1,50	1,50	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
	Итальянский морской регистр и Бюро Веритас								
	0,03	1,50	2,0	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
	Индийский регистр судоходства								
	0,03	0,20 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
	Норвежский Веритас								
	0,03	1,50	1,50	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
00Cr17Ni14Mo3	Китайский морской регистр								
	0,03	0,20 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	16,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
347	Американское бюро судоходства								
	0,08	1,50	2,0	0,04	0,03	18,0 — 21,0	9,0 — 12,0	—	Nb, $10 \times C_{\text{мин.}}, 1,00_{\text{макс.}}$
	Итальянский морской регистр и Бюро Веритас								
	0,08	1,50	2,0	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	—	$10 \times C \leq Nb \leq 0,080$
	Индийский регистр судоходства								
	0,06	0,20 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	17,0 — 21,0	9,0 — 12,0	—	$Nb \geq 8 \times C \leq 0,90$
	Норвежский Веритас								
	0,08	2,0	1,5	0,04	0,03	18,0 — 21,0	9,0 — 12,0	—	—
1Cr18Ni11Nb	Китайский морской регистр								
	0,06	0,20 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	16,0 — 21,0	8,0 — 12,0	—	$8C \leq Nb \leq 0,09$
317	Американское бюро судоходства								
	0,08	1,50	1,50	0,04	0,03	18,0 — 21,0	9,0 — 13,0	3,0 — 4,0	—
	Индийский регистр судоходства								
	0,08	0,20 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	17,0 — 21,0	9,0 — 12,0	3,0 — 4,0	—
	Норвежский Веритас								
	0,08	1,50	1,50	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	3,0 — 4,0	—
317L	Американское бюро судоходства								
	0,03	1,50	1,50	0,04	0,03	18,0 — 21,0	9,0 — 13,0	3,0 — 4,0	—

Окончание — табл. 11

Марка стали	Химический состав								
	C _{макс}	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Другие
321 0Cr18Ni9Ti	Китайский морской регистр								
	0,08	2,0 — 1,50	0,50 — 2,0	0,04	0,04	16,0 — 21,0	8,0 — 12,0	—	5C ≤ Ti ≤ 0,70
2205	Американское бюро судоходства								
	0,03	1,0	1,50	0,035	0,02	21,0-23,0	4,5 — 6,5	2,50 — 3,50	N: 0,15 — 0,20
2507	Американское бюро судоходства								
	0,03	1,0	1,50	0,035	0,02	24,0 — 26,0	6,0 — 8,0	2,50 — 3,50	N: 0,10 — 0,30

Анализ требований зарубежных КО к отливкам из коррозионностойких сплавов на основе железа и их внедрение в нормативные документы РС позволит предъявлять обоснованные требования к изготовлению данных материалов для объектов наблюдения РС с соответствующим уровнем надежности. Для изготовления элементов грузовых цистерн и трубопроводной арматуры на судах, перевозящих химические вещества целесообразно рекомендовать РС применять следующие марки стали, приведенные в табл. 12.

Для изготовления отливок из коррозионностойких сталей.

Таблица 12

Химический состав отливок из коррозионностойких сплавов, на основе железа

Марка стали (AISI/UNS)	Химический состав, %								
	C max	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	Ni	Mo	Другие
304L	0,03	2,0	1,5	0,04	0,03	17,0 — 21,0	8,0 — 12,0	—	—
304	0,08	2,0	1,5	0,04	0,03	17,0 — 21,0	8,0 — 12,0	—	—
316L	0,03	2,0	1,5	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
316	0,08	2,0	1,5	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	2,0 — 3,0	—
321	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	17,0 — 19,0	9,0 — 12,0	—	Ti ≥ 5 × C ≤ 0,07
347	0,08	2,0	1,5	0,04	0,03	17,0 — 21,0	9,0 — 13,0	—	10 × C ≤ Nb ≤ 0,080
Марка стали (национальная)									
03X17H14M3	0,03	1,0 — 2,0	0,4	0,03	0,02	16,8 — 18,3	13,5 — 15,0	2,2 — 2,8	—
12X18H10T	0,12	2,0	0,8	0,035	0,02	17,0 — 19,0	9,0 — 11,0	—	Ti (5C — 0,8)
08X18H10T	0,08	2,0	0,8	0,035	0,02	17,0 — 19,0	9,0 — 11,0	—	Ti (5C — 0,7)
10X17H13M3T	0,1	2,0	0,8	0,035	0,02	16,0 — 18,0	12,0 — 14,0	3,0 — 4,0	Ti (5C — 0,7)

ВЫВОДЫ

Приведенные в статье результаты могут применяться в технологиях судоремонта и судостроения. Показано, что французское Бюро Веритас рекомендует к использованию ограниченное число марок коррозионностойких литейных сталей. Американское бюро судоходства допускает к использованию более широкий перечень литейных коррозионностойких сталей (аустенитные и аустенитно-ферритные дуплексные стали), но предъявляет строгие требования и ограничения к применению и тестированию этих сталей. Сравнив требования различных КО, были предложены марки коррозионностойких сталей для изготовления отливок с целью разработки текста требований для внесения корректировок в главу 3.16 части XIII Правил классификации и постройки морских судов РС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также ФАУ «Российский морской регистр судоходства», договор на выполнение НИР № 23-51332 «Разработка требований к отливкам из коррозионностойких сплавов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков А.А. Коррозионностойкие стали и сплавы / А.А. Бабаков, М.В. Приданцев. — М.: Metallurgiya, 1971. — 320 с.
2. Марукович Е.И. Литейные сплавы и технологии / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко. — Минск: Белорусская наука, 2022. — 442 с.
3. Гришина Е. Проблема классификации стали в России и Европе / Е. Гришина // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. — 2008. — Т. 40, № 3. — С. 31 — 35.
4. Requirements for Materials and Welding for Stainless Steels / American Bureau of Shipping. — 2022. — 150 p.
5. Rules for the Classification of Ship / Registro Italiano Navale. — 2023. — 308 p.
6. Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units / Bureau Veritas. — 2024. — 368 p.
7. Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Ships / Indian Register of Shipping. — 2023. — 2291 p.
8. Rules for materials and welding / China Classification Society. — 2021. — 325 p.
9. Metallic Materials: Offshore Standard DNV-OS-B101 / Det Norske Veritas AS. — 2012. — 61 p.
10. Картонова Л.В. Выбор материалов и способов изготовления изделий: уч. пос. / Л.В. Картонова, В.А. Кечин. — Владимир: ВлГУ, 2022. — 160 с.
11. Чиждова Е.В. Моделирование процесса литья нержавеющей сталей с целью снижения точечных поверхностных дефектов отливок / Е.В. Чиждова, П.Н. Цибизов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. — 2014. — Т. 12, № 4. — С. 167 — 173.
12. Knisz J. Microbiologically influenced corrosion — more than just microorganisms / J. Knisz, R. Eckert, L.M. Gieg, A. Koerdet et al. // FEMS Microbiology Reviews. — 2023. — Vol. 47, No. 5. — DOI 10.1093/femsre/fuad041.

REFERENCES

1. Babakov A.A., Pridancev M.V. Korrozionnostojkie stali i splavy [Corrosion-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 320 p.
2. Marukovich E.I., Karpenko M.I. Litejnye splavy i tekhnologii [Casting alloys and technologies]. Minsk: Belorusskaya navuka, 2022. 442 p.
3. Grishina E. Problema klassifikatsii stali v Rossii i Evrope [The problem of steel classification in Russia and Europe]. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty* [Metalworking: technology, equipment, tools]. 2008. Vol. 40, No. 3. P. 31 — 35.
4. American Bureau of Shipping. Requirements for Materials and Welding for Stainless Steels, 2022. 150 p.
5. Requirements for Materials and Welding for Stainless Steels / American Bureau of Shipping. 2022. 150 p.
5. Rules for the Classification of Ship / Registro Italiano Navale. 2023. 308 p.
6. Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units / Bureau Veritas. 2024. 368 p.
7. Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Ships / Indian Register of Shipping. 2023. 2291 p.
8. Rules for materials and welding / China Classification Society. 2021. 325 p.
9. Metallic Materials: Offshore Standard DNV-OS-B101 / Det Norske Veritas AS. 2012. 61 p.
10. Kartanova L.V., Kechin V.A. Vybora materialov i sposobov izgotovleniya izdelij [Selection of materials and manufacturing methods: study guide]. Vladimir: VIGU, 2022. 160 p.
11. Chizhova E.V., Tsibizov P.N. Modelirovanie processa lit'ya nerzhavayushchikh staley s tsel'yu snizheniya tochechnykh poverhnostnykh defektov otlivok [Modeling the stainless-steel casting process to reduce point surface defects in castings]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society]. 2014. Vol. 12, No. 4. P. 167 — 173.
12. Knisz J., Eckert R., Gieg L.M., Koerdet A. et al. Microbiologically influenced corrosion — more than just microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*. 2023. Vol. 47, No. 5. DOI 10.1093/femsre/fuad041.

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 40 000 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 (проблема, решение и т.п.). 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 BSI).

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 язык статьи (In Russ.).

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. P. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziologia [Neurophysiology]*. 1971. No. 3. P. 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 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 [Mineral Resources of Russia. Economics and Management]*. 2006. No. 5. (In Russ.) URL: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/> (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Experimental study of the strength of joints "steelcomposite". *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem" [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"]*. 2006, No. 593. P. 125 — 130. (In Russ.)

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. P. 267 — 272. (In Russ.)

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichstva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://sbornik.rs-class.org/jour>.

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 — 11, 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 коллективом Филиала РС по атомным судам

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 79

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

Подписано в печать 16.07.2025. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 20,7. 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/