

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ПОРТОВЫЕ БУКСИРЫ С АККУМУЛЯТОРАМИ
БЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СУДОВ
ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ
ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ МОРСКОГО СУДОХОДСТВА:
ТЕНДЕНЦИИ И ВЫЗОВЫ

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

ПЕРСПЕКТИВЫ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
В СУДОСТРОЕНИИ

УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ



Т. 56, № 1
март
2026

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

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

Электронная версия доступна по адресу: <https://sbomik.rs-class.org/jour>.
Журнал включен в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru, Реферативный журнал и фонд научно-технической литературы ВИНТИ РАН, международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory.

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

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

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

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher: Russian Maritime Register of Shipping (RS)
Editor-in-Chief: Mikhail Kuteynikov. E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org
ISSN 2223-7097

Editorial board

Alexey O. Berezin — Chairman of Editorial Board, DSc, Deputy Director General, RS
Maxim S. Boyko — Cand. Tech. Sc., Deputy Chairman, RS
Alexander S. Bolshev — DSc, Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University
Andrey V. Grigoriev — Cand. Tech. Sc., Assoc. Prof., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (SUMIS)
Alexander A. Ivanchenko — DSc, Prof., Head of the Dep. of ICE and Automation of Marine Power Plants, SUMIS
Alexey V. Ilin — DSc, Assoc. Prof., Deputy General Director and Head of the Research and Production Center, NRC Kurchatov Institute, CRISM Prometei
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. Rozhdstvenskiy — DSc, Prof., Director of the Dep. of International Cooperation, SMTU
Anatolii 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 Prometei
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://sbomik.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

Том 56, № 1

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
2026



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

<i>Назаров А.Г., Королев С.А., Пентегов А.С.</i> Обеспечение безопасности пассажиров и экипажа малых высокоскоростных судов по ускорениям при столкновениях: анализ травматизма, математическое и численное моделирование, нормативные рекомендации	4
<i>A.G. Nazarov, S.A. Korolev, A.S. Pentegov</i> Ensuring passenger and crew safety on small high-speed craft under collision-induced accelerations: injury analysis, mathematical and numerical modeling, and regulatory recommendations	
<i>Реуцкий А.С., Буцанец А.А.</i> Декарбонизация морского судоходства: тенденции, регуляторные инструменты, альтернативные топлива, вызовы и достижение нулевых выбросов	17
<i>A.S. Reutskii, A.A. Butsanets</i> Decarbonization of maritime shipping: trends, regulatory instruments, alternative fuels, and challenges in achieving net-zero emissions	
<i>Реуцкий А.С., Семионичев Д.С.</i> Международные и национальные стратегии декарбонизации водного транспорта: анализ мер и тенденций глобальной трансформации	38
<i>A.S. Reutskii, D.S. Semionichev</i> International and national strategies for decarbonization of water transport: analysis of measures and trends of global transformation	
<i>Реуцкий А.С.</i> Анализ свойств, характеристик и особенностей водорода в газовой и жидкой фазах для обеспечения безопасной морской транспортировки	61
<i>A.S. Reutskii</i> Analysis of properties, characteristics and features of hydrogen in gas and liquid phases to ensure safe sea transportation	
<i>Реуцкий А.С.</i> Определение степени реализуемости климатического проекта замены флота портовых буксиров-кантовщиков на суда с электрической энергетической установкой, оборудованной аккумуляторными накопителями электроэнергии	77
<i>A.S. Reutskii</i> Determination of the feasibility of a climate project for the transfer of port tugboats to a fully electric power plant equipped with accumulators of electric power	

УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ SEA TRANSPORT MANAGEMENT

<i>Реуцкий А.С., Бабчук Е.В., Родионов Н.Ю., Березин А.О.</i> Проблемы развития Северного морского пути	91
<i>A.S. Reutskii, E.V. Babchuk, N.Yu. Rodionov, A.O. Berezin</i> Problems of the development of the Northern Sea Route: An Overview	

**МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ
SEAWORTHINESS**

- Яковлев А.Ю., Кадомцева А.Б., Ермолаева Е.В., Бережная М.А., Чепурко С.И.* Разработка методики гидродинамического расчета подруливающих устройств тоннельного типа 110
A.Yu. Yakovlev, A.B. Kadomtseva, E.V. Ermolayeva, M.A. Berezhnaya, S.I. Chepurko Development of a method for hydrodynamic calculation of tunnel thrusters

**ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES**

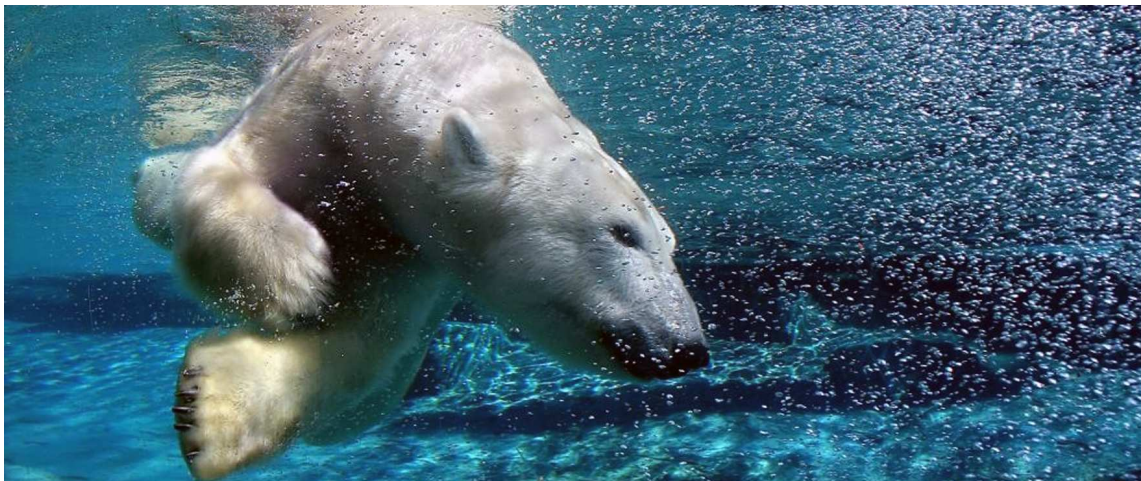
- Кузнецов Э.А.* Сравнительный анализ требований классификационных обществ к толщине бортовой обшивки 124
E.A. Kuznetsov Comparative analysis of classification societies' requirements for thickness of side shell plating

**МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА
MATERIALS AND WELDING**

- Фатьянова Н.В.* Сравнительная оценка защитной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 в условиях морской эксплуатации 133
N.V. Fatyanova Comparative assessment of the protective effectiveness of standard and nanomodified PF-115 coatings under marine service conditions
- Косырева (Князюк) Т.В., Фомина О.В., Ильин А.В., Кордонец С.М.* Перспективы развития аддитивного производства в судостроении 144
T.V. Kosyreva (Knyazyuk), O.V. Fomina, A.V. Il'in, S.M. Kordonets Prospects for the development of additive manufacturing in shipbuilding

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

- Бессонов С.В., Жуков В.А.* Экологические аспекты использования и производства альтернативных топлив для судовых энергетических установок 159
S.V. Bessonov, V.A. Zhukov Environmental aspects of the use and production of alternative fuels for marine power plants
- Аносов А.П., Бессонова В.О.* К расчету прочности элементов рулей изменяемого профиля. Определение расчетных нагрузок 171
A.P. Anosov, V.O. Bessonova To calculate the strength of the steering elements of a variable profile. Determination of design



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.12
EDN DSZKDO

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПассаЖИРОВ И ЭКИПАЖА МАЛЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СУДОВ ПО УСКОРЕНИЯМ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ: АНАЛИЗ ТРАВМАТИЗМА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, НОРМАТИВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

А.Г. Назаров, канд. техн. наук, ООО «АН Марин Консалтинг», 107113 Россия, Москва, ул. Шумкина, 20, стр. 1, пом. X/4, email: anmarineconsulting@ya.ru

С.А. Королев, инженер-конструктор, «АН Марин Консалтинг», 107113 Россия, Москва, ул. Шумкина, 20, стр. 1, пом. X/4, email: sk.anmarineconsulting@ya.ru

А.С. Пентегов, инженер-исследователь, «АН Марин Консалтинг», 107113 Россия, Москва, ул. Шумкина, 20, стр. 1, пом. X/4, email: ap.anmarineconsulting@ya.ru

В статье рассматриваются вопросы обеспечения безопасности пассажиров и экипажа малых высокоскоростных судов при воздействии ускорений в эксплуатационных и аварийных режимах, включая столкновения. Показано, что характер травматизма определяется не только пиковыми значениями ускорений, но и их временными параметрами, прежде всего скоростью нарастания (рывком). Анализ статистики аварий (USCG, страны Юго-Восточной Азии) и сопоставление с автомобильным транспортом выявили, что для малых высокоскоростных судов характерны более длительные импульсы замедления (200–800 мс) и существенно меньшие значения рывка, что приводит к преобладанию внешних механических травм при относительно низкой доле хлыстовых повреждений шейного отдела позвоночника. Выполнен критический анализ международных и отечественных нормативных документов, показавший ограниченную применимость расчетных зависимостей HSC Code для судов малых размеров. Предложена одномерная модель продольного столкновения и проведено численное моделирование лобовых ударов типового 13-метрового катера с корпусами из стеклопластика, алюминия и стали. Установлено, что жесткость корпуса определяется преимущественно толщиной и механическими свойствами обшивки. Полученные результаты позволяют уточнить требования к компоновке пассажирских помещений, обосновать применение ограждающих конструкций вместо ремней безопасности при скоростях до 25–30 узлов и сформулировать предложения по развитию нормативной базы. Полученные результаты позволяют уточнить требования к компоновке пассажирских помещений, обосновать диапазон применения ремней, предложить направления совершенствования нормативной базы Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: высокоскоростные суда, малые суда, ускорения, безопасность, столкновение.

Для цитирования: Назаров А.Г. Обеспечение безопасности пассажиров и экипажа малых высокоскоростных судов по ускорениям при столкновениях: анализ травматизма, математическое и численное моделирование, нормативные рекомендации / А.Г. Назаров, С.А. Королев, А.С. Пентегов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — Т. 56, № 1. — С. 4–16. — EDN DSZKDO.

ENSURING PASSENGER AND CREW SAFETY ON SMALL HIGH-SPEED CRAFT UNDER COLLISION-INDUCED ACCELERATIONS: INJURY ANALYSIS, MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODELING, AND REGULATORY RECOMMENDATIONS

A.G. Nazarov, PhD, AN Marine Consulting, 107113 Russia, Moscow, ul. Shumkina, 20, str. 1, pom. X/4, email: anmarineconsulting@ya.ru

S.A. Korolev, Design Engineer, AN Marine Consulting, 107113 Russia, Moscow, ul. Shumkina, 20, str. 1, pom. X/4, email: sk.anmarineconsulting@ya.ru

A.S. Pentegov, Research Engineer, AN Marine Consulting, 107113 Russia, Moscow, ul. Shumkina, 20, str. 1, pom. X/4, email: ap.anmarineconsulting@ya.ru

The paper addresses safety issues of passengers and crew on small high-speed craft subjected to accelerations under operational and emergency conditions, including collisions. It is shown that injury patterns are determined not only by peak acceleration values but also by their temporal characteristics, primarily the rate of acceleration increase (jerk). Analysis of accident statistics (USCG and Southeast Asia) and comparison with road transport indicate that small high-speed craft are characterized by longer deceleration pulses (200–800 ms) and significantly lower jerk values. This results in a predominance of external mechanical injuries, such as bruises and limb fractures, with a relatively low incidence of whiplash injuries to the cervical spine. A critical review of international and national regulatory documents revealed limited applicability of HSC Code calculation methods to small craft, as predicted accelerations are often substantially overestimated. A one-dimensional longitudinal collision model is proposed, and numerical simulations of frontal impacts of a typical 13-m craft with fiberglass, aluminum, and steel hulls were performed. It was found that hull stiffness is primarily governed by shell thickness and material properties. The results enable refinement of passenger compartment layout requirements, justify ranges for use of seat belts, and provide recommendations for improving the regulatory framework of the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: *high-speed craft, small craft, accelerations, safety, collision.*

For citation: Nazarov A.G., Korolev S.A., Pentegov A.S. Ensuring passenger and crew safety on small high-speed craft under collision-induced accelerations: injury analysis, mathematical and numerical modeling, and regulatory recommendations. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 4–16. EDN DSKZDO. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростные суда (ВСС) в последние десятилетия получили широкое распространение как в коммерческой, так и в служебной и частной эксплуатации. Они используются для пассажирских перевозок, патрульных и спасательных операций, а также в профессиональной деятельности, связанной с работой в прибрежных и внутренних водах. Появление мощных малогабаритных двигателей, рост скоростей, снижение водоизмещения и широкое применение легких конструкционных материалов привели к существенному изменению динамики таких судов.

Практика эксплуатации показывает, что наиболее распространенный тип аварии таких судов — столкновения с судами и препятствиями, что помимо повреждений корпуса и т.д. вызывает неблагоприятное воздействие ускорений на человека. Статистические данные свидетельствуют о высокой доле травм, связанных с воздействиями ускорений, в том числе при столкновениях и движении на волнении. Особенно уязвимыми оказываются пассажиры и члены экипажа, не имеющие адекватных средств удержания туловища.

В связи с введением впервые в практике РС требований к малым ВСС следует тщательно анализировать аварии судов рассматриваемого типа, в том числе происходящие за рубежом, где такие суда более распространены. К сожалению, подобные аварии не обходятся без человеческих жертв. На рис. 1 показаны последствия столкновения малого ВСС Rapan-5 с другим скоростным судном. На борту были граждане РФ — 20 человек госпитализировано с травмами, двое детей, сидевших в носовой части судна, погибли. Причинами трагедии являются, несомненно, ошибки судоводителя при движении в узкости и в не меньшей степени субстандартная компоновка и конструкция судна, размещение пассажиров боком к направлению движения, а также в носовой части. Удивительно, что несколькими годами ранее в том же месте произошла аналогичная авария с катамараном также из композитного материала, но благодаря отсутствию пассажиров в носовой повреждаемой зоне и размещению сидений лицом вперед никто не пострадал (см. [1]). Статистика, собранная в Юго-Восточной Азии [2], свидетельствует, что при аварии «спидботов» с традиционным продольным размещением пассажиров в случае столкновения травмы получает около 70 % находящихся на борту людей. В РФ подобные исследования на ВСС ранее не выполнялись, и данные по аварийности и травматизму

не опубликованы, хотя существующие методики [3, 4] могут быть использованы для моделирования столкновений ВСС.



Рис. 1. Последствия аварии «спидботов» на о. Пхукет в феврале 2020 г.:
а — общий вид судна; б — носовая зона повреждения, показано разрушение конструкции¹

Целью настоящей статьи является повышение безопасности малых ВСС, для чего поставлены и решены следующие задачи: выполнен анализ особенностей травматизма, обозначены опасные случаи ускорений, проанализированы действующие нормативы, рассмотрены методы оценки ускорений, выполнено численное моделирование столкновений малого ВСС, выполнено сравнение безопасности ВСС с другими видами транспорта.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Особенности травматизма при авариях на малых ВСС

Для наземного и особенно легкового автомобильного транспорта при столкновениях характерно преобладание повреждений шейного отдела позвоночника, что обусловлено реализацией коротких по времени импульсов замедления с высоким значением «рывка», приводящих к хлыстовому механизму травмы. С другой стороны, статистические данные по авариям на судах малых размеров, в частности по материалам USCG [5], демонстрируют иную структуру травматизма, несмотря на значительную долю столкновений — более 55 % среди всех аварийных событий.

Ключевым фактором, определяющим тип травм, является временная структура ускорения, а не только его пиковая величина, что можно охарактеризовать скоростью нарастания ускорения («рывком») j :

$$j(t) = da(t)/dt.$$

Для судов малых размеров длительность импульса ускорения Δt составляет 200–800 мс, а величина «рывка» составит:

$$j \approx a_{peak} / \Delta t \sim 1-10 \text{ м/с}^3.$$

При этом значительная часть энергии рассеивается за счет гидродинамического сопротивления воды, разрушения конструкции, относительного движения судна и человека как единой инерционной системы. При этом даже при сопоставимом изменении скорости системы «тело — транспортное средство» Δv , критерий повреждения позвоночника S_{edb} , определяемый по ISO 2631-5 [6], в авариях малых ВСС намного меньше, чем в автомобильных:

$$S_{ed}^{marine} \ll S_{ed}^{auto}.$$

Биомеханические последствия столкновения малых ВСС таковы, что при меньших значениях «рывка» отсутствует выраженное инерционное «отставание» головы, не формируется классический хлыстовый механизм травмы шеи, а травмирующее воздействие выражено в виде падений и ударов о элементы конструкции. Это приводит к статистическому преобладанию ран и порезов (22,2 %), переломов конечностей (20,7 %), ушибов и ссадин (12,8 %) и относительно малой доле повреждений позвоночника (1,3%), что и наблюдается в

¹ Все использованные в статье иллюстрации предоставлены авторами.

официальной статистике аварий [5]. Следует отметить, что с ростом скорости движения при резких остановках структура травматизма на ВСС может начать сближаться с автомобильной.

Таким образом, различия в статистике травм между ВСС и другими видами транспорта обусловлены различиями в динамических характеристиках ускорений. Инерционность системы «судно — пассажиры» и меньшие значения «рывка» приводят к смещению доминирующего механизма повреждений от шейного отдела к внешним механическим травмам, что должно учитываться при выборе подходов к обеспечению безопасности.

Классификация ускорений

Линейные ускорения, воздействующие на человека на борту ВСС, могут быть разложены на три взаимно перпендикулярные составляющие. Продольные ускорения возникают преимущественно при разгоне и торможении и при ударных взаимодействиях корпуса с водной поверхностью или препятствиями; поперечные — при маневрировании, а вертикальные — при движении на волнении и в некоторых случаях столкновений. Наиболее опасны с точки зрения травматизма ускорения:

- вертикальные — при движении на волнении, и связаны, например, с повреждениями позвоночника и коленных суставов. Эти ускорения характерны прежде всего для судов для профессионального использования (служебных, спасательных), которые вынуждены поддерживать высокую скорость во время миссии. Для пассажирских судов они не характерны, поскольку в правилах классификационных обществ (КО) существуют ограничения по выбору эксплуатационной скорости, а связаны лишь с комфортом пассажиров;
- горизонтальные — при столкновениях в аварийных ситуациях; на пассажирском судне они приводят к падениям и травмам пассажиров.

Таблица 1

Сравнение механизмов травматизма: автомобильный и высокоскоростной водный транспорт

Параметр / аспект	Автомобильный транспорт	Водный транспорт (малые ВСС)
Тип аварийного события	Столкновение, резкое торможение	Столкновение, удар о препятствие
Характер импульса ускорения	Короткий, жесткий	Более длительный, «мягкий»
Длительность импульса Δt	20–100 мс	200–800 мс
Пиковое ускорение a_{peak}	Высокое (5–20 g и более)	Умеренное — высокое (0,3–6 g)
Скорость нарастания (рывок) m/c^3	Очень высокая: 10^2 – 10^4	Низкая — умеренная: 1–10
Инерционное рассогласование «голова — тело»	Выраженное	Слабое или умеренное
Доминирующий биомеханизм травмы	Хлыстовая травма	Падение / удар о конструкцию
Критерий S_{ed} (ISO 2631-5)	Часто $S_{ed} > 0,8$ –1,0	Чаще $S_{ed} < 0,8$
Преобладающие травмы	Повреждения шейного отдела, позвоночника	Раны, переломы конечностей, ушибы
Доля хлыстовых травм	Высокая	Относительно низкая
Роль среды	Жесткая среда, малая диссипация энергии	Рассеивание энергии удара
Условия перехода к тяжелым травмам шеи	Практически всегда при столкновении	Маловероятно, при высоких скоростях, столкновении

Нормальные эксплуатационный разгон и торможение, как правило (если говорить о скоростях до 30–35 уз), не достигают опасных уровней [7]. В настоящей статье рассматривается продольное ускорение при столкновении $a_x = g_{coll}$, которое как раз и определяет уровень безопасности ВСС по ускорениям и соответствующие требования к архитектуре и компоновке.

Столкновение судна с препятствием можно условно разбить на две стадии.

Стадия 1 — судно входит в контакт с препятствием, проникновение и разрушение конструкций. Стратегия обеспечения безопасности — избегать размещения людей в повреждаемых зонах.

Стадия 2 — судно практически остановилось, находящиеся на судне люди и предметы продолжают движение. На этой стадии применимы следующие стратегии обеспечения безопасности: обезопасить обитаемое пространство, ограничить перемещение людей при использовании ремней, избежать травм шеи и головы, ограничить перемещение тяжелых предметов.

Результаты, полученные на натуральных испытаниях

В работе [8] представлена серия измерений ускорений на натуральных малых судах (не на моделях) с радиоуправлением и установленными автомобильными манекенами. Хотя исследователям не удалось выполнить полную программу (в значительном диапазоне курсовых углов столкновений не срабатывали датчики акселерометров), получены ценные материалы, из которых могут быть сделаны интересные выводы:

- судно-«мишень» более уязвимо, чем судно-«пуля»;
- измеренные горизонтальные ускорения (a_x, a_y) составляют (5...8) g;
- значительная вертикальная составляющая (a_z) для малых катеров, приводящая к катапультированию пассажиров.

Исследования [8] проводились на списанных корпусах катеров с длиной корпуса около 5–6 м, оборудованных подвесными моторами. Повторить подобные эксперименты на ВСС пассажирского назначения и большего размера не представляется возможным по экономическим причинам.

Таблица 2

Сводная таблица применения ремней безопасности на различных видах транспорта

Параметр	Легковые автомобили	Авиационный транспорт	Скоростной водный транспорт
Доминирующий механизм травмы	Хлыстовой шеи, удар о интерьер	Вертикальный подброс при турбулентности	Падение, удар о элементы конструкции
Тип аварийных ускорений	Высокие ускорения, короткие импульсы, экстремальный «рывок»	Умеренные ускорения, длительный импульс	Умеренные ускорения, длительный импульс
Обязательность ремней	Обязательны всегда	Обязательны при взлете, посадке, турбулентности	Зависит от режима эксплуатации
Роль ремня безопасности	Ключевая защита от травм шеи и вторичных травм	Предотвращение отрыва и падения	Предотвращение падений и смещений
Эффективность ограждающих конструкций без ремня	Недостаточна	Недостаточна	Может быть достаточной при определенных условиях
Возможность замены ремня ограждающими конструкциями	Нет	Нет	Да, при ограниченных режимах
Тип ремня	Трехточечный	Двухточечный поясной	Трехточечный (HSC Code) Двухточечный поясной (служебные катера)
Типичные ограждающие элементы	Подголовник, салон	Спинка кресла, подлокотники	Высокая спинка, боковые упоры, поручни, конструкция впереди
Основной риск без ремня	Тяжелые травмы шеи	Удары о потолок, падения	Переломы, раны, удары головой
Практика регулирования	Жесткое нормативное требование	Международный стандарт	Требуются HSC Code; для малых ВСС — варьируется

Изучение опыта аварий [5] и указанное разделение на стадии (1 и 2) позволяет предложить рекомендации к компоновке малых ВСС (рис. 2). Следует отметить, что большинство травм люди получают именно в стадии столкновения 2.

Если говорить о снижении травматизма, часто задаваемым вопросом является необходимость применения ремней на малых ВСС. Можно утверждать, что ограждающие конструкции могут быть эквивалентной альтернативой ремней на малых ВСС при скоростях движения до 25–30 уз (табл. 2).

Экспериментальные данные показывают, что биомеханические возможности среднестатистического человека по удержанию равновесия составляют: одной рукой — при ускорениях порядка 0,3–0,8 g; двумя руками — при ускорениях до 0,6–1,6 g. При превышении этих значений резко возрастает вероятность падений, особенно при наличии дополнительных неблагоприятных факторов.

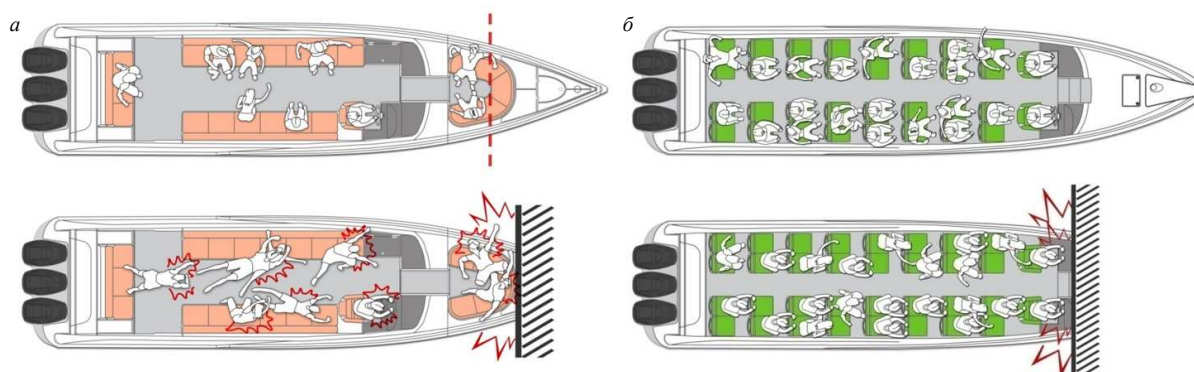


Рис. 2. Опасная (а) и безопасная (б) компоновка сидений и носовой повреждаемой зоны на малом ВСС

Подход HSC Code к безопасности по ускорениям

Исторической предпосылкой для формирования требований HSC Code [9] в части расчетных ускорений при столкновении послужили аварии высокоскоростных судов конца 1980-х гг., одной из наиболее известных среди которых является авария судна ApolloJet в Гонконге в 1989 г., когда судоводитель на скорости порядка 30 уз утратил управление, в результате чего судно выполнило неуправляемый разворот, последовательно столкнулось с двумя судами и причальным сооружением. В результате аварии погибло четыре человека, при том, что само судно было без пассажиров. Эта авария получила широкий резонанс и стала одним из катализаторов пересмотра подходов к безопасности ВСС.

Требования HSC Code можно сгруппировать следующим образом:

- заданы уровни ускорений 1 и 2 в зависимости от расчетного ускорения при столкновении g_{coll} ;
- приведены эмпирические формулы для расчета g_{coll} ;
- приведены альтернативные требования к прямому расчету ускорений — удар о недеформируемую скалу высотой 2 м, скорость удара V_{imp} составляет 0,6 от эксплуатационной V_m ;
- приведены требования к компоновке пассажирских помещений и размещению таранной переборки в зависимости от уровня ускорений (табл. 3);
- в приложениях HSC Code [9] обозначены опасные уровни ускорений для различных видов активностей, которые могут быть использованы при оценке безопасности в ходе испытаний судна.

Формулы для ускорений при столкновении g_{coll} , используемые в HSC Code [9] (в настоящей работе не воспроизводятся), были разработаны в начале 1990-х гг. в рамках работы британской и австралийской рабочих групп по высокоскоростным судам. Эти формулы не являются результатом строгого физического моделирования процессов деформации корпуса и взаимодействия судна с препятствием, а представляют собой итог некоего «политического компромисса» участников групп. В результате возникают ситуации, когда для судов с меньшей скоростью расчетные ускорения оказываются выше, чем для более быстроходных судов аналогичных размеров, что указывает на ограниченную применимость методики.

Формулы для g_{coll} , положенные в основу требований HSC Code, изначально предназначались для относительно крупных ВСС и не разрабатывались с учетом особенностей малых размерений. Применение данных формул к малым ВСС приводит к дополнительным искажениям расчетных результатов. Так, в работе [10] показано, что все суда водоизмещением до 200 т попадают в уровень ускорений 2.

Указанные обстоятельства послужили основанием для критического анализа применимости методики HSC Code к малым ВСС и стали одной из причин проведения численных исследований столкновений, результаты которых приведены в последующих разделах статьи. Полученные в ходе моделирования данные позволяют оценить степень консерватизма нормативных требований и уточнить область их обоснованного применения.

Таблица 3

Требования HSC Code [9] к компоновке пассажирского судна

Уровень ускорений	Требования к компоновке
Уровень 1: $g_{coll} < 3 g$	без ремней, диваны, любое направление сидений, столы
Уровень 2: $g_{coll} = 3-12 g$	ремни, сиденья одобренного типа лицом вперед/назад, киоски и бары в корму от переборок, багаж и т.д.

Анализ требований зарубежных и международных стандартов

SCV Code [11], разработанный ИМО для стран Карибского бассейна, признает возможность безопасной перевозки даже стоящих пассажиров на коротких маршрутах и при ограниченных уровнях ускорений, при этом определяет длину поручня и ширину сиденья на каждого пассажира.

Австралийский стандарт NSCV [12] допускает наличие стоящих пассажиров в салоне при продолжительности маршрута менее 60 минут. Интересен подход к определению положения таранной переборки в зависимости от энергетического коэффициента C_E , зависящего от полного водоизмещения, максимальной скорости и длины подразделения на отсеки.

Финский стандарт VTT [13] предусматривает обязательное наличие сиденья для каждого пассажира, однако требования к конструкции сидений и применению удерживающих устройств существенно менее жесткие.

Таблица 4

Сравнительный анализ подходов

Документ	Ориентация кресел	Ремни безопасности	Стоячие пассажиры	Жесткость требований
HSC Code [9]	Любое (Level 1) Строго в нос/корму (Level 2)	Не требуются Обязательны	Не допускаются	Очень высокая
VTT [13]	Не всегда обязательна	Нет требований	Как правило, нет	Средняя
SCV Code [11]	Допускается вариативность	Нет требований	Допускаются	Умеренная
NSCV [12]	Вариативная	Нет требований	Допускаются (≤ 60 мин)	Умеренная
ISO Small Craft [14]	Не регламентируется жестко	Нет требований	Зависит от типа судна	Базовая

Стандарт ISO 15085 [14] для малых судов прогулочного и профессионального использования ориентирован в первую очередь на нормальную эксплуатацию, а не столкновения. Вводится понятие «скоростного» судна (high-speed boat), скорость которого v определяется по формуле:

$$v \geq \max \{ 10\sqrt{L_h}; 25 \text{ уз} \}.$$

Эти суда, независимо от проектной категории, должны быть оснащены средствами опоры тела для каждого человека на борту с целью снизить риск падения человека за борт при резких поворотах, ускорениях или качке; риск падений внутри рабочей палубы или кокпита не рассматривается, приведена методика тестирования кресел. Для каждого человека должен быть выбран один из следующих вариантов:

- один поручень в сочетании с дополнительной опорой тела;
- два поручня, обеспечивающие одновременный захват обеими руками (допускается использование одного поручня, если он позволяет захват двумя руками с расстоянием между ними не менее 200 мм).

Для сидящих пассажиров опора (спинка или подлокотники) должна иметь высоту не менее 120 мм над жестким основанием сиденья или над полностью сжатой подушкой, если таковая установлена.

Для стоящих или опирающихся людей опора тела может обеспечивать поддержку только спины или туловища. При жокейской посадке опора тела может обеспечиваться за счет упора коленями.

Анализ требований различных нормативных документов (табл. 4) показывает, что HSC Code [9] (обязательный для ВСС, совершающих международные рейсы) использует наиболее консервативный и жесткий подход к обеспечению безопасности пассажиров, основанный на расчетных ускорениях при столкновении. В то же время стандарты, ориентированные специально на малые суда и реальные условия эксплуатации [11–14], допускают более гибкие решения в части размещения экипажа и пассажиров, отсутствует жесткая привязка к экстремальным аварийным сценариям столкновения.

Математическая модель столкновения судна с препятствием

Для анализа динамики судна при столкновении с неподвижным препятствием рассмотрим одномерную модель продольного движения (рис. 3). Используемый подход аналогичен методике, широко применяемой при анализе дорожно-транспортных происшествий наземного транспорта [15]. В теории столкновения автомобилей сила реакции при ударе описывается законом Гука $F=kx$, где размерный коэффициент жесткости k характеризует степень поглощения энергии деформируемых зон кузова.

Экспериментально установлено [15], что при лобовых столкновениях автомобилей коэффициент k может рассматриваться как постоянная величина для конструкции одного типа (т.е. модели автомобиля) и не зависит от скорости удара в рассматриваемом диапазоне.



Рис. 3. Система координат и схема сил, действующих на судно при столкновении

Уравнение движения судна в продольном направлении может быть записано в следующем виде:

$$(M + m_{xx}) \frac{d^2x}{dt^2} = T(v, n, r) - R(v) - kx, \quad (1)$$

где M — масса судна;

m_{xx} — присоединенная масса при движении вдоль продольной оси;

x — продольное перемещение судна;

$T(v, n, r)$ — тяга движителей, зависящая от скорости v , частоты вращения n и параметра реверсирования r ;

$R(v)$ — гидродинамическая сила сопротивления;

k — коэффициент жесткости, определяемый конструкцией корпуса.

В первом приближении примем следующие допущения:

- сила сопротивления движению R в момент удара пренебрежимо мала;
- тяга движителей T в момент контакта с препятствием отсутствует;
- присоединенная масса m_{xx} мала по сравнению с M .

С учетом указанных допущений уравнение (1) принимает вид:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \quad (2)$$

Решение уравнения движения (2) для начальных условий $t=0$, $x(0)=0$, $dx/dt(0)=V_0$ имеет следующий вид:

$$x(t) = V_0 \sqrt{M/k} \sin(\sqrt{k/M} \cdot t), \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_0 \cos(\sqrt{k/M} \cdot t), \quad (4)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -V_0 \sqrt{M/k} \sin(\sqrt{k/M} \cdot t). \quad (5)$$

Полученные зависимости позволяют определить перемещение, скорость и ускорение судна в любой момент времени при известном значении коэффициента жесткости k .

Коэффициент жесткости корпуса k зависит от материала корпуса, толщины обшивки, конструктивной схемы набора, локальной деформируемости носовой части. Поскольку проведение натурных ударных испытаний на реальных судах практически невозможно, определение значения коэффициента k выполнялось методом численного моделирования столкновений с использованием специализированного программного обеспечения.

Численное моделирование столкновений малых ВСС

Численное моделирование столкновений высокоскоростных малых судов (рис. 4–6) выполнялось в рамках исследований, направленных на совершенствование нормативных требований в области безопасности и уточнение методик оценки ускорений, воздействующих на пассажиров и экипаж. Основными целями численного моделирования являлись:

- проверка адекватности нормативных оценок ускорений для малых ВСС;
- анализ влияния скорости судна и конструктивного исполнения корпуса на величину ускорений при столкновении;
- формирование базы данных для последующего совершенствования нормативных требований.

В качестве объекта исследования рассматривался скоростной катер длиной порядка 13 м и водоизмещением около 13 т, что соответствует типичному представителю класса малых ВСС. Расчетные сценарии включали столкновение судна с жесткой вертикальной стеной на скоростях $V_{imp} = 5, 10$ и 15 м/с. Выбранный диапазон скоростей охватывает умеренные и высокоскоростные режимы движения, что позволило проанализировать изменение характера взаимодействия судна с препятствием в зависимости от кинетической энергии удара.

Для оценки влияния конструктивных факторов в расчетных моделях рассматривались различные варианты корпусных конструкций, отличающиеся:

- материалом корпуса (сталь, алюминиевые сплавы, композитные материалы);
- толщиной элементов обшивки («усиленная» и «легкая» конструкции).

Такой подход позволил количественно оценить роль деформируемости корпуса в процессе столкновения и выявить связь между характером поглощения энергии удара и величиной ускорений, действующих на судно. В основе численного моделирования методом конечных элементов лежит анализ движения репрезентативной части судна в нелинейной динамической постановке (рис. 4, 5).

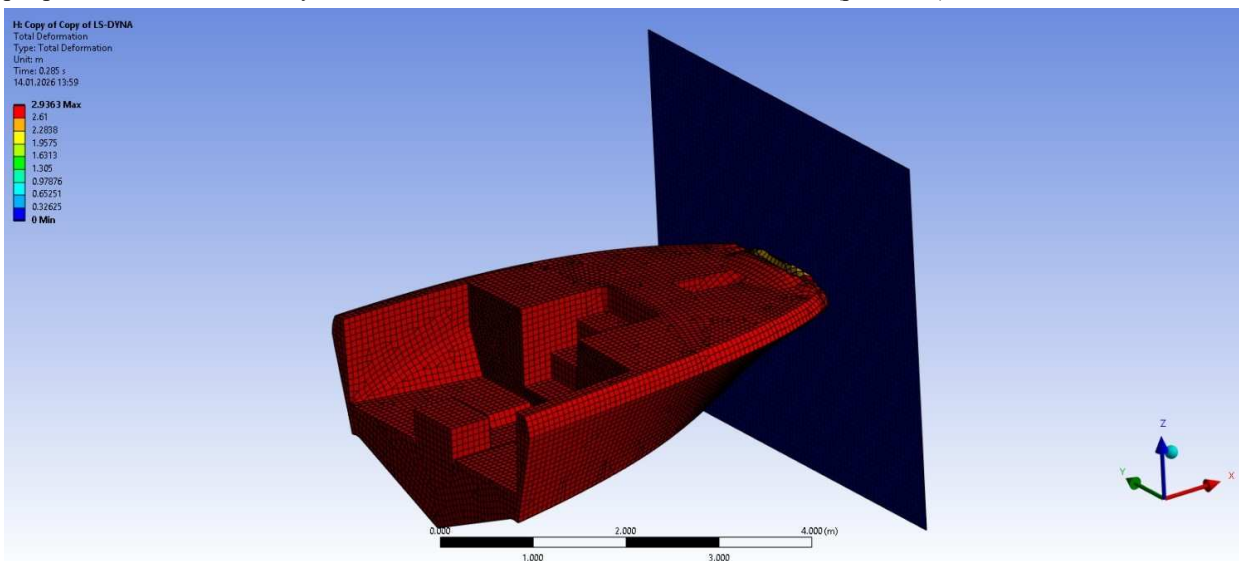


Рис. 4. Поля перемещений модели в конечный момент столкновения

Рассматриваемый сценарий лобового столкновения с вертикальной стеной, принятый в HSC Code [9], является предельно консервативным и используется как эталонный случай при оценке ускорений.

Результаты численного моделирования показали (рис. 6), что величина ускорений при столкновении определяется не только скоростью судна, но и в значительной степени конструктивными характеристиками корпуса. Для носовых конструкций малых ВСС, обладающих меньшей жесткостью и большей способностью к энергопоглощению при ударе, процесс торможения судна растягивается во времени, что приводит к снижению пиковых значений ускорений.

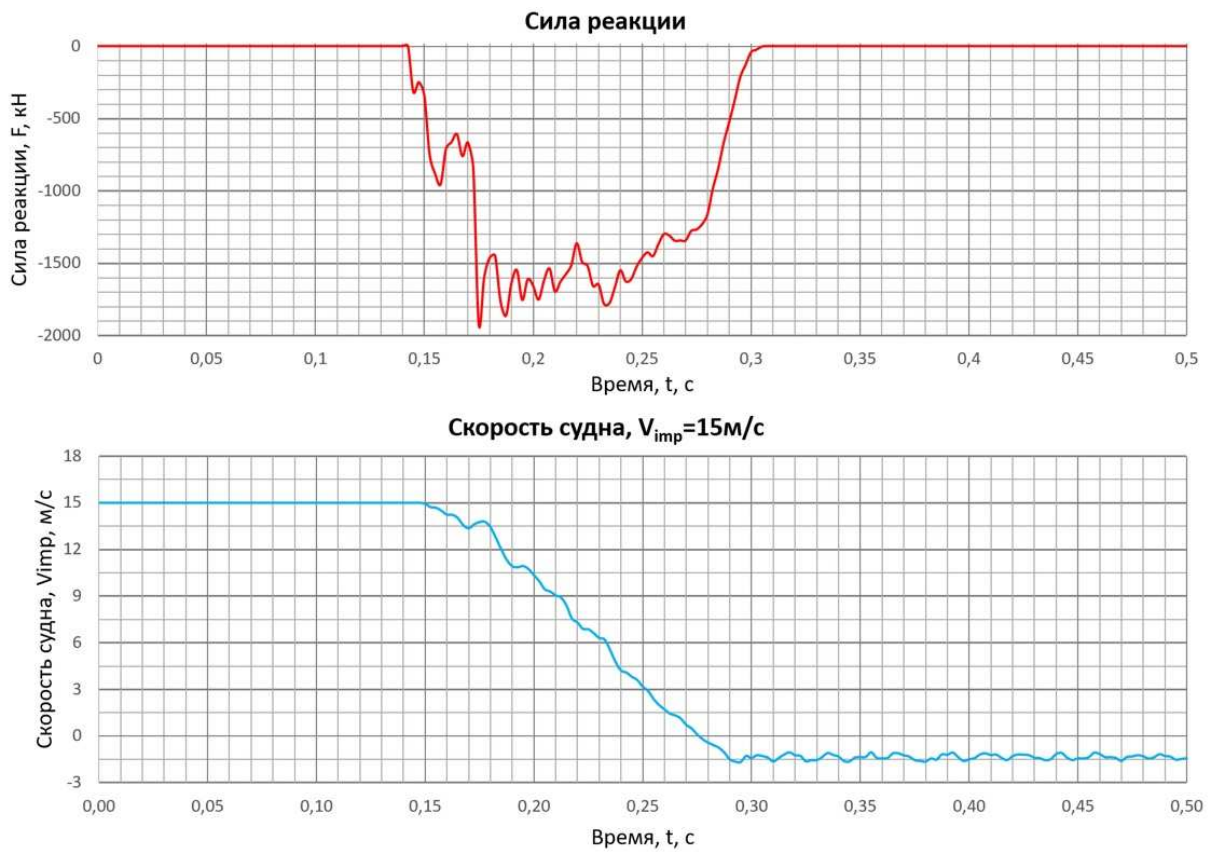


Рис. 5. Пример результатов численного анализа в виде графиков силы реакции F и скорости судна V_{imp} от времени t

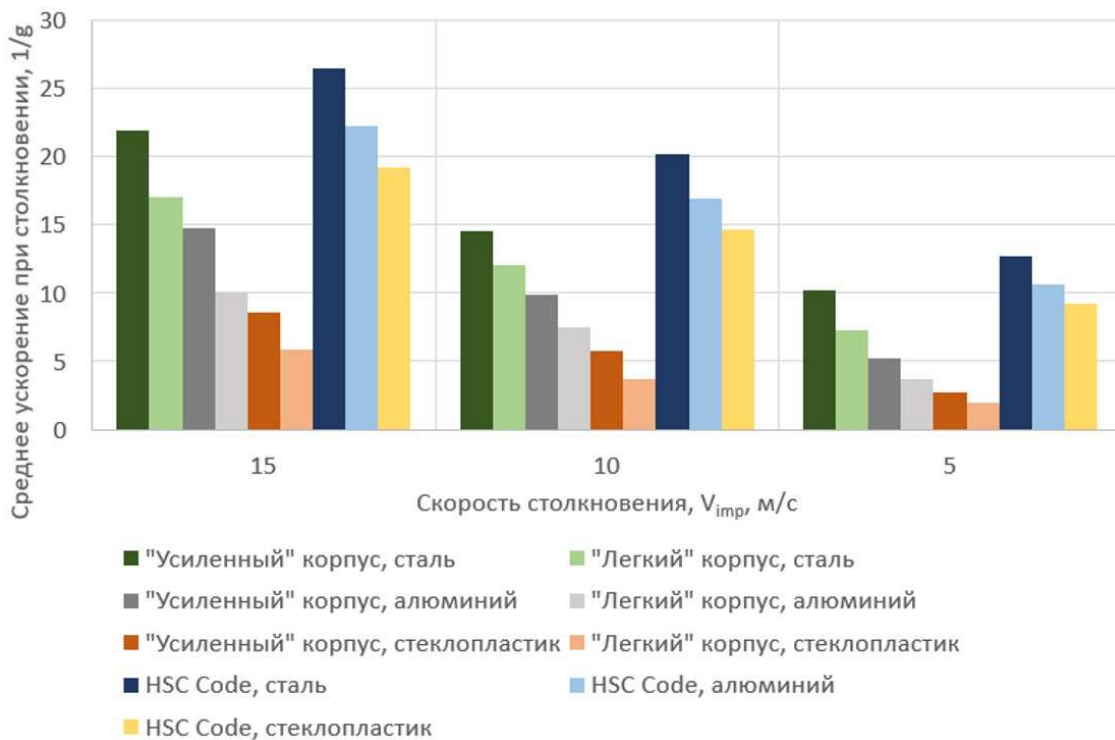


Рис. 6. Значения ускорений по результатам численного моделирования

Таблица 5

Результаты численного моделирования столкновения

Материал корпуса	Толщина, мм	Скорость столкновения, м/с	$k \cdot 10^{-3}$, Н/м
Стеклопластик	5	5–15	371,1
Стеклопластик	8	5–15	780,8
Алюминий	5	5–15	1310,8
Алюминий	8	5–15	2520,5

Определение величины коэффициента жесткости

Результаты численного моделирования использованы для определения величины k в форме, соответствующей уравнениям (3)–(5) (см. табл. 5). Анализ результатов показывает, что для корпуса, выполненного из одного материала и в пределах одинаковой толщины, коэффициент жесткости k может быть принят постоянным в диапазоне исследуемых скоростей столкновения. При этом расхождение между средними ускорениями, полученными путем численного моделирования и теоретическим решением с использованием полученных значений k , составляет от 0,7 до 7,4 %, что подтверждает адекватность предложенной модели. В последующем планируется выполнить дальнейшие работы по численному моделированию, для уточнения зависимости этого коэффициента от толщины и свойств материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе выполнен комплексный анализ вопросов обеспечения безопасности пассажиров и экипажа малых ВСС с точки зрения ускорений, возникающих при аварийных столкновениях. Показано, что именно ускорения и их временные характеристики, а не только абсолютные значения скорости судна, являются определяющим фактором риска травматизма.

Анализ статистических данных аварийности подтверждает, что контактные аварийные сценарии доминируют в структуре происшествий с ВСС. Столкновения составляют значительную долю всех аварий ВСС и практически полностью определяют случаи гибели людей [16]. Это обстоятельство подчеркивает необходимость количественной оценки ускорений и разработки инженерных мер, направленных на снижение последствий воздействия инерционных нагрузок на человека.

Динамика столкновений малых ВСС существенно отличается от аналогичных процессов в наземном транспорте. Для судов характерны более длительные импульсы замедления и меньшие значения «рывка», что приводит к иной структуре травматизма. Доминирующим механизмом повреждений являются падения и удары о элементы судовой конструкции, тогда как хлыстовые травмы шейного отдела позвоночника встречаются значительно реже. Данное обстоятельство принципиально важно при разработке требований к архитектуре пассажирских помещений и систем удержания людей.

Проведенный анализ действующих международных и национальных нормативных документов показал существенные различия в подходах к обеспечению безопасности по ускорениям. Наиболее жестким и консервативным является подход HSC Code, в то время как стандарты, ориентированные на малые суда и реальные эксплуатационные условия, допускают более гибкие компоновочные решения. Выявлены ограничения применимости методик HSC Code к судам малых размерений, для которых данные формулы изначально не разрабатывались.

Численное моделирование столкновений малых ВСС показало, что величина ускорений при ударе определяется не только скоростью движения, но в значительной степени конструктивными характеристиками корпуса. Материал и толщина обшивки оказывают решающее влияние на процесс поглощения энергии удара и продолжительность торможения судна. Показано, что расчетные значения ускорений при столкновении, определяемые по методике HSC Code, во многих случаях более чем вдвое превышают значения, полученные при численном моделировании малых ВСС (рис. 6). Установлено, что для судов одной конструкции, выполненных из одного материала и имеющих одинаковую толщину обшивки, коэффициент жесткости k корпуса при столкновении может рассматриваться как постоянная величина (табл. 5).

Правила РС по ВСС [17, ч. XXII], предусматривающие скоростные диапазоны эксплуатации и связанные с ними требования к компоновке пассажирских помещений, в целом адекватно согласуются с результатами выполненного численного моделирования. Это подтверждает корректность выбранного направления

развития нормативной базы. Можно рассматривать возможность применения альтернативных мер обеспечения безопасности пассажиров, включая использование ограждающих и ограничивающих конструкций вместо ремней безопасности.

Результаты исследования подтверждают целесообразность дальнейшего развития численных методов моделирования столкновений с целью уточнения зависимости коэффициента жесткости от толщины и механических свойств материала, а также расширения модели на пространственную постановку задачи с учетом асимметричных повреждений и особенностей многокорпусных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров А.Г. Особенности обеспечения непотопляемости малых судов / А.Г. Назаров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 38–49.
2. Latorre R.G. Functionality and safety of small passenger craft: Some lessons / R.G. Latorre, A. Nazarov // 5th Chesapeake Power Boat Symposium 2016.
3. Васильев Р.В. Численное моделирование процессов деформирования корпусных конструкций при столкновении судов: дисс. ... канд. техн. наук / Р.В. Васильев; СПбГМТУ. — СПб., 2013.
4. Тряскин В.Н. Методика и алгоритм определения допустимых скоростей при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля / В.Н. Тряскин, В.С. Мороз // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 48–55.
5. Recreational Boating Statistics 2022. Washington, DC: U.S. Department of Homeland Security, U.S. Coast Guard, Office of Auxiliary and Boating Safety, 2023. COMDTPUB P16754.36.
6. ISO 2631-5:2018 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. Ed. 2. — 2018.
7. Kamath P. Design and construction of SM16 fast interceptor craft: Case study / P. Kamath, A. Nazarov // Warship 2013: Minor Warships — 12–13 June 2013, Bath, UK. — P. 131–139.
8. Lucas S.R. Biomechanical assessment of small craft collisions / S.R. Lucas, J.C. McGowan, R.S. Salzar, C. Planchak, J.E. Getz // 2nd Chesapeake Power Boat Symposium 2010. — P. 1–12.
9. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) / International Maritime Organization. — 2008.
10. Назаров А.Г. Особенности применения требований Международной конвенции безопасности высокоскоростных судов к судам малых размеров / А.Г. Назаров // Научные проблемы водного транспорта. — 2024. — № 78(1). — С. 201–211. — DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.466>.
11. Code of Safety for Small Commercial Vessels Operating in the Caribbean / International Maritime Organization. — 2017.
12. NSCV (National Standard for Commercial Vessels) / Australian Maritime Safety Authority. — 2016.
13. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2 / VTT Expert Services Ltd. — Finland, 2016.
14. ISO 15085:2024 Small craft — Protection from falling overboard and means of reboarding. Ed. 2. — 2024.
15. Noon R.K. Engineering analysis of vehicular accidents / R.K. Noon. — Boca Raton: CRC Press, 1994.
16. Antão P. Analysis of high-speed craft accidents / P. Antão, C. Guedes Soares // Safety & Reliability. — 2003. — Vol. I. — P. 37–44.
17. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.

REFERENCES

1. Nazarov A.G. Specifics of providing unsinkability for small craft. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 38–49. (In Russ.)
2. Latorre R.G., Nazarov A. Functionality and safety of small passenger craft: Some lessons. *5th Chesapeake Power Boat Symposium*. Annapolis, USA, 2016.
3. Vasiliev R.V. Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniya korpusnykh konstruksii pri stolknovenii sudov [Numerical modeling of deformation processes of hull structures during ship collisions: PhD thesis] / St. Petersburg State Marine Technical University. St. Petersburg, 2013.
4. Tryaskin V.N., Moroz V.S. Methodology and algorithm for determination of permissible speeds at a ship's vertical side crash against the ice field edge. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 47–55. (In Russ.)
5. Recreational Boating Statistics 2022. Washington, DC: U.S. Department of Homeland Security, U.S. Coast Guard, Office of Auxiliary and Boating Safety, 2023. COMDTPUB P16754.36.
6. ISO 2631-5:2018. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. Ed. 2, 2018.
7. Kamath P., Nazarov A. Design and construction of SM16 fast interceptor craft: Case study // WARSHIP 2013: Minor Warships, 12–13 June 2013, Bath, UK. P. 131–139.
8. Lucas S.R., McGowan J.C., Salzar R.S., Planchak C., Getz J.E. Biomechanical assessment of small craft collisions. *2nd Chesapeake Power Boat Symposium 2010*. P. 1–12.

9. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) / International Maritime Organization. 2008.
10. Nazarov A.G. Specifics of application of requirements of International Code on Safety of High-Speed Craft to small craft. *Russian Journal of Water Transport*. 2024. No. 78(1). P. 201–211. DOI: 10.37890/jwt.vi78.466. (In Russ.)
11. Code of Safety for Small Commercial Vessels Operating in the Caribbean / International Maritime Organization. 2017.
12. NSCV (National Standard for Commercial Vessels) / Australian Maritime Safety Authority, 2016.
13. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2 / VTT Expert Services Ltd. Finland, 2016.
14. ISO 15085:2024 Small craft — Protection from falling overboard and means of reboarding. Ed. 2, 2024.
15. Noon R.K. Engineering analysis of vehicular accidents. Boca Raton: CRC Press, 1994.
16. Antão P., Guedes Soares C. Analysis of high-speed craft accidents. *Safety & Reliability*. 2003. Vol. I. P. 37–44.
17. Rules for the Classification and Construction of High-Speed Craft / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026.

Принята к публикации 20.02.2026.

УДК 629.5.01, 629.5.016, 629.5.089.6
EDN CVNGFP

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ МОРСКОГО СУДОХОДСТВА: ТЕНДЕНЦИИ, РЕГУЛЯТОРНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ, АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТОПЛИВА, ВЫЗОВЫ И ДОСТИЖЕНИЕ НУЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ

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

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

Несмотря на все усилия, абсолютные выбросы парниковых газов в морском судоходстве продолжают расти, достигнув 121 % к 2024 г. от уровня 2008 г. из-за увеличения мировой торговли и тоннажа флота. Динамика отрасли определяется не только экологическими инициативами, но и геополитическими, макроэкономическими и рыночными факторами. В статье анализируется динамика выбросов за последние 20 лет, оценивается экономическая целесообразность и техническая готовность к внедрению на морском транспорте альтернативных топлив (метанол, аммиак, водород, биотопливо) до 2040 г. Рассматриваются действующие и перспективные нормативно-правовые механизмы, включая стратегию ИМО по нулевым выбросам к 2050 г. с промежуточными целями на 2030 и 2040 гг., а также региональные меры ЕС (EU ETS, FuelEU Maritime). Показаны реалистичные переходные решения, такие как СПГ в сочетании с технологиями энергоэффективности (ЭЭТ) и бортовым улавливанием CO₂ (OCCS), а также затронуты долгосрочные перспективы ядерной энергетики. Сформулированы системные риски и барьеры, включая ограниченную доступность низкоуглеродных топлив, рост операционных расходов (до 45 000 долл. США в день для судов в ЕС к 2035 г.) и дефицит судостроительных мощностей. Преобладающая рыночная динамика показывает отсутствие экономической выгоды от «зеленых» топлив из-за высокой стоимости и инфраструктурных ограничений. Регуляторные меры выступают как дополнительные торговые барьеры, перекладывая затраты на конечных потребителей. Отрасль сталкивается с разрывом между амбициозными целями и реальными возможностями; без синхронизации политики, технологий и капитала достижение нулевых выбросов к 2050 г. остается под вопросом. Наиболее вероятный сценарий — массовое использование биотоплива, в том числе био-СПГ как переходного топлива с постепенным внедрением ядерных установок в 2030-х гг.

Ключевые слова: декарбонизация, национальные меры, международные меры, ИМО, EEDI, EEXI, CII.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Международный опыт декарбонизации водного транспорта / А.С. Реуцкий, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 17–37. — EDN CVNGFP.

DECARBONIZATION OF MARITIME SHIPPING: TRENDS, REGULATORY INSTRUMENTS, ALTERNATIVE FUELS, AND CHALLENGES IN ACHIEVING NET-ZERO EMISSIONS

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

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

Despite efforts to optimize ships and operations, absolute greenhouse gas emissions in maritime shipping continue to rise, reaching 121 % of the 2008 level by 2024 due to the growth in global trade and fleet tonnage. The industry's dynamics are driven by macroeconomic and market factors, not solely environmental initiatives. The article analyzes emission trends over the past 20 years and evaluates the economic feasibility and technical readiness implementation of alternative fuels (methanol, ammonia, hydrogen, biofuels) up to 2040. It examines current and prospective regulatory mechanisms, including the IMO strategy for net-zero emissions by 2050 with interim targets for 2030 and 2040, as well as EU regional measures (EU ETS, FuelEU Maritime). Realistic transitional solutions are identified, such as LNG combined with energy efficiency technologies (EET) and onboard carbon capture (OCCS), along with long-term prospects for nuclear energy. Systemic risks and barriers are formulated, including limited availability of low-carbon fuels, rising operational costs (up to \$45,000 per day for ships in the EU by 2035), and shipbuilding capacity shortages. Prevailing market dynamics show a lack of economic benefits from "green" fuels due to high costs and infrastructure constraints. Regulatory measures act as additional trade barriers, shifting costs to end consumers. The industry faces a gap between ambitious goals and real capabilities; without synchronizing policy, technology, and capital, achieving net-zero by 2050 remains questionable. The most likely scenario is widespread biofuels, in particular bio-LNG use as a transitional fuel with gradual nuclear implementation in the 2030s.

Keywords: decarbonization, national measures, international measures, IMO, EEDI, EEXI, CII.

For citation: Reutskii A.S., Butsanets A.A. International experience of decarbonization of water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 17–37. EDN CVNGFP. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на усилия по снижению удельных выбросов за счет оптимизации морских судов и их операционной деятельности, предпринимаемые в отрасли в последние 20 лет, общий объем выбросов парниковых газов (далее — ПГ) в судоходстве продолжает расти (рис. 1). В настоящий момент выбросы CO₂ увеличились на 121 % по сравнению с 2008 г. из-за роста мировой торговли и тоннажа флота. Динамика судоходной отрасли определяется макроэкономическими, геополитическими и рыночными факторами, а не только экологическими инициативами. Применение ИМО методологии «от скважины до винта» (Well-to-Wake — WtW) выявляет эту тенденцию и демонстрирует растущую сложность достижения отраслевых климатических целей.

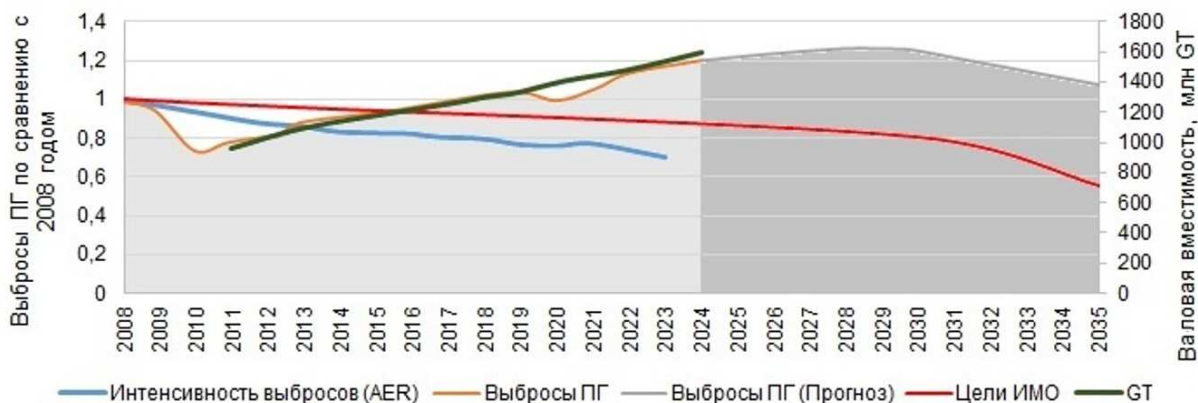


Рис. 1. Прогноз и динамика изменения выбросов парниковых газов с морских судов

Очевидно, что полная оценка влияния регуляторных мер на декарбонизацию судоходства невозможна и что основные затраты на соблюдение этих требований понесут конечные потребители логистических услуг. Таким образом, нормативные ограничения становятся дополнительными переменными в системе грузоперевозок, а не определяют рыночную динамику. В условиях ограниченной доступности низкоуглеродных решений затраты на принятие и соблюдение требований будут фактически выполнять функцию торговых тарифов. Данная ситуация уже сейчас оказывает существенное влияние на эффективность и конкурентоспособность мировой морской торговли.

Целью статьи является сформировать перечень действующих на конец 2025 г. международных и национальных (региональных) инструментов для декарбонизации морского транспорта и выявить основные тренды и сложности глобальной трансформации на пути к сокращению выбросов судов. Для достижения цели в данной работе:

- проанализирована динамика выбросов парниковых газов в судоходстве за последние 20 лет и показано, что, несмотря на технический прогресс, выбросы в абсолютном выражении продолжают расти;
- дана оценка экономической целесообразности и технической готовности альтернативных видов топлива (метанол, аммиак, водород, биотопливо) на горизонте до 2040 г.;
- рассмотрены действующие и готовящиеся нормативно-правовые и регуляторные механизмы;
- выявлены наиболее реалистичные переходные решения (СПГ + ЭЭТ + ОССС) и долгосрочные перспективы (ядерная энергетика);
- сформулированы системные риски и барьеры достижения целей ИМО к 2030–2050 гг.

Преобладающая динамика рынка показывает, что с точки зрения стоимости внедрения и использования экологически чистые виды топлива в настоящее время не несут экономической выгоды из-за высокой стоимости и ограниченной доступности. При этом затраты на соблюдение законодательных требований по выбросам ПГ в некоторых странах резко возрастают. Наглядно демонстрируют растущую финансовую нагрузку на отрасль приведенные в исследовании примеры. Так, для судна, выполняющего рейсы в пределах ЕС, ежедневные эксплуатационные расходы могут увеличиться с 15 000 в 2028 г. до 45 000 долл. США к 2035 г. при условии ежедневного потребления 30 т низкосернистого мазута марки VLSFO. Анализ стоимости владения балкером типа Panamax (рис. 2) демонстрирует отсутствие экономической целесообразности перехода на экологически чистые виды топлива ввиду их высокой цены и ограниченной доступности.

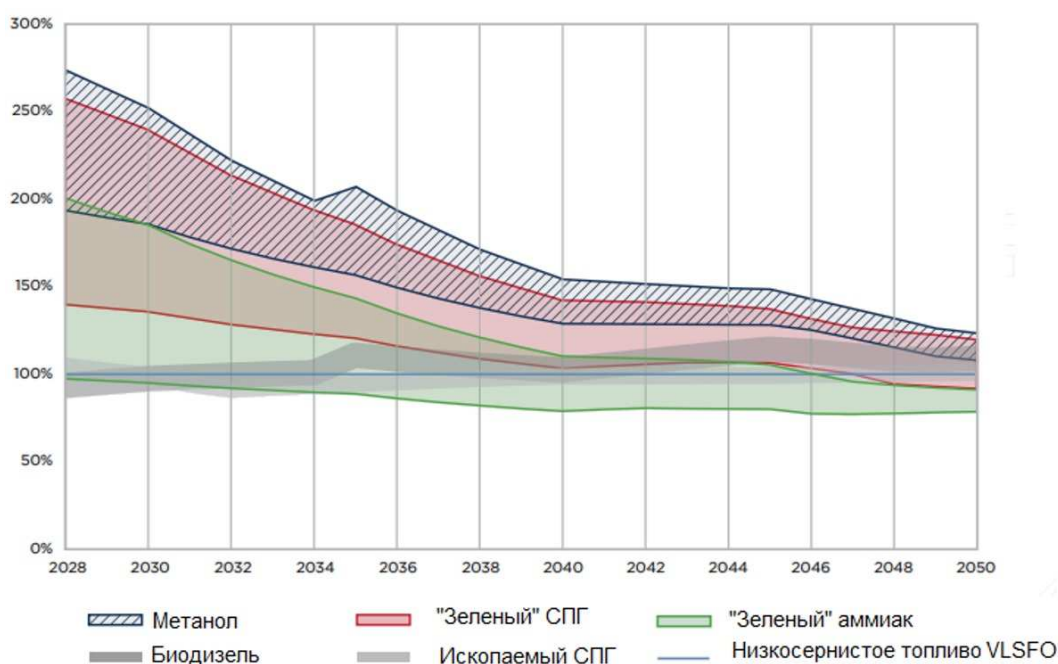


Рис. 2. Долгосрочный прогноз стоимости владения балкером типа Panamax, использующим различные виды альтернативных топлив

Метанол. Экологичность метанола напрямую зависит от медленно развивающихся технологий улавливания углерода и доступности возобновляемого водорода, применяемых при его производстве. Его производство сопряжено с растущими затратами на электролизеры и дефицитом биогенного CO_2 . В результате стоимость экологически чистого метанола оценивается в 2–4 раза выше, чем у традиционного ископаемого топлива.

Аммиак. Несмотря на статус альтернативного топлива с нулевыми выбросами, аммиак обладает рядом опасных свойств, включая токсичность и коррозионную активность. В настоящий момент его производство реализуется крупными энергетическими компаниями, ориентированными на мировые энергетические рынки, а не на судовой бункерный рынок. Совокупность этих факторов ограничивает его потенциальное применение в морской отрасли.

Водород. Водород как топливо с нулевым уровнем выбросов ПГ несет в себе серьезные проблемы, обусловленные его физико-химическими свойствами. Они включают высокие риски для безопасности и отсутствие готовых решений для применения на судах, что, в свою очередь, препятствует развитию его бункеровочной инфраструктуры.

Эти альтернативные виды топлива (метанол, аммиак, водород) не обеспечат значительной декарбонизации до 2040 г. и не могут служить надежной основой для планирования судостроения в ближайшей перспективе. Их внедрение остается стратегическим фактором для мониторинга. Принудительное регулирование в случае этих топлив в совокупности с отсутствием единого применимого для всех судовладельцев решения повлечет за собой лишь высокие затраты на соблюдение требований и в будущем и искажение конкурентной динамики рынка.

СПГ. Как показывает статистика портфеля заказанных судов (рис. 3, 4), сжиженный природный газ (далее — СПГ) представляет собой прагматичную и экологически более чистую альтернативу традиционному судовому топливу, предлагая относительно низкие первоначальные капитальные затраты и развитую глобальную цепочку поставок. Его прогнозируемая экономика и растущая инфраструктура, включающая более 190 портов, в которых реализована услуга бункеровки СПГ, делают его надежным решением для последующего внедрения безуглеродных судовых топлив. Это подтверждается тем, что около 70 % заказанных судов на альтернативном топливе будут использовать СПГ в качестве топлива. Кроме того, СПГ создает стратегический задел для будущего перехода на устойчивые топлива, выступая сырьем для производства водорода и аммиака.



Рис. 3. Доля судов в портфеле заказов, использующих альтернативные виды топлив



Рис. 4. Доля различных видов альтернативных топлив в портфеле заказанных судов

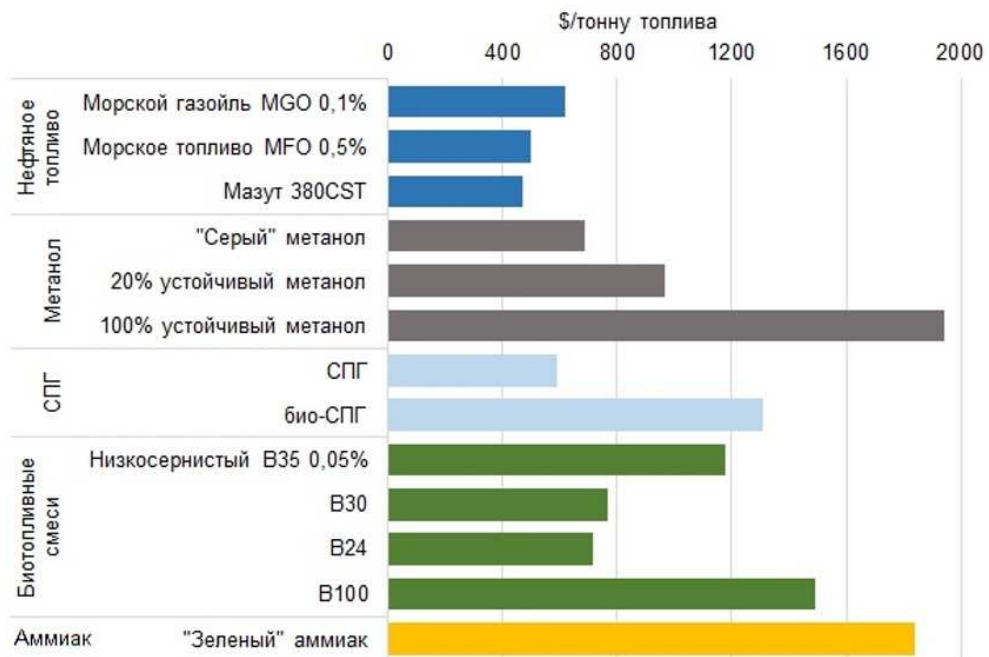


Рис. 5. Стоимость морских бункерных топлив (апрель 2025 г.)

Технологии повышения энергоэффективности (ЭЭТ) и улавливания CO₂ (OCCS) расширяют возможности использования СПГ

СПГ, не являясь топливом с нулевыми выбросами, служит практичным переходным решением в рамках долгосрочной стратегии декарбонизации. Различные технологии повышения энергоэффективности (energy efficiency technology — EET, далее — ЭЭТ), уже примененные почти на половине нефтеналивных, контейнерных и навалочных судов [1–4] (рис. 6), и развивающиеся технологии улавливания углерода на судах (onboard carbon capture systems — OCCS) призваны обеспечить снижение выбросов ПГ с судов до момента появления масштабируемых безуглеродных решений.

Несмотря на растущую нормативную поддержку, например со стороны FuelEU Maritime (безуглеродное регулирование ЕС, которое вступило в силу с 1 января 2025 г.), готовность судоходной и судостроительной отраслей к внедрению этих технологий существенно варьируется в зависимости от типа транспортного судна.

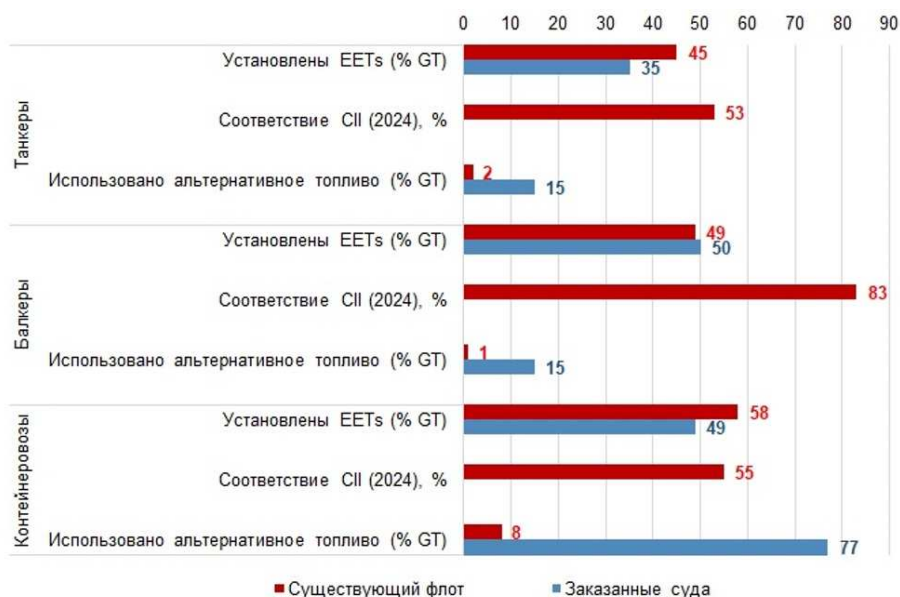


Рис. 6. Статистика готовности некоторых типов судов к декарбонизации по выбранным критериям применения ЭЭТ, соответствия СИ и использования альтернативных топлив

Еще одним негативным фактором, который необходимо принимать во внимание, является ограниченность доступных мировых мощностей судостроительных предприятий. Согласно реалистичным сценариям от ABS, к 2028–2030 гг. мировые судостроительные мощности по модернизации будут полностью загружены. Без появления новых мощностей это потенциально создаст проблему, из-за которой многие владельцы могут остаться без возможности соблюдения требований, если они не заключат контракт на постройку уже сейчас.

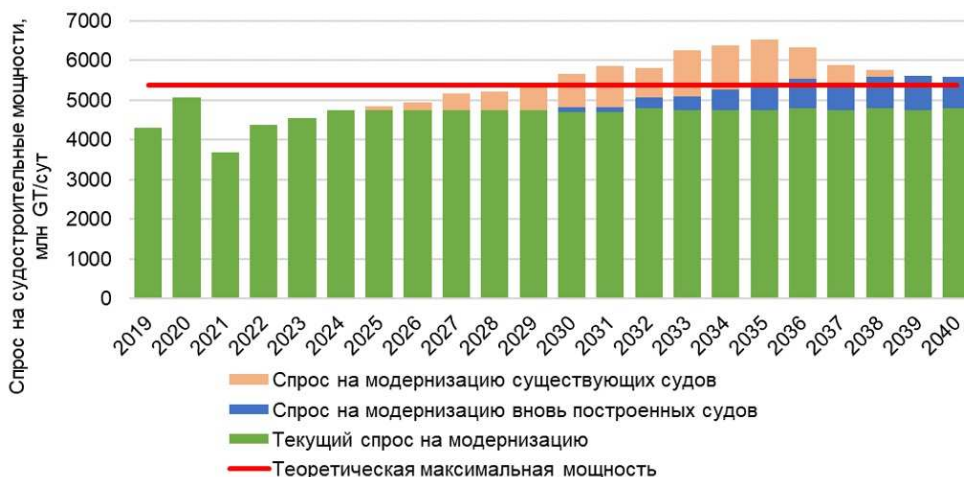


Рис. 7. Прогнозируемый дефицит производственных мощностей судостроительных предприятий

Ядерная энергетика — многообещающий способ сократить выбросы ПГ на морских судах

Ядерные технологии [5], в частности разрабатываемые сейчас газоохлаждаемые, солевые и малые модульные реакторы, характеризуются практически нулевым уровнем выбросов и устойчивостью к колебаниям рынка экологически чистого топлива. Разработка плавучих атомных электростанций создает предпосылки для их интеграции в судоходство, с перспективой практического внедрения в 2030-х гг. Однако масштабированию технологии препятствуют необходимость развития страховых механизмов, обновления нормативной базы и обеспечения общественного признания. Важным шагом в этом направлении стало решение ИМО о пересмотре Кодекса по безопасности ядерных торговых судов, который был принят Ассамблеей ИМО в 1981 г. Преодоление указанных барьеров остается ключевым условием коммерческого применения атомных решений в коммерческом судоходстве.

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ МОРСКОГО СУДОХОДСТВА

Декарбонизация судоходства в настоящий момент представляется в виде слабо организованной гонки, в рамках которой за четверть века необходимо добиться существенного снижения выбросов ПГ с судов, что потребует значительных средств и, что самое сложное, в настоящий момент не имеет конкретных технических решений. Между климатическими целями и жизненными реалиями существует разрыв, и неясно, возможно ли в ближайшем будущем синхронизировать политику, технологии и капитал, чтобы этот разрыв преодолеть.

В данном подразделе анализируются факторы, определяющие происходящую трансформацию судоходной отрасли: нормативная база, количественная оценка несоответствия текущего уровня выбросов ПГ глобальным целям, рыночные сигналы и архитектура рисков. Представленная оценка выявляет системные проблемы и определяет практические пути соответствия отраслевым требованиям.

1. Ужесточающаяся система регулирования, глобальные, региональные и местные меры по декарбонизации

Ожидается, что нормативно-правовая база в 2026 г. будет одновременно более динамичной, фрагментированной и действенной, чем когда-либо прежде. В табл. 1 представлено текущее состояние дел [6–8].

Таблица 1

Нормативно-правовая база декарбонизации в 2025 г.

Уровень	Ключевые меры	Цели (2025–2030)
Глобальный	Программа «чистого нуля» ИМО (Net Zero Framework) с целями снижения выбросов ПГ на 20 % и 70 % в 2030 и 2040 гг. соответственно	Устанавливает обязательные меры по снижению выбросов ПГ для морских судов, совершающих международные рейсы, валовой вместимостью более 5000
	Интенсивность топливных выбросов парниковых газов (далее — ИТПВГ — GFI). Топливный стандарт «от скважины до винта» (WtW)	Внедряет отчетность о выбросах ПГ в течение всего жизненного цикла судового топлива во всем мире, стимулируя переход с любого ископаемого на т.н. «устойчивое» (sustainable) судовое топливо
Региональный	Система торговли выбросами ЕС (EU ETS) учитывает 100 % внутренних перевозок и 50 % внешних перевозок в ЕС	Штрафы на выбросы ПГ для рейсов, связанных с ЕС, существенно повышают эксплуатационные расходы для судов, использующих ископаемое топливо
	FuelEU Maritime имеет целью снижение выбросов в рамках цепочки WtW для судовых топлив от –2 % в 2025 г. до –80 % в 2050 г.	Меры вынуждают судовладельцев переходить на блендинговые сорта топлива с постепенным замещением ископаемого топлива углеродно-нейтральным биотопливом
	Система торговли выбросами Великобритании, UK ETS, в методическом смысле аналогична EU ETS	Штрафы на выбросы ПГ на рейсах, связанных с Великобританией, существенно повышают эксплуатационные расходы на ископаемое топливо

Принятая в июле 2023 г. пересмотренная стратегия ИМО устанавливает в качестве официальной цели достижение судоходством нулевых выбросов ПГ к 2050 г. с промежуточными ориентирами: сокращение на 20 % к 2030 г. и на 70 % к 2040 г. относительно уровня 2008 г. (рис. 8).

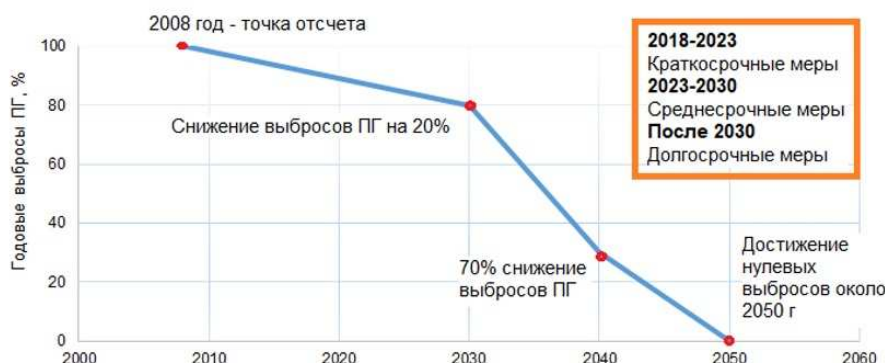


Рис. 8. Контрольные точки и цели ИМО

Хотя текущее регулирование, используемое в ИМО (показатель эксплуатационной эффективности существующих судов EEXI и коэффициент выбросов углерода CII), закладывает основу для декарбонизации отрасли, данные меры охватывают только технические и эксплуатационные аспекты морских судов. Несмотря на то, что введение этих мер привело к снижению выбросов ПГ, их недостаточно, чтобы добиться весьма амбициозных целей ИМО. Поэтому в настоящий момент выполняется резкий переход к системе «чистого нуля ИМО» (IMO Net-Zero Framework — IMO NZF), основанной на WtW-методологии учета выбросов ПГ для оценки выбросов полного жизненного цикла для всех видов судовых топлив [6–8]. Ключевым показателем в этой системе станет индекс топливных выбросов парниковых газов (ИТВПГ — GFI), смещающий фокус регулирования с операционной эффективности судна на углеродоемкость используемого им топлива. Стандарт ИТВПГ — GFI — это регулирование углеродоемкости топлива, применяемое к судам валовой вместимостью 5000 т и выше. ИТВПГ представляет собой основополагающий элемент более широкой программы ИМО по декарбонизации. При его определении используется методология WtW, учитывающая выбросы ПГ на протяжении всего жизненного цикла судового топлива (от производства и транспортировки до сжигания на борту), что создает всеобъемлющую основу для оценки соответствия (рис. 9). Судам необходимо будет ежегодно рассчитывать значения фактической годовой интенсивности топливных выбросов ПГ, выражаемой в CO₂-эквиваленте / МДж энергии.



Рис. 9. Интенсивность выбросов ПГ для цепочки производства и поставки судового топлива¹

¹ Изображения из открытых источников сети интернет: <https://tass.ru/opinions/7784345>, <https://prommoscow.info/exhibition/gasolineplant-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.istic.illinois.edu/research/energy> (дата обращения 21.05.2025).

При расчете ИТВПГ учитываются количество и интенсивность выбросов за весь жизненный цикл каждого вида потребленного на судне топлива. Фактическая интенсивность выбросов ИТВПГ сравнивается с двумя значениями: целевым годовым ИТВПГ — «базовым целевым показателем» — и «целевым показателем прямого действия» (значения ежегодно ужесточаются и установлены в Правиле 35 Приложения VI МАРПОЛ на период с 2028 до 2035 г., а также для 2040 г.), таким образом будет определяться баланс соответствия судна.

В тех случаях, когда фактическая ИТВПГ судна больше целевой ИТВПГ прямого действия, но меньше базовой ИТВПГ (т.н. дефицит уровня 1 — желтая зона на рис. 10) или когда она больше базовой целевой ИТВПГ (т.н. дефицит уровня 2 — красная зона на рис. 10), судно должно компенсировать в Фонд чистых нулевых выбросов ИМО (IMO Net-Zero Fund) разницу компенсационными единицами. Стоимость компенсационных единиц на период 2028–2030 гг. установлена в Правиле 36 Приложения VI в размере:

- 100 долл. США за тонну CO₂-эквивалента для уровня 1;
- 380 долл. США за тонну CO₂-эквивалента для уровня 2.

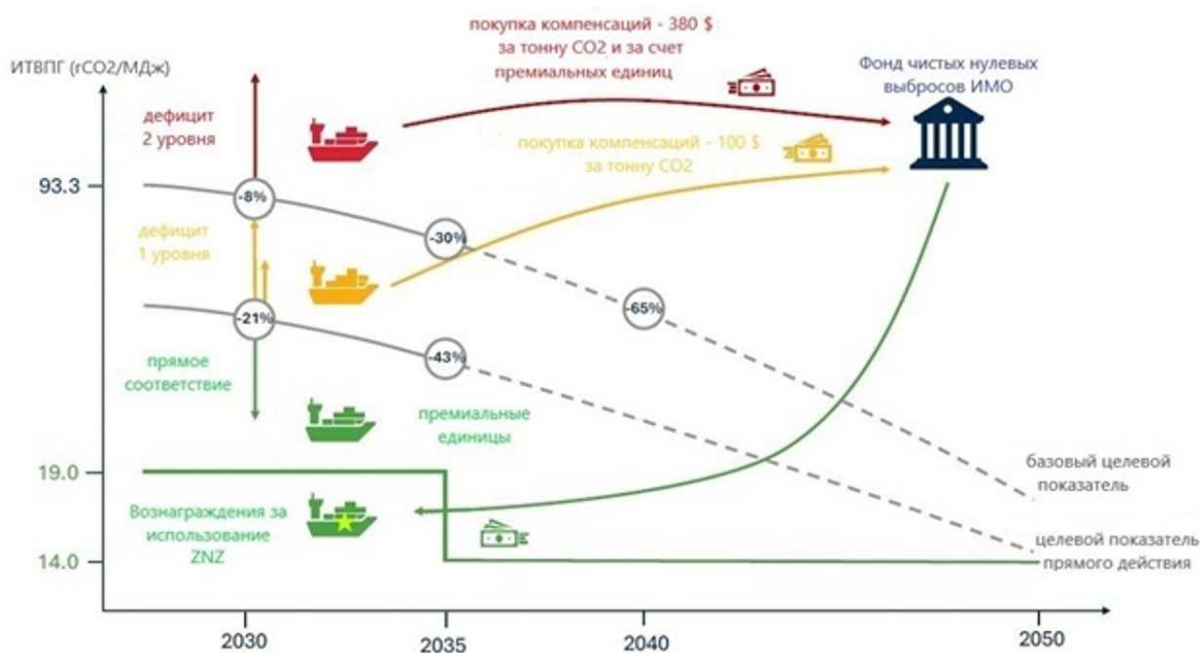


Рис. 10. Регулирование углеродоемкости судового топлива ИМО

В тех случаях, когда фактическая ИТВПГ судна меньше целевой ИТВПГ прямого действия (прямое соответствие — зеленая зона на рис. 10), судно считается соответствующим, и ему начисляются премиальные единицы. Ими можно покрывать дефицит соответствия на уровне 2 в последующие отчетные периоды или передавать другим судам для покрытия соответствия.

Суда, использующие топливо с нулевым или близким к нулевому уровнем выбросов ПГ (Zero or Near-Zero — ZNZ), могут претендовать на финансовые компенсации из Фонда чистых нулевых выбросов ИМО (на рис. 10 — зеленая зона ниже зеленой линии).

Помимо компенсаций, средства из Фонда предполагается расходовать на научные исследования, содействие справедливому энергопереходу и т.п.

В рамках реализации стратегии ИМО предполагается необходимость подачи отчетных документов, включая План управления энергоэффективностью судна (SEEMP — ПУЭС), в Администрацию или признанную организацию для проверки расчетов, подтверждения соответствия, выдачи подтверждающего судового документа и поставки в ИМО данных о премиальных единицах, подлежащих учету.

Кроме того, примечательной особенностью системы ИТВПГ является интеграция в нее системы финансирования в области климата. Выручка от продажи компенсационных единиц зарезервирована для проектов, связанных с изменением климата, в развивающихся странах. По мере того как продолжают реализовываться глобальные планы по декарбонизации, региональные нормативные акты уже оказывают ощутимое влияние на эксплуатацию судов. Система торговли квотами Европейского союза с 2025 г. включает морской транспорт, применяя цены на выбросы углерода как к перевозкам внутри ЕС (со 100%-ным охватом выбросов), так и к международным перевозкам в порты ЕС или из них (с 50%-ным охватом). Поэтапное

внедрение, охватывающее 40 % выбросов ПГ в 2024 г. и выходящее на полный охват к 2026 г., глубоко меняет экономический ландшафт для ведения деятельности в европейских водах.

Параллельно с этим в 2025 г. вступил в силу закон ЕС FuelEU Maritime, предусматривающий постепенное ужесточение мер по снижению выбросов ПГ в отношении энергии, используемой на судне (основанный на подходе WtW). Как показано на рис. 11, начиная с 2%-ного сокращения в 2025 г. регулирование направлено на достижение 80%-ного сокращения выбросов к 2050 г., что по задумке авторов должно привести к переходу на топливо с нулевыми или почти нулевыми выбросами ПГ.



Рис. 11. Траектория снижения выбросов ПГ FuelEU Maritime

Таким образом, влияние все более усложняющейся нормативно-правовой базы больше не является чем-то отдаленным. По мере того как нормативные акты вступают в силу, а правоприменительная практика ужесточается, соблюдение этих требований становится реальным фактором, препятствующим принятию коммерческих решений. От проектирования судов и выбора топлива до условий фрахтования и инвестиционных потоков соблюдение этих требований является неотъемлемой частью любого стратегического выбора.

2. Рынок морских перевозок усиливает регулирующее воздействие

Грузовладельцы, финансисты, фрахтователи и поставщики топлива формируют рынок, на котором показатели выбросов ПГ являются конкурентной переменной (табл. 2). Формируемое ими давление на морской рынок перевозок превращает процесс декарбонизации из затрат на соблюдение требований в стратегический источник дохода и финансирования [9].

Таблица 2

Реакция рынка на регулирующие меры

Участники рынка	Меры в 2024–2025 гг.	Влияние в 2025–2030 гг.
Грузовладельцы	«Коалиция грузовладельцев за суда с нулевым выбросом» (coZEV) в настоящее время охватывает флот контейнеровозов грузоместимостью более 35 млн TEU, некоторые бренды спонсируют создание «зеленых коридоров» между портами	Контракты на перевозку грузов расширяются, что приводит к снижению затрат
Финансовый сектор	> 70 % долговых обязательств судоходства связаны с кредитованием, обусловленным декарбонизацией судоходства	Экологичные суда приносят более низкий доход
Инвесторы	Удвоилось число чартерных договоров, а чартерные ставки начинают учитывать выбросы ПГ для конкретных судов	Прогнозируется, что разрыв в чартерных ставках между судами с рейтингами СП А, В и судами с рейтингами С, D составит 10–15 %
Поставщики топлива	В настоящее время в 15 портах осуществляется бункеровка метанолом, в 2024 г. подписано 13 соглашений о перевалке бункерного СПГ и аммиака	К 2030 г. доля альтернативного топлива может вырасти с 2 % до 10 % от всего рынка бункерного топлива.

3. Сближение политики, рынка и технологий

К середине десятилетия принимаемые в ЕС региональные меры могут повысить стоимость обычного топлива на европейских рынках примерно на 90–120 долл. США за тонну. В случае введения глобальных мер ИМО сборы ИТВПГ еще больше удорожают судовое топливо. Операторы, которые переходят на соответствующее требованиям топливо и/или получают дополнительные компенсационные единицы, окажутся в более выгодном положении только в том случае, если стоимость альтернативного топлива в купе с его экономией и выгодой от реализации премиальных единиц смогут покрыть эти сборы.

3.1. Изменение стоимости судов

Более 50 % тоннажа строящихся судов будут использовать альтернативное топливо, что отражает усилия отрасли по обеспечению надежности новых активов в будущем. Суда, использующие различные технологии по повышению эффективности, как правило, имеют наценку при перепродаже порядка 5–10 % по сравнению с традиционными судами. При этом последние подвержены риску снижения стоимости на вторичном рынке и преждевременного списания.

3.2. Расширение масштабов применения технологий

Расширение масштабов применения ЭЭТ, связанных с использованием ветра, воздушной смазки и др., происходит в соответствии с требованиями законодательства для поддержания старого тоннажа в соответствии с нормативными требованиями (рис. 12). В настоящее время вводятся в эксплуатацию двухтопливные двигатели на аммиаке и метаноле, а первые пилотные проекты по улавливанию CO₂ на борту указывают на будущие пути снижения выбросов.

ЛОГИСТИКА	ГИДРОДИНАМИКА	ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ	ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЭНЕРГИЯ	ПОСЛЕДУЮЩЕЕ УЛАВЛИВАНИЕ	СОЛНЕЧНАЯ И ВЕТРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА
СНИЖЕНИЕ СКОРОСТИ	АНТИОБРАСТАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ КОРПУСА	ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ	СПГ	СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕРОДА НА СУДАХ	СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ, РОТОРНЫЕ ПАРУСА, ЖЕСТКИЕ ПАРУСА
ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВ	ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ КОРПУСА И РАБОТЫ ВИНТА	РЕКУПЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННОГО ТЕПЛА	БИОТОПЛИВО		
УКРУПНЕНИЕ СУДОВ	ВОЗДУШНАЯ СМАЗКА КОРПУСА	ОГРАНИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ	МЕТАНОЛ		
АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАРШРУТЫ	ОЧИСТКА КОРПУСА	ГИБРИДНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ СИСТЕМЫ	АММИАК		
		ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	ВОДОРОД		
			БЕРЕГОВОЕ ПИТАНИЕ		
			ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ		
>20%	5 – 15%	5 – 20%	0 – 100%	0 – 90%	0 – 15%

Рис. 12. Способы сокращения выбросов ПГ и потенциал их снижения

3.3. Фонд чистых нулевых выбросов ИМО (IMO Net-Zero Fund)

По задумке ИМО, Фонд финансово поддержит исследования и разработки, инфраструктуру и справедливые переходные меры, которые потенциально позволяют реализовать новые проекты. Поскольку морская отрасль находится на пороге серьезных преобразований и в связи с ужесточением регулирования в области декарбонизации во всем мире и введением налога на выбросы углерода, затраты на соблюдение требований, по прогнозам, существенно возрастут уже к 2035 г. Это регуляторное давление изменит структуру потребления топлива и инвестиции в существующий флот судов, стимулируя расширение использования экологически чистых видов топлива и передовых технологий по мере того, как «зеленое» финансирование набирает обороты, предлагая стратегическую поддержку активным заинтересованным сторонам. Исследование содержит основанную на данных перспективу в пяти ключевых областях: регулирование, топливо, технологии, инфраструктура и динамика рынка, — которая позволяет составить

прогноз на предстоящее десятилетие. В нем содержится критический анализ прогресса морской отрасли в достижении нулевого уровня выбросов, а также оценка баланса между амбициозными целями и фактической реализацией.

4. Достижение целей по сокращению выбросов ПГ реально?

Несмотря на амбициозные цели, установленные ИМО и региональными властями, морская отрасль сталкивается со значительными трудностями в сокращении выбросов ПГ. Далее будет рассмотрена и представлена оценка текущих тенденций в области выбросов углекислого газа (CO₂), модернизации флота и внедрения альтернативных видов топлива. Также рассматриваются технологические, нормативные и экономические барьеры, препятствующие процессу.

4.1. Система показателей декарбонизации

Оценка прогресса судоходной отрасли в области снижения выбросов ПГ должна учитывать следующие критерии:

- внедрение ЭЭТ;
- переход на альтернативные виды топлива;
- соблюдение нормативов выбросов по показателю углеродоемкости (СИ);
- сравнительный анализ выбросов ПГ.

В табл. 3 каждому из этих аспектов присвоена оценка. Выбросы в судоходстве продолжают расти. В 2024 г. уровень выбросов CO₂ в атмосферу достиг 121 % от уровня 2008 г., несмотря на повышение интенсивности [10–13], что свидетельствует о том, что рост спроса опережает повышение операционной эффективности. Следующие пять лет определят, можно ли скорректировать траекторию или будет пропущен контрольный пункт ИМО, установленный к 2030 г.

Таблица 3

Реакция рынка на регулирующие меры в 2024 г.

Критерий	Показатель	Оценка, %	Источник
Применение ЭЭТ	Суда	11,3	Clarksons Research
	валовая вместимость	57	
Применение альтернативных топлив*	Суда	3	
	валовая вместимость	8	
Соответствие нормативной базе (СИ)	рейтинг СИ	66 (рейтинги А, В, С)	ABS
Сравнительный анализ выбросов	выбросы в рамках цепочки WtW	121 (по сравнению с 2008)	
* Включая нотацию «... ready» в символе класса.			

4.2. Текущий прогресс: выбросы CO₂, модернизация судов в эксплуатации и внедрение новых видов топлив

На долю морских перевозок приходится примерно 3 % глобальных выбросов ПГ [6–8]. Сокращение этих выбросов остается сложной задачей для отрасли, как показано на рис. 13. Несмотря на повышение энергоэффективности судов, углеродный след в отрасли сохраняется. Если смотреть с точки зрения операционной эффективности, то уровень выбросов в зависимости от грузоподъемности и расстояния (транспортной работы) за последние несколько лет практически не изменился.

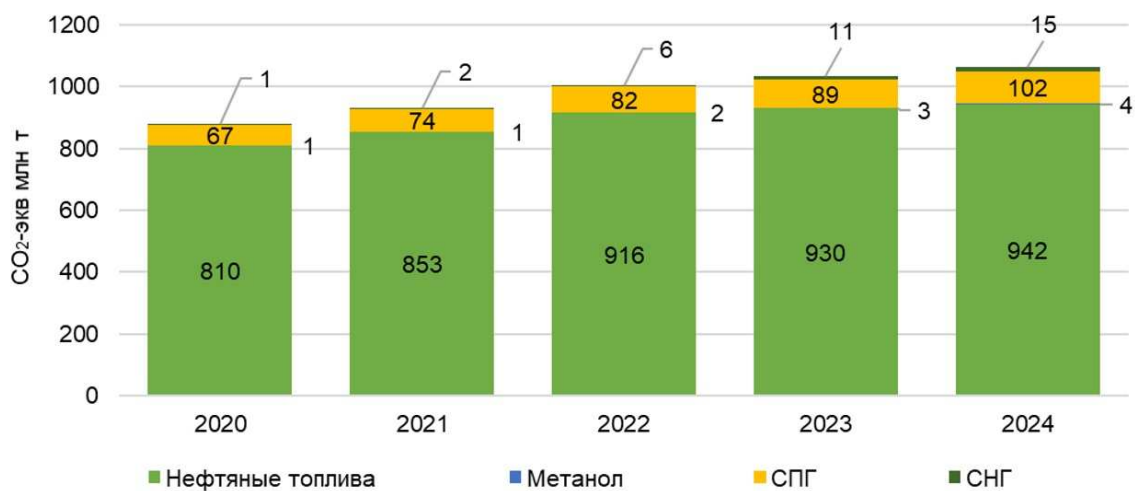


Рис. 13. Выбросы ПГ морским транспортом в 2020–2024 гг.

Данные рис. 14а показывают, что 65–67 % мирового флота соответствуют требованиям индекса СИ, имея рейтинги А, В или С. В целях выполнения нормативных требований, включая FuelEU Maritime и систему «чистого нуля» ИМО, судовладельцы активно модернизируют суда путем установки двухтопливных двигателей, использующих СПГ или метанол в качестве топлива. Утверждение на КЗМС 83 плана разработки нормативной базы для бортовых систем улавливания углерода (ОССС) создает дополнительные стимулы для внедрения данных технологий в отрасли.

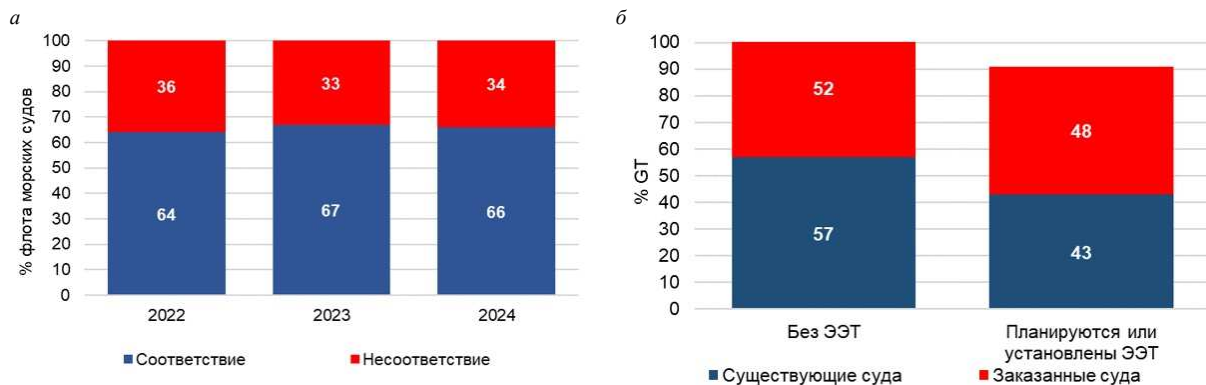


Рис. 14. Процент соответствия СИ судов мирового флота (а); применение ЭЭТ на существующих и строящихся судах (б)

Модернизация судов при помощи ЭЭТ давно стала отраслевым стандартом для соблюдения экологических норм и снижения расхода топлива. Широко внедряются ветропропульсивные установки (далее — ВПУ) и системы воздушной смазки, позволяющие снизить нагрузку на главные двигатели, а также применяются операционные меры, такие как оптимизация маршрутов движения судна и дифферента. Согласно данным Clarkson Research, около 11 % судов мирового флота (почти 43 % по тоннажу) уже оснащены ЭЭТ, что демонстрирует растущий тренд на экологизацию отрасли.

Анализ текущего портфеля заказов свидетельствует о структурном сдвиге в сторону экологизации судоходства. Около 34 % заказанных судов планируется оснастить ЭЭТ, что составляет 48 % от общего тоннажа новых судов. Доля альтернативных видов топлива в новых заказах достигла 35 % в 2024 г. [13], при этом СПГ сохраняет лидирующие позиции с 70 % в сегменте силовых установок, использующих альтернативное топливо. В 2024 г. было заказано около 400 судов на СПГ, что существенно превышает показатели метанола (130 заказов) и аммиака (30 проектов). Метанол привлекателен благодаря совместимости с существующими энергетическими установками, тогда как аммиак рассматривается как перспективное решение с нулевым уровнем выбросов, несмотря на его опасность (токсичен). Указанные тенденции наглядно отражены на рис. 15.



Рис. 15. Доля различных видов альтернативных топлив в портфеле заказов

Регуляторные инициативы становятся ключевым драйвером перехода на альтернативные виды топлива в судоходстве. Наряду с международными стандартами, значительную роль играют региональные программы, такие как требование Норвегии к нулевым выбросам паромов в фьордах, внесенных в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, к 2026 г. Данный мандат уже стимулировал внедрение гибридных аккумуляторных систем и позволил местным операторам паромных линий добиться существенного снижения выбросов CO₂ на местных маршрутах. Этот пример демонстрирует эффективность целевых региональных мер в ускорении технологической трансформации отрасли.

4.3. Прогноз спроса на энергию и выбросы CO₂ морским транспортом

Основной прирост мирового населения в ближайшие десятилетия будет обеспечиваться развивающимися странами (рис. 16). Поскольку для реализации их демографического потенциала и роста доходов потребуются десятилетия, это окажет сдерживающее влияние на рост спроса на грузоперевозки. Ожидается, что данный фактор в сочетании с внедрением низкоуглеродных технологий и топлив приведет к стабилизации общего объема потребления топлива и снижению выбросов CO₂ к 2050 г. Достижение целей ИМО по нулевым выбросам будет напрямую зависеть от скорости внедрения альтернативных видов топлива и развития сопутствующей инфраструктуры.

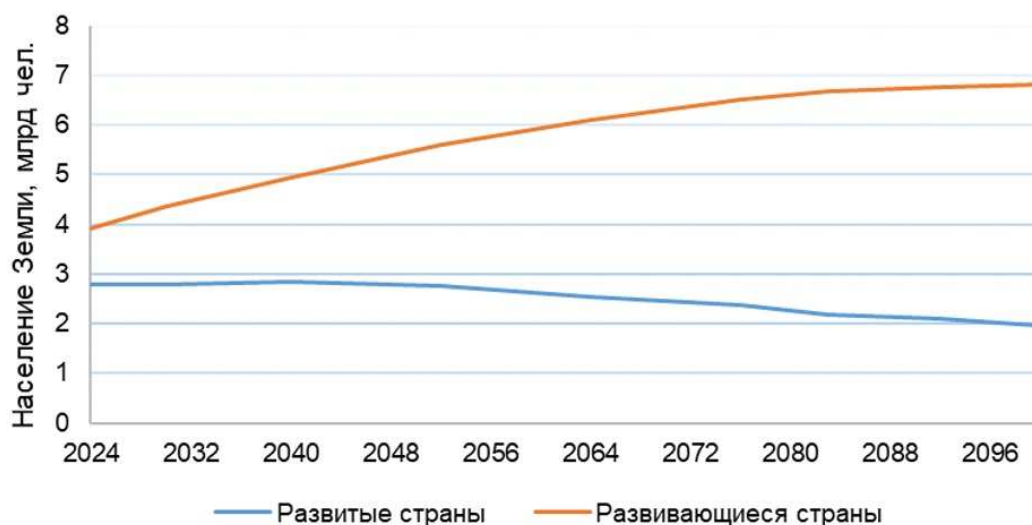


Рис. 16. Прогноз роста населения Земли в развитых и развивающихся странах

4.4. Препятствия на пути сокращения выбросов: проблемы развития, нормативно-правовая база и экономика

А. Технологические ограничения.

Внедрение безуглеродных видов топлива, таких как аммиак и водород, сдерживается технологическими сложностями и неразвитой бункеровочной инфраструктурой. В то время как мировая сеть бункеровки СПГ охватывает около 190 портов, создание аналогичных цепочек для новых видов топлива находится на начальной стадии, что создает ключевой инфраструктурный барьер, как это было с СПГ около 10–15 лет назад.

В. Неопределенность в регулировании.

Несмотря на амбициозность целей ИМО по сокращению выбросов, механизмы их достижения требуют дальнейшей детализации.

С. Экономические ограничения.

Широкому переходу на альтернативные виды топлива препятствует значительная разница в цене: стоимость экологичного метанола и аммиака в 2–3 раза превышает цену традиционного топлива. Дополнительным фактором являются низкие темпы пополнения и вывода из эксплуатации флота транспортных судов, где длительный жизненный цикл судов (25–30 лет) замедляет эффект от обновления.

4.5. Готовность судоходной отрасли

Анализ готовности ключевых сегментов морского флота транспортных судов (контейнеровозы, сухогрузы, танкеры) выявляет разнородную картину. Наибольший прогресс наблюдается в контейнерных перевозках, где до 80 % новых судов в портфеле заказов проектируются под альтернативные виды топлива, тогда как другие сегменты демонстрируют более медленные темпы адаптации.

Широкое внедрение ЭЭТ на существующих судах мирового флота является ключевым достижением, однако в списке заказанных судов их доля снижается. Это свидетельствует о том, что судовладельцы рассматривают ЭЭТ и переход на альтернативное топливо как частично взаимоисключающие инвестиции в контексте выполнения нормативных требований.

Несмотря на текущее соответствие большинства судов индексу СП, сама по себе эта мера является временной. Начиная с 2030 г., дальнейшее ужесточение целей ИМО по сокращению выбросов потребует не просто соответствия, а масштабного перехода на безуглеродные топлива, для чего текущих отраслевых усилий остается недостаточно.

5. Роль регулирования и затраты на соблюдение требований

Регуляторные механизмы ИМО и ЕС по декарбонизации судоходства используют один и тот же методический подход «от скважины до винта», включающий укрупненный учет выбросов «от скважины до танка» (WtT), оценивающий выбросы по всему жизненному циклу топлива (произведенные до того, как топливо попало на судно), и «от танка до винта» (TtW), учитывающий прямые выбросы судна (рис. 17, табл. 4).

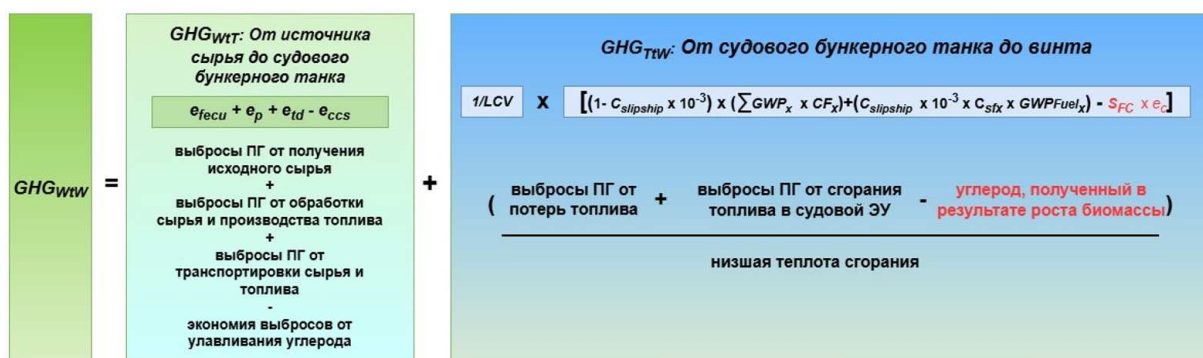


Рис. 17. Суммарное значение выбросов ПГ для топлива или его составляющих, образующихся в результате его жизненного цикла

Таблица 4

Категории нормативного регулирования, направленного на декарбонизацию морского судоходства	
Меры для реализации методологии TtW	Меры для реализации методологии WtW
Показатель эксплуатационной углеродоемкости ИМО (СИ)	Регламент Европейского союза по декарбонизации морского судоходства (FuelEU Maritime)
Система торговли углеродными квотами Евросоюза (EU ETS)	Система «чистого нуля» ИМО (IMO NZF), Интенсивность топливных выбросов ПГ (ИТВПГ — GFI)

Хотя меры TtW проще в реализации, именно переход на WtW-совместимое топливо является необходимым условием для достижения долгосрочных климатических целей ИМО. Отдельные решения, такие как бортовое улавливание углерода (Onboard carbon capture systems — OCCS) или использование ветропропульсивных установок (Wind Propulsion System — WPS — ВПУ), учитывают путем введения специальных редуцированных коэффициентов в нормативных актах и методиках (например, в FuelEU Maritime), что создает дополнительные стимулы для инвестирования в них.

6. Тенденции международного судоходства ИМО по выбросам ПГ

Краткосрочные меры ИМО, включающие коэффициент энергоэффективности существующих судов (EEXI) и показатель углеродоемкости (СИ), поспособствовали снижению углеродоемкости судоходства. Несмотря на рост общих выбросов ПГ с 886 млн т в 2008 г. до 900 млн т в 2018 г., углеродоемкость по показателю эксплуатационной эффективности судов (Annual Efficiency Ratio — AER) снизилась на 21 %, а по показателю энергетической эффективности во время работы судна (Energy Efficiency Operational Indicator — EEOI) — на 29 %. Дальнейшее применение этих мер в 2021–2023 гг. привело к дополнительному снижению углеродоемкости на 4–8 %. По данным системы сбора данных ИМО (IMO DCS) за 2023 г., более 75 % судов мирового флота соответствуют требованиям СИ, имея рейтинг «С» или выше. Важно отметить, что СИ основан на показателе (Annual Efficiency Ratio — AER) (рис. 18, 19), отражающем интенсивность выбросов, а не абсолютный объем потребляемого топлива.

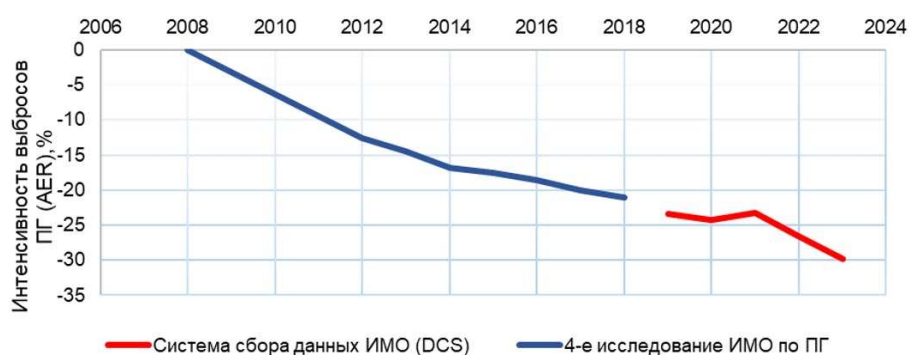


Рис. 18. Снижение выбросов ПГ на судах по данным ИМО



Рис. 19. Рейтинги СИ на судах в 2023 г.

Согласно данным ИМО DCS, представленным на рис. 20а, потребление мазута в 2023 г. сократилось на 1 %, тогда как использование биотоплив продемонстрировало рост на 73 %. Несмотря на значительные темпы роста, доля биотоплив в общем энергобалансе отрасли остается незначительной и составляет лишь 0,2 %.

Действующие меры регулирования ЕС, включая систему ETS и FuelEU Maritime, имеют ограниченное влияние на судовладельцев в силу следующих факторов:

- географическая ограниченность действия;
- возможность переложения затрат по ETS на фрахтователей;
- неопределенность гармонизации с перспективными мерами ИМО.

В этой связи ключевое значение приобретает анализ глобальных последствий готовящихся среднесрочных мер ИМО, которые, как ожидается, станут системным драйвером для широкомасштабного внедрения низкоуглеродных технологий, альтернативных видов топлива и развития соответствующей инфраструктуры [14, 15].

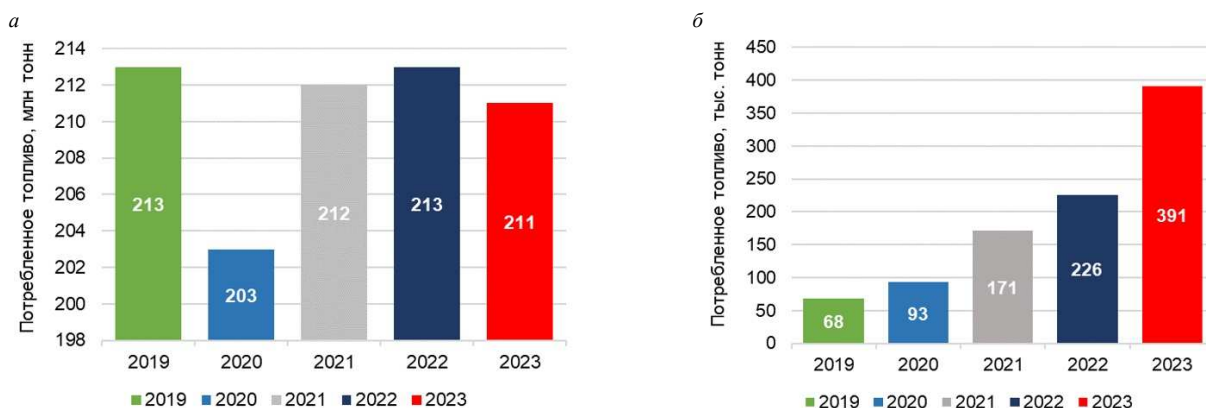


Рис. 20. Данные ИМО по потребленному нефтяному топливу (а) и потребленному биотопливу (б)

6.1. Среднесрочные меры ИМО по соблюдению глобальных требований. Система «чистого нуля» ИМО

Глобальный механизм ценообразования на выбросы ИМО, разработанный в рамках системы «чистого нуля» ИМО (IMO Net Zero Framework), станет ключевым драйвером перехода на низкоуглеродные виды топлива в судоходстве. В отличие от региональных аналогов, NZF использует двухуровневую систему компенсационных единиц по фиксированным ценам до 2030 г.: 100 долл. США за тонну CO₂-экв. для прямых выбросов и 380 долл. США за тонну CO₂-экв. для базовых. Дополнительным стимулом служит премирование использования топлива с углеродоемкостью ниже 19 г CO₂-экв./МДж. Прогнозная динамика штрафных санкций демонстрирует существенное влияние на операционные расходы: при суточном потреблении VLSFO 30 т/сут суточные операционные расходы вырастут с примерно 4200 долл. США в 2028 г. до 15 000 долл. США к 2035 г. Для крупнотоннажных судов с расходом 50 т топлива в сутки соответствующие расходы составят 6000 долл. США и 25 000 долл. США; результаты расчетов представлены на рис. 21.

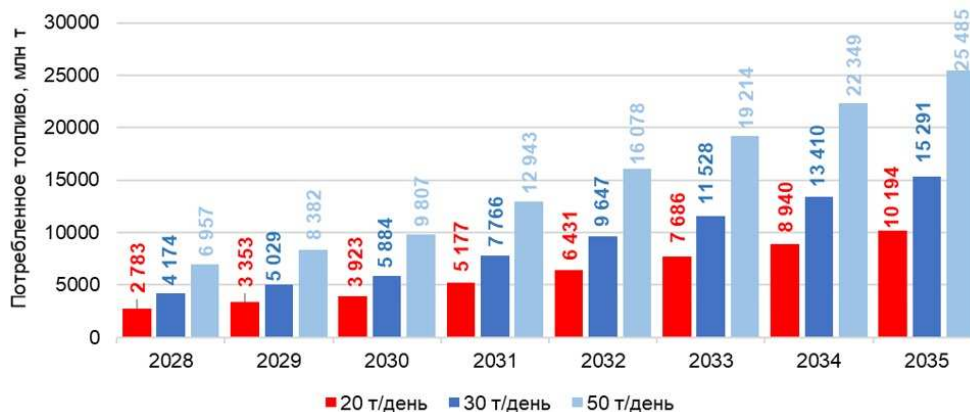


Рис. 21. Прогноз увеличения суточных операционных расходов к 2035 г. в случае принятия системы «чистого нуля» ИМО (кроме ЕС)

Отсутствие определенности в отношении стоимости компенсационных единиц после 2030 г. ограничивает долгосрочное прогнозирование, однако очевидно, что дальнейший рост цен на углеродные единицы приведет к дополнительному увеличению финансовой нагрузки на судовладельцев.

Сравнение финансовой нагрузки регуляторных механизмов декарбонизации

Для судов, работающих в юрисдикции ЕС, с 2028 г. совокупная финансовая нагрузка будет формироваться под воздействием трех ключевых мер: глобального механизма ИМО (NZF), системы ETS ЕС и регламента FuelEU Maritime. Согласно прогнозу для судна с суточным потреблением 30 т/сут VLSFO, динамика затрат имеет следующую структуру: EU ETS доминирует в начальный период (до 2031 г.), достигая ~8700 долл. США в день при цене квоты 80 евро/т CO₂-экв. ИМО NZF становится основным драйвером затрат в 2032–2034 гг., составляя от 9600 до 13 400 долл. США в день. FuelEU Maritime создает наибольшую нагрузку к 2035 г., с прогнозируемыми ежедневными затратами около 21 000 долл. США. Суммарный эффект этих мер является трансформационным: совокупные ежедневные расходы на соблюдение нормативов возрастают с 15 000 долл. США в 2028 г. до 45 000 долл. США в 2035 г. Данный уровень финансовой нагрузки создает существенные риски для конкурентоспособности малых и средних судоходных компаний, результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 22.

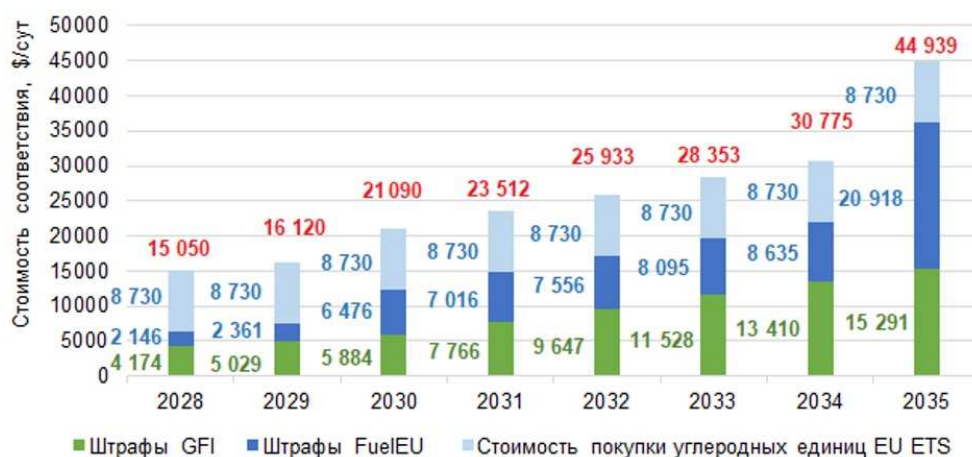


Рис. 22. Прогноз увеличения суточных операционных расходов к 2035 г. для судна с расходом топлива 30 т/сут, совершающего внутренние рейсы в ЕС с прогнозируемым увеличением штрафов FuelEU на 10 % в год и стоимостью углеродной единицы 80 евро/т CO₂-экв.

В связи с этим усиливается давление на институты ЕС с целью пересмотра дублирующего регулирования — исключения судоходства из EU ETS и отмены FuelEU Maritime — для предотвращения тройного финансового бремени и минимизации негативных последствий для европейской торговли и конечных потребителей в случае принятия глобальной системы «чистого нуля» ИМО.

6.2. Эффективность системы «чистого нуля» ИМО

На основе эволюции базовых и прямых показателей соответствия, а также интенсивности выбросов различных видов топлива можно оценить нормативный баланс, как показано на рис. 23, в то время как рис. 24 также включает стоимость топлива, принимая во внимание интенсивность выбросов и разницу в затратах, приведенную в табл. 5. Единицы вознаграждения (которые будут присуждаться топливам с интенсивностью выбросов ниже 19 г CO₂-экв./МДж до 2034 г.) ИМО еще не установлены, и они не включены в настоящее рассмотрение, где в качестве эталонного экологически чистого топлива взят экологически чистый «зеленый» метанол, для оценки уровня вознаграждения. Само по себе вознаграждение требуется для того, чтобы сделать экологически чистое топливо конкурентоспособным в промежутке до 2035 г.

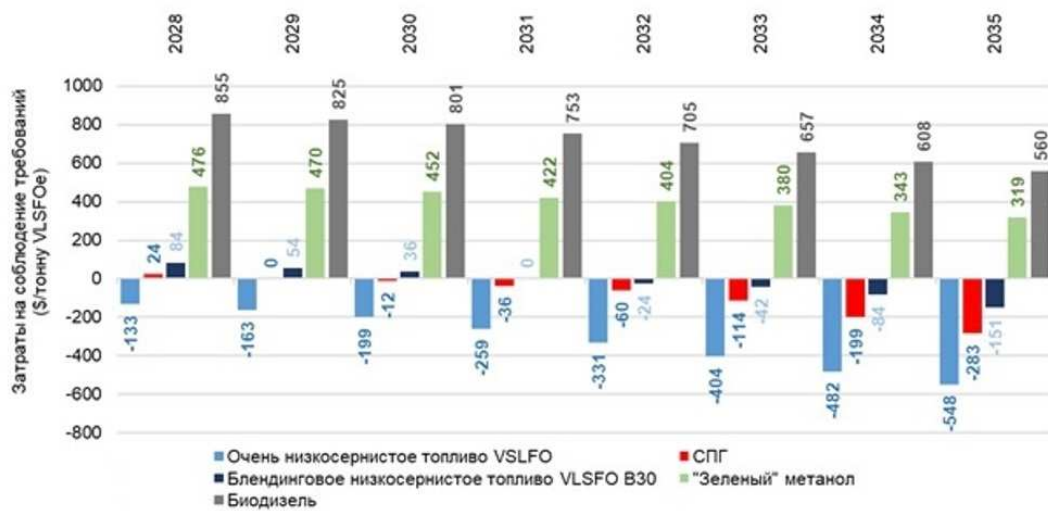


Рис. 23. Затраты на соблюдение требований (цена самого топлива не учитывается)

Таблица 4

Приведенная стоимость альтернативных топлив (к цене низкосернистого мазута)

Топливо	WtW CO ₂ -экв. (г CO ₂ -экв./МДж)	Приведенная стоимость (долл. США)
VLSFO	95,48	0
СПГ	76,13	80
LSFO B30	71,17	200
Биодизель	16,37	943
«Зеленый» метанол	13,67	1465

На рис. 23 и 24 положительные значения — это экономия, в то время как отрицательные значения — это затраты. При этом экономия, выраженная в терминах NZF, может быть использована для компенсации штрафных санкций, связанных с увеличением количества судов, загрязняющих окружающую среду. Очевидно, что и СПГ, и LSFO B30 являются надежными решениями на среднесрочную перспективу, в то время как биодизель и другие топлива являются долгосрочными альтернативами для соответствия требованиям Фонда чистых нулевых выбросов ИМО. Уже сейчас очевидно, что система IMO NZF принесет значительные доходы для заинтересованных сторон, в первую очередь для ИМО. Однако до тех пор, пока деятельность Фонда не будет прозрачной и справедливой, выбросы углерода станут лишь дополнительным фактором затрат для судовладельцев.

Дополнительную ясность можно получить, добавив стоимость топлива к затратам на удовлетворение нормативных требований (рис. 24).

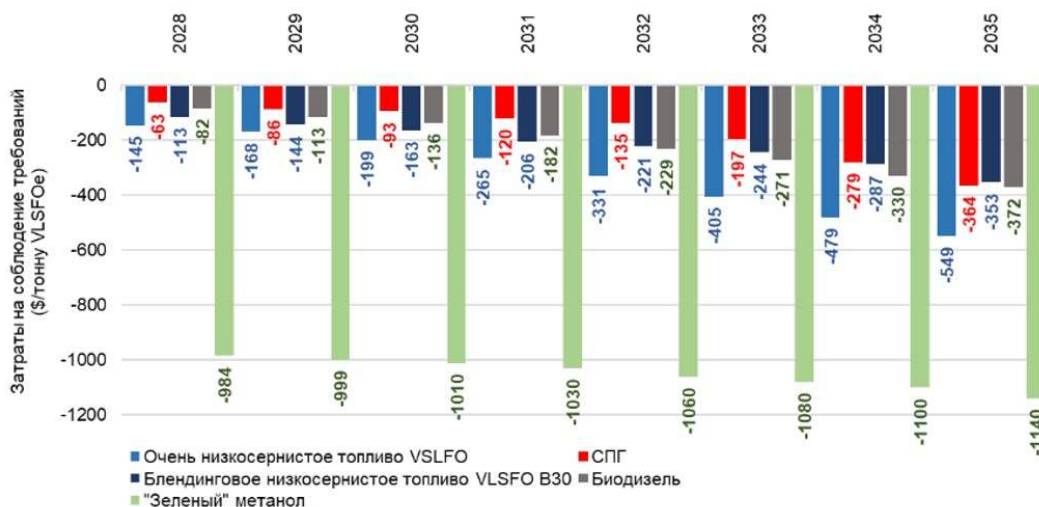


Рис. 24. Затраты на соблюдение требований с учетом цены самого топлива

Приведенные здесь результаты демонстрируют, что ни один из рассматриваемых экологически чистых видов топлива не приносит прибыль, а определяющим фактором при рассмотрении экономической целесообразности низкоуглеродных альтернативных видов топлива является сочетание интенсивности выбросов и стоимости топлива. В частности, для топлива с интенсивностью выбросов ниже 19 г CO₂-экв./МДж (здесь — «зеленому» метанолу) потребуется соответствующая единица вознаграждения ИМО, составляющая примерно 1000 долл. США, чтобы компенсировать разницу в цене между метанолом и низкосернистым топливом марки VLSFO.

ВЫВОДЫ

Краткосрочные мероприятия ИМО (ЕЕХI и СИ) уже доказали свою эффективность: углеродоемкость судоходства снизилась, однако абсолютные выбросы CO₂ продолжают расти и в 2024 г. составили 121 % от уровня 2008 г. Эти меры носят временный характер и не способны обеспечить выполнение амбициозных целей ИМО. Однако введение глобального механизма NZF ИМО потенциально создаст значительную финансовую нагрузку на отрасль. Для судов, работающих в водах ЕС, суммарный эффект от одновременного применения NZF, EU ETS и FuelEU Maritime приведет к резкому росту операционных расходов, что может негативно отразиться на стоимости европейской торговли. В текущей конфигурации NZF не создает достаточных стимулов для инвестиций в экологичные виды топлива, поскольку установленные цены не компенсируют разницу в стоимости между традиционным и низкоуглеродным топливом.

Вводимая с 2028 г. глобальная система IMO Net-Zero Framework (GFI + компенсационные платежи) и параллельное действие трех европейских механизмов (EU ETS, FuelEU Maritime, IMO NZF) приведут к резкому росту операционных расходов. Для типового судна с расходом 30 т VLSFO в сутки совокупные ежедневные затраты на соблюдение требований могут вырасти с ~15 000 долл. в 2028 г. до 45 000 долл. в 2035 г. Основная финансовая нагрузка ляжет на конечных потребителей транспортных услуг.

Ни одно из «зеленых» топлив (зеленый метанол, аммиак, водород, биодизель) в текущих ценовых и инфраструктурных условиях не является экономически выгодным. Только СПГ демонстрирует реальную конкурентоспособность и развитую инфраструктуру, выступая наиболее прагматичным переходным топливом до появления масштабируемых безуглеродных решений.

Система компенсационных единиц IMO Net-Zero Fund в предложенной конфигурации (100 и 380 долл./т CO₂-экв.) не создает достаточных экономических стимулов для массового перехода на топлива с интенсивностью выбросов ниже 19 г CO₂-экв./МДж. Требуется существенное повышение размера премиальных единиц (порядка 1000 долл. для зеленого метанола), иначе инвестиции в действительно низкоуглеродные топлива останутся невыгодными.

Отрасль находится на переломном этапе. Без синхронизации политики, технологий, инфраструктуры и капитала разрыв между заявленными целями ИМО и реальными возможностями судоходства будет только увеличиваться. Наиболее вероятный сценарий до 2035 г. — массовое использование СПГ в сочетании с технологиями повышения энергоэффективности и бортового улавливания CO₂, а также постепенное внедрение ядерных энергетических установок в 2030-х гг.

Таким образом, текущая регуляторная архитектура скорее превращает декарбонизацию в дополнительный торговый барьер и источник доходов для регуляторов, чем создает реальные условия для масштабного и экономически обоснованного перехода к нулевым выбросам к 2050 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков А.Ф. Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А.Ф. Бурков, В.В. Миханович, В.Х. Нгуен // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2020. — Т. 12, № 2. — С. 381–389. — DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
2. Авдеев Б.А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов / Б.А. Авдеев // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2021. — № 4. — С. 99–113. — DOI 10.47404/2619-0605_2021_4_99. — EDN BFMOLU.
3. Медведев В.В. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов / В.В. Медведев, В.В. Гаврилов, С.Н. Киселев // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 2-1(40). — С. 94–103. — EDN XSHLHF.
4. Arief I.S. Review of alternative energy resource for the future ship power / I.S. Arief, A. Fathalah // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2022. — Vol. 972, No. 1. — P. 012073. — DOI 10.1088/1755-1315/972/1/012073. — EDN BWYRVZ.
5. Секриер С.С. Атомная энергетика в судостроении. Опыт прошлого для развития в будущем / С.С. Секриер, В.Н. Кравчишин // Судостроение. — 2023. — № 6(871). — С. 25–32. — EDN DBQFGC.
6. 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. Шурпяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBBBJV.
7. Магаровский В.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2. Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № 1(403). — С. 167–182. — DOI 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182. — EDN PXQOES.
8. Наумов В.С. Оценка влияния на окружающую среду при эксплуатации судна / В.С. Наумов, А.В. Морозова, Е.Ю. Чебан // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 3-3(69). — С. 47–54. — DOI 10.37220/МТ.2025.693.054. — EDN IFSKAR.
9. Grzelakowski A.S. Maritime shipping decarbonization: Roadmap to meet zero-emission target in shipping as a link in the global supply chains / A.S. Grzelakowski, J. Herdzik, S. Skiba // Energies. — 2022. — Vol. 15, No. 17. — P. 6150. — DOI 10.3390/en15176150. — EDN BQRTGE.
10. Тория Т.Г. Оценка загрязнения атмосферы при работе морского порта на примере порта г. Новороссийска / Т.Г. Тория, А.И. Епихин, А.В. Кукарцев, С.О. Курашкин и др. // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29, № 4. — С. 66–71. — DOI 10.18412/1816-0395-2025-4-66-71. — EDN HWHTMP.
11. Применение альтернативных видов топлива для обеспечения экологической безопасности морских судов / В.П. Говорухин, А.А. Таранцев, В.А. Родионов, О.А. Королев // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 1-1(67). — С. 75–81. — DOI 10.37220/МТ.2025.67.1.009. — EDN OVKONH.
12. Магаровский В.В. Новое в Международной политике снижения эмиссии парниковых газов и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 3. Альтернативное топливо как мера для достижения целевых показателей эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № 4(406). — С. 174–190. — EDN XUYPFY.
13. Будниченко М.А. Мировое судостроение в 2024 г. и прогноз его развития на 2025 г. / М.А. Будниченко, В.Н. Половинкин // Судостроение. — 2025. — № 2(879). — С. 4–8. — EDN RLXRFU.
14. Демешко Г.Ф. Сравнительный анализ альтернативных способов обеспечения соответствия экологическим нормам выбросов выхлопных газов судов / Г.Ф. Демешко, В.М. Кашаев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2024. — № 4(410). — С. 111–126. — EDN ARLSNL.
15. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJOQTC.

REFERENCES

1. Burkov A.F., Mikhanshina V.V., Nguyen V.H. Improving the management efficiency of combined power plants of ships. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 381–389. DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389. (In Russ.)
2. Avdeev B.A. Intelligent energy-efficient systems of marine vessels. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University]*. 2021. No. 4. P. 99–113. DOI 10.47404/2619-0605_2021_4_99. EDN BFMOLU. (In Russ.)
3. Medvedev V.V., Gavrilov V.V., Kiselev S.N. Review and analysis of the possibility of various methods of increasing the energy efficiency of vessels. *Marine Intellectual Technologies*. 2018. No. 2-1(40). P. 94–103. EDN XSHLHF. (In Russ.)
4. Arief I.S., Fathalah A. Review of alternative energy resource for the future ship power. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 972, No. 1. P. 012073. DOI 10.1088/1755-1315/972/1/012073. EDN BWYRVZ.
5. Sekrier S.S., Kravchishin N.V. Atomnaya energetika v sudostroenii. Opyt proshlogo dlya razvitiya v budushchem [Nuclear energy in shipbuilding sector. Experience from the past for development in the future]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2023. No. 6(871). P. 25–32. EDN DBQFGC.
6. 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.)

7. Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. Novelty in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 2. Efficiency analysis of power-saving measures intended to reduce greenhouse gas emissions. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 1, No. 403. P. 167–182. DOI 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182. EDN PXQOES. (In Russ.)
8. Naumov V.S., Morozova A.V., Cheban E.Yu. Environmental impact assessment during the operation of the vessel. *Marine Intellectual Technologies*. 2025. No. 3-3(69). P. 47–54. DOI 10.37220/MIT.2025.693.054. EDN IFSKAR. (In Russ.)
9. Grzelakowski A.S., Herdzyk J., Skiba S. Maritime shipping decarbonization: Roadmap to meet zero-emission target in shipping as a link in the global supply chains. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 17. P. 6150. DOI 10.3390/en15176150. EDN BQRTGE.
10. Toriya T.G., Epikhin A.I., Kukartsev A.V., Kurashkin S.O. et al. Estimation of atmospheric pollution during the operation of a seaport on the example of the port of Novorossiysk. *Ecology and Industry of Russia*. 2025. Vol. 29, No. 4. P. 66–71. DOI 10.18412/1816-0395-2025-4-66-71. EDN HWHTMP. (In Russ.)
11. Govorukhin V.P., Tarantsev A.A., Rodionov V.A., Korolev O.A. The use of alternative fuels to ensure the environmental safety of ships. *Marine Intellectual Technologies*. 2025. No. 1-1(67). P. 75–81. DOI 10.37220/MIT.2025.67.1.009. EDN OVKOHH.
12. Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. Novelty in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 3. Alternative fuels as a measure to reach target levels of greenhouse gas emissions. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 4, No. 406. P. 174–190. EDN XUYPFY.
13. Budnichenko M.A., Polovinkin V.N. World shipbuilding in 2024 and its projected growth in 2025. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2025. No. 2(879). P. 4–8. EDN RLXRFU.
14. Demeshko G.F., Kashaev V.M. Comparative analysis of alternative ways to meet the limits of exhaust gas emissions by ships. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2024. No. 4(410). P. 111–126. EDN ARLSNL. (In Russ.)
15. 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. EDN FJOQTC.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026.

Принята к публикации 24.02.2026.

УДК 629.12
EDN JNRPWH

МЕЖДУНАРОДНЫЕ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ СТРАТЕГИИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА: АНАЛИЗ МЕР И ТЕНДЕНЦИЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

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

Д.С. Семионичев, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

В работе представлены результаты анализа международных и национальных мер по декарбонизации морского и внутреннего водного транспорта, основные международные меры, а также национальные инструменты внутренней политики, направленные на снижение углеродного следа транспортных услуг. Цель данной статьи — представить читателю исчерпывающий перечень имеющихся на данный момент национальных и международных инструментов по борьбе с ущербом от выбрасываемого судами в окружающую среду углерода и выявить основные тренды глобальной трансформации транспортного сектора мировой экономики.

Ключевые слова: декарбонизация, парниковые газы, национальные меры, международные меры, ИМО, EEDI, EEXI, CII.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Международный опыт декарбонизации водного транспорта / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 38–60. — EDN JNRPWH.

INTERNATIONAL AND NATIONAL STRATEGIES FOR DECARBONIZATION OF WATER TRANSPORT: ANALYSIS OF MEASURES AND TRENDS OF GLOBAL TRANSFORMATION

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

D.S. Semionichev, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

The paper presents the results of an analysis of international and national measures to decarbonize maritime and inland waterway transport, the main international measures, as well as national domestic policy instruments aimed at reducing the carbon footprint of transport services. The purpose of this article is to provide the reader with the exhaustive list of currently available national and international instruments compensating damage from carbon emitted by ships into the environment and to identify the main trends in the global transformation of the transport sector of the global economy.

Key words: decarbonization, greenhouse gases, national measures, international measures, IMO, EEDI, EEXI, CII.

For citation: Reutskii A.S., Semionichev D.S. International and national strategies for decarbonization of water transport: analysis of measures and trends of global transformation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 38–60. EDN JNRPWH. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

На морской транспорт приходится около 2,9 % глобальных выбросов CO₂ [1], и если бы он был страной, то занимал бы 6-е место в мире по объему выбросов. При этом выбросы морского транспорта имеют международный характер, ведь нередко судно, зарегистрированное в одной стране, принадлежащее компании из другой, перевозит грузы между третьими странами. Это делает невозможным регулирование на уровне одной страны — требуется сочетание глобального и национального подходов. Морской и внутренний водный транспорт имеет долгий жизненный цикл, длительность которого составляет 25–30 лет. По этой причине решения, принятые в ближайшем будущем, определяют выбросы парниковых газов (далее — ПГ) в ближайшие десятилетия.

Процесс декарбонизации сталкивается со многими проблемами, и его участники, как в любом политически обусловленном направлении деятельности человека, имеют различные мотивы и склонны прибегать к различным методам их достижения, что рождает значительные противоречия при выработке согласованной международной политики, приводящие, в свою очередь, к коллизиям при согласовании национальной политики и международных требований [2, 3].

Основной и наиболее значительной проблемой процесса декарбонизации стало отсутствие единого решения при замене ископаемого топлива, предназначенного для энергетических установок судов. Обновленная стратегия Международной морской организации (ИМО) 2023 г. ставит амбициозные цели по достижению «околонулевого» уровня выбросов ПГ с морских судов к 2050 г. в отсутствие масштабируемых на весь мировой флот решений по замене ископаемого топлива. Как уже неоднократно освещалось в литературе [4], в настоящий момент рассматривается сразу несколько направлений решения проблемы выбросов ПГ энергетическими установками транспортных судов, в частности использование «альтернативных» топлив [5], атомной энергии и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В одном ряду с этими мерами стоит использование биотоплива, то есть топлива, для производства которого используется возобновляемое сырье биогенного происхождения, что является по сути административным путем решения поставленных стратегией ИМО задач, так как основную проблему парникового эффекта использование биотоплива не решает. При внимательном рассмотрении тезис о том, что для биотоплива не должны учитываться выбросы ПГ при их использовании на борту судна (ТtW), так как источником углерода в нем является биомасса, которая содержит углерод естественного происхождения (поглощенный из атмосферы), сам по себе неопровержим, но в результате использования биотоплива все также происходят выбросы ПГ в атмосферу и дальнейшее развитие парникового эффекта, который бы не произошел, останься углерод в виде исходного сырья (остатков растительных культур, сырья биогенного происхождения). Дополнительно следует отметить, что 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 использовании в судовой ЭУ, предлагается учитывать потребление энергии и производить оценку выбросов CO₂ за весь жизненный цикл топлива [6].

Однако, несмотря на сложившиеся противоречия, важно понимать номенклатуру имеющихся в настоящий момент инструментов международной политики в сфере декарбонизации, задающей глобальные цели, а также инструменты национальной политики наиболее прогрессивных с точки зрения декарбонизации стран и основные цели этих усилий. Целью данного исследования является обзор существующих нормативных инструментов ИМО (международный уровень) и инструментов внутренней политики некоторых стран, подписавших Парижское соглашение ООН и активно участвующих в декарбонизации.

1. СТРАТЕГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ МОРСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ (ИМО)

ИМО является специализированным учреждением ООН, отвечающим за безопасность судоходства и предотвращение загрязнения моря и атмосферы с судов. Деятельность ее направлена на поддержку целей в области устойчивого развития ООН [7]. Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов ПГ с судов была принята в 2018 г. [8], в ходе дальнейшей работы в 2023 г. она была значительно пересмотрена в части комплекса мер по борьбе с парниковыми газами и ужесточением требований и стала носить название «Стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов 2030 года» [9]. Целями стратегии является принятие комплекса мер, направленных на:

- снижение углеродоемкости судна за счет повышения его энергоэффективности;

- снижение углеродоемкости международных перевозок — сокращение выбросов CO₂ на одну транспортную операцию в среднем по международным перевозкам как минимум на 40 % к 2030 г. по сравнению с 2008 г.;

- расширение внедрения технологий, видов топлива и/или источников энергии с нулевым или близким к нулевому уровнем выбросов парниковых газов — к 2030 г. использование технологий, видов топлива и/или источников энергии с нулевым или близким к нулевому уровню выбросов парниковых газов должно составлять не менее 5 %, стремясь к 10 % от энергии, используемой международным судоходством;

- выбросы парниковых газов в результате международных перевозок должны достичь чистого нуля — устранить выбросы парниковых газов в результате международных перевозок в кратчайшие сроки и достичь чистого нуля выбросов парниковых газов близко к 2050 г., учитывая различные национальные условия, одновременно прилагая усилия по их поэтапному прекращению, с долгосрочной целью поддержания температуры, указанной в статье 2 Парижского соглашения [10].

Кроме того, Комитет по защите морской среды по итогам работы 80-й сессии [9] установил два ориентировочных контрольных пункта для достижения чистого нуля выбросов парниковых газов в результате международных перевозок:

- сократить общие ежегодные выбросы парниковых газов в результате международных перевозок как минимум на 20 %, стремясь к 30 % в 2030 г. по сравнению с 2008 г.;

- сократить общие ежегодные выбросы парниковых газов в результате международных перевозок как минимум на 70 %, стремясь к 80 % в 2040 г. по сравнению с 2008 г.

В рамках Первоначальной стратегии ИМО в 2021 г. приняты поправки к Приложению VI к МАРПОЛ, в соответствии с которыми были введены так называемые краткосрочные меры — требования технического (коэффициенты энергоэффективности строящихся и существующих судов EEDI и EEXI) и эксплуатационного характера (ежегодный показатель и рейтинг эксплуатационной углеродоемкости СИ [11], усовершенствованный план управления энергоэффективностью судов SEEMP).

Набор среднесрочных мер, включенных в Рамочную программу ИМО «Чистый ноль» (ИМО Net-Zero Framework — ИМО NZF) для добавления ее текста в качестве поправки к VI Приложению к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78, не был принят в октябре 2025 г. из-за разногласий сторон, в результате чего голосование о принятии их отложено до осени 2026 г. Пакет среднесрочных мер включает в себя технический элемент — стандарт на судовое топливо, предназначенный для постепенного снижения интенсивности выбросов ПГ в судовом топливе [6], и экономический элемент — механизм ценообразования на морские выбросы ПГ.

Таким образом, в настоящий момент действуют и совершенствуются следующие механизмы из пакета среднесрочных мер ИМО и инструменты, появившиеся до принятия стратегии ИМО 2023 г.: EEDI, EEXI, СИ, Кодекс NO_x и ограничения по эмиссии серы 2020 г.

Несмотря на снижение выбросов ПГ морскими судами после введения этих мер, они не позволяют добиться весьма амбициозных целей ИМО. Поэтому в настоящий момент выполняется переход к системе ИМО NZF, основанной на WtW-методологии учета выбросов ПГ для оценки выбросов полного жизненного цикла для всех видов судовых топлив [5, 12, 13]. Ключевым показателем в этой системе станет индекс топливных выбросов парниковых газов (ИТВПГ — GFI), смещающий фокус регулирования с операционной эффективности судна на углеродоемкость используемого им топлива. Стандарт ИТВПГ — это регулирование углеродоемкости топлива, применяемое к судам валовой вместимостью более 5000. ИТВПГ представляет собой основополагающий элемент более широкой программы ИМО по декарбонизации. При его определении используется методология WtW, учитывающая выбросы ПГ на протяжении всего жизненного цикла судового топлива (от производства и транспортировки до сжигания на борту), что создает всеобъемлющую основу для оценки соответствия [14]. Судам необходимо будет ежегодно рассчитывать значения фактической годовой интенсивности топливных выбросов ПГ, выражаемой в CO₂-экв./МДж энергии.

При расчете ИТВПГ учитывается количество и интенсивность выбросов за весь жизненный цикл каждого вида потребленного на судне топлива. Фактическая интенсивность выбросов ИТВПГ сравнивается с двумя значениями: целевым годовым ИТВПГ — «базовым целевым показателем» — и «целевым показателем прямого действия» (значения ежегодно ужесточаются и установлены в Правиле 35 Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 на период с 2028 до 2035 г., а также для 2040 г.), таким образом будет определяться баланс соответствия судна.

Все эти механизмы последовательно реализованы ИМО через процедуру принятия поправок в Приложение VI МК МАРПОЛ [15]. МАРПОЛ представляет собой основной международный документ, регулирующий все виды загрязнения с судов. Приложение VI является главным инструментом борьбы с выбросами ПГ и другими вредными веществами. Именно в рамках Приложения VI были приняты все ключевые меры по энергоэффективности и декарбонизации (табл. 1).

Таблица 1

Ключевые меры ИМО по энергоэффективности и декарбонизации

Механизм	Дата	Предмет регулирования	Примечание
EEDI	01.01.2013	Норма выброса CO ₂ на единицу транспортной работы строящегося (EEDI) или эксплуатирующегося (EEXI) судна конкретного типа (г CO ₂ -экв./т-миля)	Распространяется на типы судов, на которые приходится 85 % выбросов CO ₂ в международном судоходстве. Если судно не соответствует этому требованию, оно не получит Международное свидетельство о достижении индекса энергоэффективности (IEEC) и не сможет выйти в международный рейс, предусматривающий заход в территориальные воды стран, ратифицировавших Приложение VI к МК МАРПОЛ 73/78
EEXI	01.01.2023		
СП	01.01.2023	Прямой показатель выбросов демонстрирует, сколько граммов CO ₂ судно фактически выбрасывало в атмосферу за год при перевозке одной тонны груза на одну морскую милю	По результатам судну присваивается рейтинг, для низких рейтингов требуется предоставить план действий. По решению администрации флага может быть отозвано или не перевыпущено IEEC, в результате чего судно не сможет совершать международные рейсы
Кодекс NO _x	1997 (2005)	Основная цель — улучшение качества воздуха путем регламентирования количества выбрасываемых NO _x судовыми двигателями, процедур испытания двигателей и требований к их сертификации	Невозможно использование новых двигателей, а также двигателей, подвергшихся значительной модификации, не соответствующих требованиям Кодекса NO _x
Серный лимит	2005	Основная цель — улучшение качества воздуха путем регламентирования содержания серы в бункерном топливе для морских судов	Использование высокосернистого топлива без соответствующих мер (скрубберы) грозит административной ответственностью (штрафом, задержанием), уголовной ответственностью для капитана, старшего механика и судовладельца (в ЕС, Австралии и США), а также гражданско-правовыми последствиями (потеря страховки, репутационный ущерб)
GFI (ИТВПГ)	–	Методологическая основа для сбора средств в Фонд ИМО; с одной стороны принуждает судовладельцев отказываться от традиционных видов топлива и прибегать к EET's решениям, а с другой стороны, является источником средств в Фонде ИМО, предполагаемых к направлению на развитие безуглеродных технологий для морских судов	

1. Проектный индекс энергоэффективности судна (EEDI) представляет собой обязательный технический стандарт для новых судов. Он устанавливает максимально допустимое количество выбросов CO₂ на тонно-милю (г CO₂-экв./т-миля) в зависимости от типа и размера судна и имеет целью поэтапно ужесточать требования, вынуждая судостроителей использовать более эффективные двигатели, улучшенные обводы корпуса и технологии для снижения сопротивления. EEDI уже прошел несколько фаз (1, 2, 3), с ужесточением требований на 10 %, 20 % и до 30 % (для некоторых типов судов) по сравнению с базовым уровнем.

EEDI — это норма выброса CO₂ на единицу транспортной работы. Он показывает, сколько граммов CO₂ судно выбрасывает при перевозке одной тонны груза на одну морскую милю и определяется по формуле (упрощенно):

$$EEDI = \frac{\text{Выбросы CO}_2 \text{ от главного двиг. и вспом. механизмов}}{\text{Транспортная работа}}, \text{ г CO}_2 \text{ экв./т-миля}, \quad (1)$$

$$\text{Транспортная работа} = \text{Вместимость судна (дедвейт)} \times \text{Скорость}. \quad (2)$$

Цель введения данного регулирования — поэтапное ужесточение требований к энергоэффективности, вынуждающее судостроителей и проектировщиков внедрять передовые технологии и решения. Принцип действия EEDI [16] строится на сравнении двух величин — достигнутого и требуемого EEDI. Достигнутый EEDI (Attained EEDI) — это фактический показатель энергоэффективности, рассчитанный для конкретного строящегося судна на основе его проекта. Требуемый EEDI (Required EEDI) — это максимально допустимое значение EEDI, установленное ИМО для данного типа и размера судна. Условие для прохождения сертификации:

$$\text{Достигнутый EEDI} \leq \text{Требуемый EEDI}. \quad (3)$$

Если судно не соответствует этому требованию, оно не получит Международное свидетельство о достижении индекса энергоэффективности (IEEC) и не сможет выйти в международный рейс.

Чтобы дать отрасли время на адаптацию, ИМО ввела поэтапное ужесточение требований. В табл. 2 показано, насколько требуемый EEDI должен быть ниже по сравнению с усредненным показателем для аналогичных судов, построенных в период с 2000 по 2010 г. (этот период принят за базовый уровень 0 %).

Правило распространяется на почти все новые крупные суда валовой вместимостью 400 и более, включая танкеры, балкеры, сухогрузы, газовозы, контейнеровозы, круизные суда, суда снабжения, паромы и т.д. Исключение — специализированные суда, такие как буксиры, ледоколы и суда, не выполняющие транспортную работу, а также грузовые суда категории А, определенной в Полярном кодексе.

Таблица 2

Фазы ужесточения EEDI

Фаза	Период действия	Снижение эффективности	Примечание
Фаза 0	2013–2014	0 % (базовый уровень)	Период адаптации
Фаза 1	2015–2019	10 %	Первое реальное ужесточение
Фаза 2	2020–2024	15–20 % (зависит от типа судна)	Например, для крупных контейнеровозов — 20 %
Фаза 3	2025–...	30 % (и более для некоторых типов)	Для некоторых судов (газовозы, круизные лайнеры) планируется дальнейшее ужесточение

Чтобы снизить EEDI, проектировщики применяют целый комплекс мер:

а) оптимизация корпуса и движителей по критерию снижения сопротивления, для чего выполняются оптимизация обводов корпуса с целью снижения различных составляющих полного (буксировочного) сопротивления, воздушная смазка погруженного объема (нагнетание пузырьков воздуха вдоль бортов и под днище судна, а также использование воздушных каверн для снижения трения о воду), оптимизация гребных винтов и устройства выравнивания потока перед винтом и после винта для повышения упора последнего;

б) повышение эффективности силовой установки путем установки систем рекуперации тепла (Waste Heat Recovery Systems — WHRS), установки систем ветродвижения (жесткие паруса, турбопаруса и т.д.) и систем, использующих солнечную энергию;

в) операционные и проектные решения — например, увеличение размеров судов, снижение их проектной скорости, применение цифровых решений (планировщик рейсов, сервисы по маршрутизации).

Таким образом, EEDI стал первым обязательным глобальным стандартом по выбросам ПГ для всей транспортной отрасли. Он заложил основу для всех последующих мер (EEXI, CII). EEDI напрямую подтолкнул судостроительную отрасль к внедрению энергосберегающих технологий, которые ранее считались нишевыми или слишком дорогими. Таким образом, EEDI — это проактивный и технологически нейтральный инструмент. Он не предписывает судостроителям, какие именно технологии использовать, а лишь задает целевой показатель. Это стимулирует развитие конкуренции и внедрение инноваций в процессе поиска наиболее рентабельных решений для повышения эффективности.

2. Индекс энергоэффективности существующих судов (Energy Efficiency Existing Ship Index — EEXI) — технический стандарт, направленный на снижение углеродоемкости существующего мирового флота. Предыдущий стандарт EEDI применялся только к новым судам. Однако средний возраст торгового судна составляет около 20 лет, что означало бы, что основная масса флота (до 85 %) могла десятилетиями работать без каких-либо требований к энергоэффективности. Цель EEXI — быстро и в принудительном порядке повысить эффективность всего флота, который не подпадал под действие EEDI. Таким образом, EEXI — это «адаптация» стандарта EEDI для эксплуатирующихся судов. Он заставляет владельцев существующих судов технически модернизировать их, чтобы они соответствовали современным стандартам эффективности. Процесс расчета EEXI методологически идентичен EEDI, а методы соответствия сильно отличаются.

Самый распространенный метод соответствия: ограничение мощности двигателя (EPL/SHaPoLi). Поскольку кардинально изменить корпус или силовую установку старого судна крайне дорого, самым популярным и дешевым способом соблюдения EEXI стало ограничение мощности двигателя. На главный двигатель судна устанавливается система ограничения мощности двигателя (Engine Power Limitation — EPL). На судах она часто называется SHaPoLi (Shaft Power Limitation). Система программно или аппаратно не позволяет двигателю развивать мощность выше определенного, заранее рассчитанного предела. Например, если двигатель развивал 100 % мощности, после установки EPL он сможет работать только на 70–80 % от своей первоначальной мощности. При этом судно теряет в скорости, а экономия топлива приводит к прямому снижению выбросов CO₂.

К менее распространенным методам соответствия относятся: установка энергосберегающих устройств, переход на альтернативные топлива (довольно дорого и редко реализуется для старых судов), установка систем рекуперации тепла.

Одним из основных результатов стало замедление мирового флота, что повлияло на логистические цепочки: увеличение времени рейса требует пересмотра графиков и увеличения количества судов на маршруте для поддержания грузооборота. При этом судовладельцы несут расходы (от десятков до сотен тысяч долларов на судно) на проектирование, сертификацию и установку систем EPL/SHaPoLi. Все это в совокупности приводит к повышению фрахтовых ставок, а замедление и дополнительные издержки могут в долгосрочной перспективе привести к росту стоимости морских перевозок, так как пропускная способность флота фактически снижается, а также к необходимости постройки дополнительных судов для обеспечения сохранения объемов перевозимых грузов, что в совокупности может нивелировать эффект снижения выбросов ПГ отдельными судами.

«Зеленые» критики называют EEXI «косметическим» решением, так как он не стимулирует переход на безуглеродные топлива, а лишь заставляет старые суда работать чуть эффективнее. Также ограничение мощности вызывает споры о безопасности мореплавания в сложных погодных условиях или при необходимости быстро маневрировать.

3. Индекс операционной углеродоемкости (СИ) — самый операционно-ориентированный инструмент декарбонизации в судоходстве. СИ — это операционный индекс, который демонстрирует, насколько эффективно судно перевозило грузы или пассажиров в течение прошедшего года с точки зрения выбросов CO₂. СИ показывает, сколько граммов CO₂ судно фактически выбрасывало в атмосферу за год при перевозке одной тонны груза на одну морскую милю. Ключевое отличие от EEXI: EEXI — это разовая техническая проверка, а СИ — ежегодная оценка реальной работы судна.

Расчет СИ состоит из нескольких шагов:

- 1) сбор данных, когда судовладелец собирает данные по фактическим расходам топлива (в тоннах) по всем типам топлива за календарный год, а также данные о пройденном расстоянии (в милях) и фактически выполненной транспортной работе (например, масса перевезенного груза в тоннах × пройденное расстояние);
- 2) расчет фактических выбросов CO₂. На основе расхода топлива и коэффициентов выбросов рассчитывается общий объем выбросов CO₂ за год;
- 3) расчет достигнутого СИ (Attained СИ) = (Общие выбросы CO₂ за год) / (Транспортная работа за год);
- 4) определение требуемого СИ (Required СИ) — для каждого судна рассчитывается его персональный требуемый СИ на год. Он основан на исходном значении СИ для данного типа и размера судна и коэффициенте снижения, который ужесточается каждый год;
- 5) расчет рейтинга СИ представляет собой определение отношения достигнутого СИ к требуемому СИ. На основе этого отношения судну присваивается рейтинг (табл. 3).

Таблица 3

Система рейтингов СИ

Рейтинг	Описание	Операционные последствия
A	Значительно превышает требуемый стандарт	Лучший рейтинг. Судно является желанным для фрахтователей, в будущем сможет претендовать на получение премиальных единиц
B	Немного превышает требуемый стандарт	Хороший рейтинг. Судно соответствует текущим ожиданиям
C	Соответствует требуемому стандарту	Минимально допустимый рейтинг для нормальной эксплуатации
D	Немного ниже требуемого стандарта	«Желтый» уровень тревоги. Судно должно разработать План корректирующих действий
E	Значительно ниже требуемого стандарта	«Красный» уровень тревоги. Судно находится в критическом положении

Последствия получения низких рейтингов (D и E). Система СИ не просто ставит оценки, она имеет прямые юридические и коммерческие последствия. Для судна с рейтингом D в течение трех последующих лет подряд, а для судна E — в течение одного года судовладельцу необходимо предоставить классификационному обществу и администрации флага утвержденный план корректирующих действий SEEMP. Этот план должен детально описывать, какие конкретные меры будут приняты для улучшения рейтинга СИ до уровня C или выше.

Роль ключевых сторон в обеспечении соблюдения (Enforcement). Юридические последствия реализуются через несколько сторон, каждая из которых обладает своими полномочиями.

а) Администрация флага (Flag State) — главный надзорный орган для судна. Ее обязанность — убедиться, что суда, эксплуатирующиеся под ее флагом, соответствуют требованиям МАРПОЛ. Также администрация проверяет и утверждает План корректирующих действий (Corrective Action Plan) и контролирует его выполнение. Если план не выполнен, администрация флага судна аннулирует или отзывает Международное свидетельство о энергоэффективности (IEEC) судна. Без этого документа судно не может законно эксплуатироваться, так как фактически не выполняет требования Приложения VI МАРПОЛ.

б) Классификационное общество (Class Society) обычно действует от имени администрации флага. Проводит аудиты, проверяет расчеты СИ и одобряет технические меры по плану корректирующих действий.

в) Администрация порта (Port State Control — PSC) реализует последствия на практике. Инспекторы PSC имеют право проверить свидетельства судна, включая IEEC и его рейтинг СИ. Если судно заходит в порт без действующего IEEC (потому что оно было аннулировано за несоблюдение СИ), инспекторы PSC могут задержать судно в порту и/или выписать предписание о запрете на выход из порта до устранения нарушений. Задержание судна — это колоссальные финансовые потери: простой, штрафы, стоимость устранения нарушений, репутационный ущерб.

Таким образом, применение СИ характеризуется каскадным эффектом, который начинается с коммерческого давления (снижение доходов), а если это не помогает, подключаются юридические механизмы (лишение свидетельства и задержание), которые физически останавливают бизнес. Для судовладельца плохой рейтинг СИ трансформируется из «зеленой» проблемы в проблему юридического и операционного выживания его актива.

Какие меры могут улучшить рейтинг СИ?

Владельцы и операторы могут повлиять на СИ через множество операционных решений:

- 1) оптимизация скорости (Slow Steaming) — самый эффективный способ, в некоторых случаях снижение скорости на 10 % может сократить расход топлива на 30 %;
- 2) оптимизация маршрутов — выбор путей с благоприятными течениями и ветрами, минимизация времени ожидания в портах;
- 3) улучшение состояния корпуса — его регулярная очистка от обрастания для снижения сопротивления;
- 4) использование систем ветрового движения (WASP) — установка жестких парусов и турбопарусов (роторов Флеттнера);
- 5) переход на альтернативные топлива — использование биотоплива, СПГ или (в будущем) метанола/аммиака.

Коммерческое влияние СИ.

СИ быстро становится коммерческим инструментом. Судно с рейтингом А может брать премию («зеленый фрахт»), в то время как судно с рейтингом D или E может быть вынуждено снижать свои фрахтовые ставки. Банки все чаще привязывают условия кредитования к экологическим рейтингам, включая СИ. Крупные фрахтователи (например, Amazon, IKEA) начинают требовать от логистических партнеров использования судов с высокими рейтингами СИ для снижения своего углеродного следа Score 3. Таким образом, СИ — это механизм, который превращает абстрактные цели декарбонизации в конкретные ежегодные KPI для каждого судна, он создает непрерывный цикл улучшений, обеспечивает измерение ежегодных выбросов судна, сравнение с его целевым показателем и корректирует его операционную деятельность.

4. Кодекс NO_x — один из ключевых экологических стандартов ИМО, направленный на борьбу с локальным загрязнением воздуха, который устанавливает предельные значения выбросов оксидов азота (NO_x) с судовых дизельных двигателей. Это высокоактивные газы, в основном оксид азота (NO) и диоксид азота (NO_2). Они характеризуются следующими вредными воздействиями:

- 1) кислотные дожди: NO_x способствуют образованию азотной кислоты;
- 2) фотохимический смог — данные газы являются одними из основных предшественников приземного озона (O_3) и мелкодисперсных частиц (сажи — $\text{PM}_{2,5}$);
- 3) проблемы со здоровьем — вызывают и усугубляют респираторные заболевания (астма, бронхит), болезни сердца;
- 4) парниковый эффект — закись азота (N_2O) является мощным парниковым газом.

Ярусы (Tiers) Кодекса NO_x.

Стандарты вводились поэтапно, становясь все более строгими. Уровень, применяемый к двигателю, зависел от даты его постройки или установки на судно (табл. 4).

Таблица 4

Система ярусов Кодекса NO _x			
Ярус (Tier)	Период применения (для новых судов)	Снижение выбросов NO _x	Где действует
Tier I	С 1 января 2000 г.	~20 % от базового уровня (1990 г.)	Глобально
Tier II	С 1 января 2011 г.	~15–20 % ниже, чем Tier I	Глобально
Tier III	С 1 января 2016 г.	~80 % ниже, чем Tier I	Только в специальных зонах контроля выбросов NO _x (NECA)

Специальные зоны контроля выбросов NO_x (NECA).

NECA (NO_x Emission Control Area) — это морские районы, где действуют самые строгие стандарты Tier III. На сегодняшний день действуют следующие NECA: Балтийское море (с 01.01.2016), Северное море (с 01.01.2021), акватории вокруг Северной Америки (включая побережье США и Канады) (с 01.01.2016), Карибское море США (с 01.01.2023), границы исключительных экономических зон Норвегии (Норвежское море) и Канады (с 01.03.2026). Обсуждается вопрос о включении в 2027–2028 гг. в зону NECA района Северо-Восточной Атлантики (в границах исключительных экономических зон Португалии, Испании, Франции, Великобритании, Дании (Гренландии и Фарерских островов), Исландии). На практике это значит, что все новые суда (с датой постройки/установки двигателя после вступления NECA в силу), заходящие в эти зоны, должны иметь двигатели, соответствующие стандарту Tier III.

Технологии для соответствия Кодексу NO_x.

Для соблюдения разных ярусов Tier используются различные технологии. Для Tier I и Tier II они достигаются в основном за счет внутренней модификации двигателя: оптимизации процесса сгорания (изменение формы камеры сгорания, времени впрыска топлива), использование систем Common Rail (непосредственного впрыска) для более точного впрыска. Для Tier III основной технологией является доочистка: только модификацией двигателя, работающего на дизельном топливе, достичь снижения выбросов NO_x на 80 % крайне затруднительно, требуются сложные системы доочистки выхлопных газов, такие как селективное каталитическое восстановление (SCR — Selective Catalytic Reduction) и система рециркуляции отработавших газов.

Принцип работы SCR: в выхлопную систему впрыскивается реагент (чаще всего водный раствор мочевины, известный как AdBlue), и в специальном каталитическом нейтрализаторе NO_x вступают в реакцию с аммиаком (из мочевины) и превращаются в безвредный азот (N₂) и воду (H₂O). Эффективность данной технологии >90 %, однако она имеет ряд недостатков — высокую стоимость, необходимость хранения реагента на борту, занимает много места.

Система рециркуляции отработавших газов (EGR — Exhaust Gas Recirculation), при которой часть выхлопных газов охлаждается и возвращается во впускной коллектор двигателя позволяет снижать температуру горения в цилиндрах, что препятствует образованию NO_x. Эффективность данной технологии около 70–80 %, но она вызывает повышенный износ двигателя, имеет сложную систему, потенциальное снижение мощности двигателя.

Взаимосвязь Кодекса NO_x с декарбонизацией.

Система EGR обычно увеличивает расход топлива (на 3–5 %), что ведет к росту выбросов CO₂. Система SCR практически не влияет на расход топлива и выбросы CO₂. Более того, она позволяет оптимизировать двигатель для максимальной эффективности (и минимального CO₂), а NO_x преобразовывать в восстановленный азот в катализаторе.

Кодекс NO_x в последние годы являлся значимым стимулом перехода на альтернативные топлива, в частности на СПГ. При использовании СПГ образование NO_x изначально значительно ниже из-за особенностей сгорания метана, что делает соответствие Tier III при работе на СПГ технологически проще и дешевле. Таким образом, Кодекс NO_x стимулировал развитие и внедрение передовых технологий очистки отработавших газов в судостроении. Хотя его основная цель — не декарбонизация, а улучшение качества воздуха, он оказывает значительное влияние на общую экологическую стратегию судовладельцев, заставляя их выбирать технологии, которые совместимы с целями снижения выбросов CO₂, или же переходить на альтернативные виды топлива. При этом следует отметить, что сам по себе метан (СПГ) также является агрессивным ПГ и нужно добиваться исключения его попадания в атмосферу.

5. Серный лимит 2020 г.

Глобальный лимит содержания серы 2020 г. (Серный лимит 2020 в МАРПОЛ Приложение VI) — это одно из самых значимых экологических правил в истории судоходства, коренным образом изменившее рынок морского топлива. С 1 января 2020 г. предельное содержание серы в судовом топливе, используемом за пределами специальных зон контроля выбросов, было снижено с 3,50 % до 0,50 % (масс.). Цель данной меры — резкое сокращение выбросов оксидов серы (SO_x) и твердых частиц (PM), которые наносят огромный вред здоровью людей и окружающей среде.

ИМО шла к этому шагу постепенно: до 2012 г. глобальный лимит составлял 4,50 %, первое ужесточение, согласно которому лимит был снижен до 3,50 %, произошло в 2012 г. Еще более строгие нормы действовали и продолжают действовать в особо чувствительных регионах: лимит в специальных зонах контроля выбросов серы (SECA) — 0,1 %. К ним относятся: Балтийское море, Северное море, район побережья Северной Америки, район побережья США в Карибском море, Средиземное море; исключительные экономические зоны Норвегии (Норвежское море) и Канады будут отнесены к ним 1 марта 2027 г.

Как суда могут соблюдать серный лимит?

Вариант 1 — переход на малосернистое топливо (Compliant Fuels):

а) малосернистое топливо (VLSFO — Very Low Sulphur Fuel Oil). Нефтеперерабатывающие заводы начали массово производить новый сорт остаточного топлива, специально разработанный для соответствия лимиту 0,50 % по содержанию серы. Это стало самым популярным решением;

б) судовой газойль (MGO — Marine Gasoil) — дистиллятное топливо, аналог дизельного, которое изначально имеет низкое содержание серы.

Переход на малосернистое топливо — относительно простой вариант, не требующий крупных капиталовложений в модернизацию судна, но стоимость VLSFO и MGO значительно выше, чем у старого высокосернистого мазута (HSFO).

Вариант 2 — установка скрубберов (систем очистки выхлопных газов). При этом судно продолжает сжигать дешевый высокосернистый мазут (HSFO), но выхлопные газы пропускаются через специальную установку (скруббер), где они промываются водой. Типы скрубберов:

а) открытого типа (open-loop) — используют морскую воду для промывки, а затем сбрасывают промывочную воду за борт (предварительно очистив ее). Самые дешевые, но запрещены в некоторых портах и внутренних водах из-за опасений по поводу подкисления воды. В ИМО обсуждается запрет либо введение ограничений на сброс промывочной воды в морскую среду;

б) закрытого типа (closed-loop) — используют замкнутый контур с пресной водой и реагентами (обычно щелочь). Образовавшиеся серосодержащие шламы накапливаются на борту и сдаются в портах для утилизации. Более дорогие, но не имеют ограничений на сброс.

Установки гибридного типа (Hybrid) могут работать в обоих режимах.

Данная технология позволяет использовать более дешевое топливо (HSFO), что дает значительную экономию, однако высокие капитальные затраты на установку (несколько миллионов долларов на судно), затраты на обслуживание и утилизацию отходов могут быть отнесены к отрицательным сторонам ее применения.

Вариант 3 — переход на альтернативные топлива.

Природный газ практически не содержит серы, поэтому использование СПГ в качестве топлива одновременно решает проблему с SO_x и значительно снижает выбросы NO_x и CO_2 . Метанол, водород, аммиак: перспективные безуглеродные топлива, которые также не содержат серы, но инфраструктура, требуемая для бункеровки этим топливом, пока развита недостаточно. Положительные стороны: это наиболее «зеленое» и перспективное решение. Отрицательные стороны: требует полной перестройки силовой установки и огромных инвестиций в инфраструктуру бункеровки.

К основным последствиям и влиянию «Серного лимита 2020» необходимо отнести:

1) резкий рост цен на топливо: стоимость судового топлива для большинства судов, перешедших на VLSFO, значительно выросла;

2) изменение структуры рынка топлива: появился новый товар — VLSFO, а спрос на HSFO упал, но остался благодаря флоту со скрубберами;

3) противостояние скрубберов и малосернистого топлива: возникло разделение флота — одни суда больше платят за топливо, другие несут капитальные затраты на скрубберы, но экономят на топливе.

Несмотря ни на что, по данным исследований, выбросы SO_x от судоходства сократились на ~77 %, что привело к значительному улучшению качества воздуха в прибрежных регионах и положительному влиянию на здоровье населения. Введение ограничений на выбросы серы наглядно продемонстрировало, что ИМО способна успешно применять жесткие глобальные экологические стандарты, коренным образом меняющие

экономику и операционную деятельность мирового флота. Этот опыт заложил основу для еще более сложного предстоящего перехода — декарбонизации судоходства в период до 2050 г.

Таким образом, ИМО создала всеобъемлющую и многоуровневую систему регулирования, которая эволюционировала от борьбы с локальным загрязнением к комплексному управлению углеродным следом всей отрасли. Сейчас фокус сместился с загрязнителей SO_x , NO_x (серный лимит, Кодекс NO_x) на выбросы CO_2 и энергоэффективность (EEDI, EEXI) и операционные улучшения (СИ), а в будущем фокус сместится на вопросы перехода на безуглеродные топлива и технологии, а также создание финансовых стимулов/налогов для ускорения этого перехода (GFI/ИТВПГ). Меры ИМО являются юридически обязательными для подавляющего большинства судов мирового торгового флота. Они системно преобразуют одну из самых консервативных глобальных отраслей, делая декарбонизацию не просто целью, а ежедневной коммерческой и операционной реальностью для каждого судовладельца, оператора и фрахтователя [17, 18].

2. ПОДХОДЫ И МЕРЫ ОТДЕЛЬНЫХ СТРАН И РЕГИОНОВ

2.1. Европейский союз

Европейский союз, будучи мировым лидером в области климатического регулирования, применяет комплексный и многоуровневый подход к декарбонизации водного транспорта. Понимая ограниченность исключительно глобальных мер ИМО, ЕС внедряет собственные, более амбициозные и быстрые правила, которые уже сейчас коренным образом меняют отрасль.

Общая стратегия Fit for 55 и «Зеленый курс» (European Green Deal).

Все меры являются частью пакета Fit for 55, целью которого является сокращение выбросов ПГ как минимум на 55 % к 2030 г. Водный транспорт рассматривается как ключевой сектор для достижения этой цели. ЕС использует три основных подхода:

- 1) расширение системы торговли квотами (EU ETS) на судоходство;
- 2) стимулирование спроса на экологичные топлива (FuelEU Maritime);
- 3) создание инфраструктуры для альтернативных топлив (AFIR).

Ключевые нормативные инициативы ЕС в части морского транспорта. Включение морского транспорта в Систему торговли квотами ЕС (EU ETS) — это самая значимая и революционная мера. С 2024 г. морской транспорт официально включен в EU ETS. Судовладельцы или лица, ответственные за коммерческую эксплуатацию, должны сдавать квоты на выбросы (EUA) за свои выбросы CO_2 . При этом охват является поэтапным: в 2024 г. учитывались лишь 40 % выбросов от рейсов между портами ЕС, 100 % выбросов от рейсов в пределах порта ЕС, 50 % выбросов от рейсов из порта ЕС в третий порт и наоборот.

В 2025 г. учитываются 70 % выбросов, а в 2026 г. 100 % выбросов от всех рейсов, связанных с ЕС. В будущем под регулирование подпадут также выбросы метана (CH_4) и закиси азота (N_2O).

Эта мера напрямую создает финансовые издержки от выбросов CO_2 . Она делает инвестиции в энергоэффективность и переход на безуглеродные топлива экономически оправданными, так как позволяет избежать растущих затрат на покупку квот.

Инициатива FuelEU Maritime, дополняющая EU ETS, фокусируется на стороне предложения топлива. Она устанавливает предел интенсивности выбросов ПГ для энергии, используемой судами. Начиная с 2025 г. суда будут обязаны постепенно снижать среднюю углеродоемкость всей энергии, потребляемой во время рейсов в/из портов ЕС и стоянки в них. Целевые показатели ужесточаются каждые 5 лет (к 2030, 2035, 2040 г. и т.д.). В результате судовладельцы вынуждены будут соблюдать правила, используя альтернативные виды топлива (биотопливо, e-метанол, e-аммиак, водород) и подключаясь к береговому электроснабжению. Таким образом, создается гарантированный спрос на альтернативные виды топлива и технологии, давая сигнал производителям топлива и судовладельцам инвестировать в их развитие.

Директива по альтернативным топливам (AFIR — Alternative Fuels Infrastructure Regulation). Идея данной директивы в обеспечении выполнения мер FuelEU Maritime и EU ETS путем создания необходимой потребителям инфраструктуры. AFIR обязывает порты ЕС обеспечить ее наличие. К 2030 г. основные порты ЕС должны предоставлять береговое электроснабжение (On-shore Power Supply — OPS) для пассажирских судов и контейнеровозов, чтобы они могли не использовать свои дизель-генераторы в порту. К 2030 г. крупные порты должны иметь инфраструктуру для снабжения сжиженным природным газом (СПГ), а к 2035-му — для электрической зарядки и подачи других безуглеродных топлив (например, метанола, водорода).

Данная директива направлена в первую очередь на устранение ключевого препятствия для перехода — отсутствие инфраструктуры для заправки и зарядки.

Внутренний водный транспорт ЕС.

Декарбонизация речного судоходства в ЕС регулируется в рамках общей транспортной политики, с акцентом на модернизацию флота и инфраструктуры. Директива по налогообложению энергоносителей позволяет странам — членам ЕС вводить налоговые льготы для экологически чистых видов топлива, используемых на внутреннем водном транспорте (например, для биотоплива или «зеленого» электричества). Так, Фонд «Соединенная Европа» (CEF — Connecting Europe Facility) финансирует проекты по модернизации и «озеленению» флота внутреннего водного транспорта, включая перевод судов на СПГ, установку аккумуляторных батарей или систем каталитической нейтрализации отработавших газов судовых ЭУ.

В настоящий момент происходит синхронизация FuelEU Maritime и EU ETS, в результате которой суда смешанного плавания также могут быть постепенно включены в сферу действия этих правил.

Таблица 5

Меры ЕС по декарбонизации водного транспорта

Мера	Уровень	Основной механизм	Ожидаемый эффект
Расширение EU ETS	Экономический	Создание прямых финансовых издержек за выбросы CO ₂	Стимулирование немедленных мер по энергоэффективности и долгосрочных инвестиций в «зеленые» технологии
FuelEU Maritime	Топливный/рыночный	Установление пределов углеродоемкости энергии	Создание гарантированного спроса на альтернативные и безуглеродные виды топлива
Директива AFIR	Инфраструктурный	Обязательное развертывание инфраструктуры в портах	Устранение проблемы отсутствия инфраструктуры
Финансирование (CEF и др.)	Инвестиционный	Прямое софинансирование «зеленых» проектов	Ускорение модернизации флота, особенно для внутренних водных путей и малых компаний

Таким образом, политика ЕС в части декарбонизации является самой агрессивной и комплексной в мире. Она создает де-факто новый глобальный стандарт, поскольку все суда, заходящие в порты ЕС, вынуждены подчиняться этим правилам. Судовладельцы, которые раньше перейдут на безуглеродные технологии, получают конкурентное преимущество, избежав высоких затрат на квоты EU ETS. Ожидается, что меры ЕС подтолкнут ИМО к принятию более амбициозных глобальных целей и механизмов, таких как глобальная цена на углерод для судоходства. Основными вызовами остаются высокая стоимость перехода, обеспечение поставок «зеленого» топлива и риск «утечки углерода» (перенос логистических хабов за пределы ЕС). ЕС не следует за глобальными трендами, а активно их формирует, используя свой огромный рынок в качестве рычага для ускорения декарбонизации всего мирового морского и речного транспорта.

2.2. Китайская Народная Республика

Китайская Народная Республика (КНР) реализует комплексную стратегию по декарбонизации водного транспорта в рамках 14-го пятилетнего плана развития («14-я пятилетка», 2021–2025 гг.). В нем определены такие направления развития экономики, как усиление охраны окружающей среды и контроля над озоновым загрязнением, шумовым загрязнением, безопасностью питьевой воды и т.д., сокращение выбросов углерода на единицу добавленной стоимости в промышленности, строительство экологически чистых городов и предприятий [19]. План сочетает национальные цели по достижению пика углеродных выбросов до 2030 г. и углеродной нейтральности к 2060 г. [20] с отраслевыми планами. Меры охватывают судостроение, портовую инфраструктуру, топливо и регулирование.

Ключевые меры в судоходстве Китая включают переход на альтернативные топлива (СПГ, метанол, водород), повышение энергоэффективности и технологичности судов, улучшение экологии портов и портовой инфраструктуры.

Альтернативные топлива.

СПГ. Переход на альтернативные виды топлива в первую очередь связан с использованием метана в качестве топлива: в стране строятся суда, оборудованные для использования СПГ в качестве топлива, происходит активное развитие инфраструктуры по бункеровке СПГ — все крупные морские порты имеют бункерные СПГ-хабы, — также развита бункеровка СПГ на внутренних водных путях. Так порт Яншан (Шанхай) в 2024 г. отгрузил 462 000 м³ бункерного СПГ [21], порт Шэньчжэнь (порт Дачанвань в его составе) — 300 000 м³ [22], порт Нинбо-Чжоушань — 100 000 м³ [23].

В настоящий момент в КНР более 30 морских и речных портов имеют станции бункеровки СПГ. Целью интенсификации использования СПГ в качестве топлива является перевод 15 % всего флота Китая на СПГ к 2030 г.

Метанол. В порту Тайдзинь прошла первая в Китае бункеровка метанолом: на борт Ро-Ро было передано 300 т этого топлива [24]. COSCO и другие компании заказали первые крупные контейнеровозы на метаноле [15].

В КНР происходит создание цепочек поставок «зеленого» метанола, где крупные энергетические компании (CNOOC, Sinopec, CHN Energy) инвестируют в цепочки его создания, судовладельцы (COSCO Shipping) инвестируют в суда, использующие метанол в качестве топлива, а порты (SIPG, Ningbo-Zhoushan Port Group) инвестируют в создание бункеровочной инфраструктуры — судов-бункеровщиков и причальных мощностей.

Водород и аммиак. Создаются пилотные проекты судов на водороде. Например, судно Three Gorges Hydrogen Boat No.1 (рис. 1а). Исследования по аммиачным ДВС совместно с MAN Energy Solutions, а также создание электрохимических источников электроэнергии (топливных элементов).

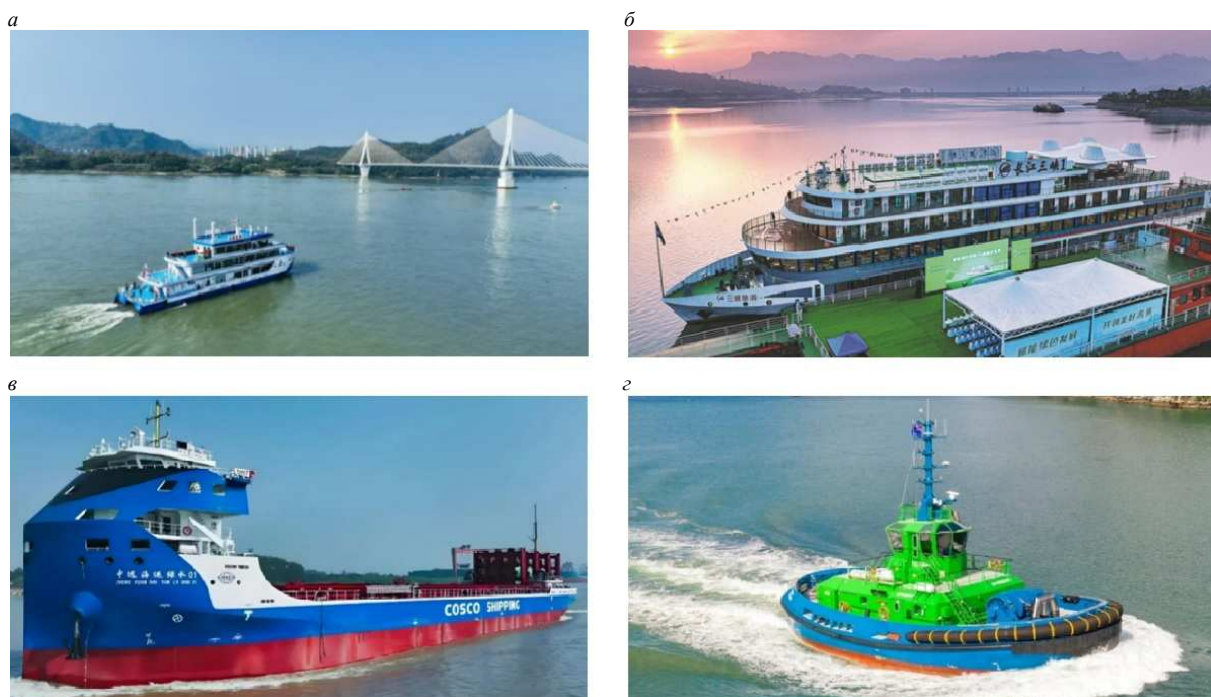


Рис. 1. Three Gorges Hydrogen Boat No.1 — первое судно, использующее водород в качестве топлива (а); пассажирский электрический паром Yangtze River Three Gorges 1 с батареями емкостью 7,5 МВт·ч (б); контейнеровоз Greenwater 01 с батареями емкостью 50МВт·ч (в); буксир-электроход Sparky с емкостью электрических батарей 2,8 МВт·ч (г)

Электрификация. В настоящий момент происходит массовая замена речных и озерных судов на суда с электродвижением, у которых в качестве источника электрической энергии выступают аккумуляторные батареи. Например, пассажирский паром катамаранного типа на 1300 пассажиров, оборудованный аккумуляторной энергоустановкой емкостью 7500 кВт·ч (рис. 1б), а также контейнеровоз Greenwater 01 с емкостью электробатареи 50 МВт·ч (рис. 1в) [25]. Для электрических судов создается «зеленая» цепочка поставки электроэнергии, для генерации которой используются возобновляемые источники энергии (ВИЭ); так, для парома Yangtze River Three Gorges 1 электроэнергия для зарядки батарей поступает с ГЭС Three Gorges Dam [26].

Также в КНР активно строятся буксиры, оборудованные аккумуляторными батареями (рис. 1г). Всего по различным оценкам [27] в 2025 г. в КНР будет построено 500 электрических речных и морских судов, их общее количество составит 1520, а к 2030 г. превысит 10 000 единиц (рис. 2). При этом учитываются только чисто электрические суда (оборудованные электроаккумуляторами) и не учитываются прямые и параллельные гибридные энергоустановки.

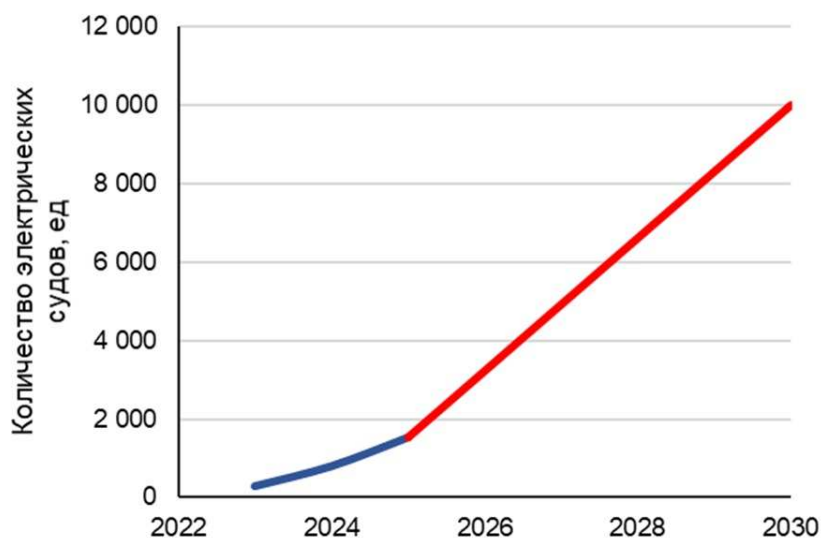


Рис. 2. Динамика увеличения в КНР количества судов, оборудованных электрическими аккумуляторными батареями

Электрификация флота в Китае финансируется за счет мощной государственно-частной модели, где государство задает стратегию и создает финансовые стимулы, а частный и корпоративный сектор осуществляют непосредственные инвестиции.

Так, государство:

- возмещает 30–40 % разницы в стоимости постройки «электрического» судна и судна, оборудованного ДВС;
- вводит зоны контроля выбросов (DECA) на реках Янцзы и Чжуцзян, принуждая судовладельцев обновлять флот под действием нормативного давления.

Частный сектор:

- судовладельцы инвестируют в строительство судов, чтобы сохранить доступ к самым загруженным водным артериям, снизить операционные расходы на топливо и обслуживание в долгосрочной перспективе и выполнить корпоративные экологические цели;
- судостроители инвестируют в НИОКР и перестройку производственных линий, так как видят гарантированный государством рынок на годы вперед;
- производители электрических батарей (CATL, BYD) и энергокомпании (State Grid) инвестируют в развитие технологий и инфраструктуры (зарядные станции, сети), так как для них флот — это новый масштабный рынок сбыта для их основной продукции.

Энергоэффективность и технологии.

В настоящий момент в КНР происходит модернизация флота путем внедрения воздушной смазки, оптимизация корпусов, установки закручивателей потока перед и после гребного винта. Перечень доступных энергоэффективных (EETs) технологий представлен в [15, 28]. Также особое внимание посвящено организации берегового электропитания судов в момент их стоянки в порту при погрузке/разгрузке, что позволит снизить выбросы ПГ в акватории порта за счет отсутствия необходимости использовать судовые стояночные дизель-генераторы. Государственная программа КНР предполагает введение норм на обязательное подключение к береговому электричеству в ключевых портах (Шанхай, Нинбо, Шэньчжэнь) для судов, задействованных в грузовых операциях. Цель программы — охватить 50 % всех портовых терминалов к 2025 г.

Дополнительной отдельно стоящей категорией деятельности, напрямую влияющей на декарбонизацию, является цифровизация флота, предполагающая оптимизацию операционной деятельности по критерию операционных затрат — снижения расхода топлива и, соответственно, снижения углеродных налогов. Сюда входят различные системы оптимизации маршрутов транспортных судов для снижения расхода топлива, а также платформы мониторинга выбросов судов в реальном времени.

Порты и инфраструктура.

Здесь следует выделить национальную стратегию «зеленые порты» [29], согласно которой в крупные китайские порты интегрируются цифровые технологии (Smart) и экологически чистые решения (Green) для трансформации портовой инфраструктуры. Главная цель — превратить крупнейшие порты КНР в углеродно-нейтральные, сверхэффективные логистические хабы. Концепция включает три основных направления: нулевые выбросы и «зеленая» электроэнергия, интеллектуальные операции и автоматизация, а также экологическое взаимодействие с судами (табл. 2).

Таблица 6

Ключевые направления концепции Smart Green Port в КНР

Направление	Цель	Технологии и меры
GREEN — нулевые выбросы и «зеленая» электроэнергия	Декарбонизация энергопотребления порта	<ul style="list-style-type: none"> ● Массовый переход на электричество: электрификация всех стационарных источников выбросов (краны, погрузчики, холодильные склады), а также судов портового флота. ● Использование ВИЭ: установка солнечных панелей на крышах складов, ветрогенераторов, использование энергии волн. ● Бункеровка альтернативным топливом: создание инфраструктуры для заправки судов зеленым СПГ, метанолом, электроэнергией.
SMART — интеллектуальные операции и автоматизация	Максимизация эффективности, минимизация простоев судов и техники	<ul style="list-style-type: none"> ● Портовая операционная система — единая цифровая платформа для всех участников (судов, терминалов, таможни, логистов). ● Автономные транспортные средства (automated guided vehicle — AGV) и краны (беспилотные тягачи и автоматизированные контейнерные краны). ● AI-оптимизация планирования: ИИ-алгоритмы для выбора причалов, кранов и персонала, прогнозирования пиковых нагрузок.
Экологическое взаимодействие с судами	Сокращение выбросов судов на стоянке и на подходе к порту	<ul style="list-style-type: none"> ● Система берегового электроснабжения позволяет судам отключать стояночные дизель-генераторы в порту и питаться от береговой сети. ● Интеллектуальная система управления движением судов (vessel traffic management system — VTMS) оптимизирует маршруты и скорости захода/выхода судов в акватории для экономии топлива. ● Стимулы для «зеленых» судов — скидки на портовые сборы для судов с высоким рейтингом СИ.

Так, порт Шанхая (Яншань) является лидером по автоматизации (самый крупный автоматизированный контейнерный терминал), где внедрены масштабные проекты по береговому электроснабжению (рис. 3а) и организованы производство и поставка «зеленого» бункерного водорода. В порту Тяньцзинь создана «умная» энергосистема на основе ВИЭ и аккумуляторов, а также используются беспилотные тягачи [30]. В порту Нинбо-Чжоушань развивается «цифровой двойник» порта для моделирования операций, в порту Сямэнь, так же как и в Шанхае (Яншань), реализован автоматизированный контейнерный терминал [31].

Экологические стандарты.

Введение локальных зон контроля выбросов (ECA/DECA) в дельте Янцзы, Жемчужной реки и Бохайском заливе — это ключевой инструмент политики Китая по принудительной декарбонизации судоходства. С 1 января 2020 г. суда должны использовать топливо с низким содержанием серы, не превышающим 0,1 % мас., при заходе в некоторые районы рек Янцзы и Сицзян — ECAs для внутренних водных ресурсов. С 1 января 2022 г. суда должны использовать топливо с низким содержанием серы, не превышающим 0,10 % мас. при входе в территориальное море, включая провинцию Хайнань и прибрежную зону Хайнаня.

Технологические инновации и НИОКР.

Одним из наиболее активно развивающихся направлений исследований в КНР является развитие технологий бортового улавливания углерода (CCUS), которые в настоящий момент активно тестируются на сухогрузах и танкерах. Так, первая китайская бортовая система улавливания углерода (OCCS) производства Headway Technology (рис. 3б) была установлена на судне Yue Dian 56 в сентябре 2025 г. Система демонстрирует захват более 99,6 % CO₂. Уловленный CO₂ будет доставляться на берег для хранения.

Также последней актуальной новостью является начало проектирования атомных ледоколов и грузовых судов (совместно с CGN и CNNC), к тому же особенностью проектов является параллельная разработка жидко-солевых реакторов.



Рис. 3. Автоматизированный контейнерный терминал в п. Яншань (Шанхай) [32] (а); система OCCS (б)

Международное взаимодействие.

Поддержка глобальных целей ИМО: КНР поддерживает стратегию ИМО-2023 (нулевые выбросы к 2050 г.), но акцент делает на дифференцированной ответственности (учет интересов развивающихся стран). Страна также активно поддерживает различные «зеленые» морские коридоры — способствует созданию бункеровочной инфраструктуры (например, инициатива «Шанхай — Лос-Анджелес»).

Китайские верфи (COSCO, CSSC) создают экологичные суда для мирового рынка, происходит экспорт «зеленых» технологий.

Таким образом, КНР проводит агрессивную политику декарбонизации водного транспорта, делая ставку на СПГ как переходное топливо и водород/аммиак как долгосрочное решение, сочетая это с электрификацией и цифровизацией. Во многих отраслях экономики, где внедряются решения по декарбонизации, государство несет часть первоначальных затрат через субсидии, но в долгосрочной перспективе создает условия для роста новых отраслей (производство батарей, «умные» сети) и снижения социальных издержек (очистка воздуха, выполнение климатических обязательств). Фактически это государственные инвестиции в трансформацию экономики.

2.3. США

Политика США в области декарбонизации водного транспорта является многоуровневой и сочетает жесткое регулирование на национальном уровне с инновационными инициативами на уровне штатов и портов.

Общая стратегия и нормативная база.

Администрация президента Д. Байдена поставила цели по достижению 100 % безуглеродной электроэнергии к 2035 г. и нулевых выбросов по всей экономике к 2050 г. [33]. Водный транспорт, являющийся частью этой стратегии, регулируется Агентством по охране окружающей среды (US EPA), устанавливающим национальные стандарты в соответствии с Законом о чистом воздухе [34].

Регулирование выбросов в портах и прибрежных зонах.

Программа контроля выбросов в портах (Ports Initiative) от EPA — добровольная программа, направленная на сокращение выбросов от всех источников в портах, включая суда, грузовики и портовую технику. В рамках программы происходит стимулирование берегового электроснабжения, EPA предоставляет гранты и техническую помощь портам для установки систем, позволяющих судам отключать свои стояночные дизель-генераторы и подключаться к местной электрической сети. Финансируется снижение выбросов от портовой техники: перевод портовых погрузчиков, кранов и тягачей на электрические или гибридные модели, стимулирование более «чистых» судовых технологий.

США (совместно с Канадой) инициировали создание зоны контроля выбросов серы (SECA) и оксидов азота (NECA) вокруг большей части своего побережья. Суда в этих зонах должны использовать топливо с содержанием серы не более 0,1 % и соответствовать стандарту Tier III по NO_x.

Стимулирование «зеленых судоходных коридоров».

Администрация США совместно с другими странами (например, Норвегией) продвигала создание «зеленых судоходных коридоров» — маршрутов, где будут курсировать суда с нулевым уровнем выбросов. Например, коридоры Лос-Анджелес/Лонг-Бич — Шанхай, Сиэтл — Ванкувер. Цель этого — создать спрос на безуглеродные перевозки на конкретных маршрутах, стимулируя инвестиции в суда и инфраструктуру.

Финансирование и налоговые льготы.

Закон о снижении инфляции (IRA) предусматривает выделение значительных налоговых льгот на производство «зеленого» водорода и устойчивого авиационного топлива (SAF), технологии которого могут быть адаптированы и для морского сектора. Программа грантов EPA Clean Ports включает бюджет в 3 млрд долл. США на замену портовой техники на новую с нулевым уровнем выбросов и планирование декарбонизации портов.

Фокус на инновациях и НИОКР.

Министерство энергетики (DOE) финансирует исследования в области новых морских топлив, таких как аммиак, водород и метанол. Также в рамках НИОКР происходит поддержка пилотных проектов, например, по созданию паромов на водородных топливных элементах или аккумуляторных электрических буксиров.

Роль штатов (на примере Калифорнии). В экологическом регулировании водного транспорта, как и в случае с автомобильным, тон задает Калифорния.

В настоящий момент правовой мандат Калифорнии At-Berth Regulation [35] представляет собой самое строгое в мире правило по береговому электроснабжению. Оно обязательно для определенных типов судов (контейнеровозы, рефрижераторы и пассажирские суда). Суда должны подключаться к береговому электроснабжению в портах Калифорнии и отключать стояночные дизель-генераторы. Правило ужесточается, охватывая все больше типов судов. Поскольку Калифорния — основной порт для торговли с Азией, это правило вынуждает все международные судоходные компании инвестировать в технологию подключения к береговой сети.

В инициативе по чистым судам Clean Shipping Initiative [36] Калифорния рассматривает возможность введения стандартов нулевых выбросов для всех судов, заходящих в ее порты, к 2040 г.

Внутренний водный транспорт.

Декарбонизация речного судоходства в основном стимулируется через федеральные гранты на модернизацию барж и буксиров (замену старых дизельных двигателей на более эффективные или переход на гибридные силовые установки) и создание инфраструктуры СПГ (развитие заправки барж СПГ на реке Миссисипи и ее притоках).

Таблица 7

Меры США по декарбонизации водного транспорта

Уровень	Мера	Описание	Статус
Федеральный	Зоны контроля выбросов (ЕСА)	Снижение выбросов SO _x и NO _x в прибрежных водах	Действует
Федеральный	Гранты на береговое электроснабжение и порты	Финансирование инфраструктуры для снижения выбросов в портах	Активно финансируется
Федеральный	«Зеленые коридоры»	Стимулирование создания маршрутов с нулевыми выбросами	Стадия переговоров и планирования
Штата (Калифорния)	Обязательное правило At-Berth	Юридическое требование использовать береговое электроснабжение	Действует и ужесточается
Федеральный	НИОКР и пилотные проекты	Финансирование разработки водородных, аммиачных и электрических судов	Ранняя стадия, активные инвестиции

Вызовы для США.

Замена флота и портовой инфраструктуры требует значительных инвестиций. Отсутствует федеральный мандат по декарбонизации — в отличие от ЕС, в США нет общенационального закона, обязывающего судоходство достичь нулевых выбросов к конкретной дате. Политика носит более фрагментированный и, скорее, стимулирующий характер. Также стоит отметить нарастающую конкуренцию с ЕС и Азией за лидерство в разработке технологий и стандартов. Зависимость от международного права (большая часть флота работает под иностранными флагами) ограничивает прямое регулирование со стороны США.

Таким образом, подход США к декарбонизации водного транспорта можно охарактеризовать как «регулирование через стимулирование и точечное давление». Давление осуществляется через жесткие экологические зоны (ЕСА) и обязательные правила Калифорнии, а стимулирование происходит через масштабные федеральные гранты и налоговые льготы на «зеленый» водород и инфраструктуру. В отличие от директивного подхода ЕС, США делают ставку на создание благоприятных условий и точечное регулирование в ключевых точках (порты, побережье), чтобы рыночные силы и технологические инновации

сами привели к декарбонизации отрасли. Успех этого подхода будет зависеть от согласованности действий властей отдельных штатов, частного сектора и постоянства подхода к проблемам экологии на уровне федерального правительства.

2.4. Норвегия

Норвегия — это мировой феномен и лидер в области декарбонизации водного транспорта. Ее подход уникален сочетанием амбициозных национальных целей, введением ограничений на выбросы NO_x и SO_x в исключительной экономической зоне Норвежского моря, мощных финансовых стимулов и фокусом на технологических инновациях.

Общая стратегия и национальные цели.

Норвегия поставила цель снизить выбросы на 55 % к 2030 г. по сравнению с 1990 г. и стать низкоуглеродным обществом к 2050 г. Из-за своей уникальной географии с многочисленными фьордами, которые являются объектами Всемирного наследия ЮНЕСКО и популярными туристическими направлениями, Норвегия сделала чистоту своих водных артерий абсолютным приоритетом.

Цели для водного транспорта: выбросы от судов во фьордах, внесенных в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, должны быть нулевыми; к 2026 г. все новые паромы, курсирующие на государственных маршрутах, должны иметь нулевой или низкий уровень выбросов.

Ключевые инструменты политики.

Норвегия использует комбинацию жесткого регулирования и щедрого финансирования.

а) Фискальные стимулы — освобождение от налогов, от НДС и регистрационного сбора при покупке судов с нулевым уровнем выбросов, снижение портовых сборов для «чистых» судов, снижение акцизов на биотопливо и возобновляемое дизельное топливо.

Норвегия использует для этого средства Фонда NO_x — гибридного инструмента. Компании платят в него налог за выбросы NO_x . Собранные средства затем используются для финансирования до 80 % дополнительных затрат на проекты по снижению выбросов NO_x (например, установку систем очистки выхлопных газов или переход на более чистое топливо).

б) Жесткое регулирование — правительство Норвегии ввело обязательные требования к нулевым выбросам для всех судов (включая круизные лайнеры и паромы) в охраняемых фьордах. Это вынудило судовладельцев либо переходить на электричество/водород, либо устанавливать системы аккумуляторных батарей для работы в «режиме нулевых выбросов» при заходе в эти зоны. При проведении тендеров на государственные паромные маршруты приоритет отдается предложениям с самыми низкими или нулевыми выбросами. Это создает гарантированный спрос для производителей «зеленых» судов.

Технологические приоритеты: электричество и водород.

Норвегия делает стратегическую ставку на две основные технологии:

а) электрификация морского транспорта — Норвегия обладает крупнейшим в мире парком полностью электрических и гибридных судов (более 80 электропаромов). Короткие и предсказуемые маршруты паромов идеально подходят для аккумуляторных технологий. Норвегия доказала их коммерческую жизнеспособность. По всей стране развернута сеть зарядных станций для паромов и катеров;

б) водородные топливные элементы. Понимая, что батареи подходят не для всех типов судов (например, для грузовых или дальних паромов), Норвегия активно инвестирует в водород. В стране уже эксплуатируются первые в мире водородные паромы (MF Hundra) и ведется строительство водородных грузовых судов. Норвегия использует свое изобилие гидроэнергии для производства экологически чистого водорода, что делает всю цепочку действительно безуглеродной.

Влияние на мировой рынок.

Политика Норвегии оказала эффект домино за ее пределами. Спрос со стороны Норвегии позволил производителям судов и оборудования (таким как Kongsberg, Siemens, Corvus Energy) отработать технологии, снизить затраты и предложить их на глобальном рынке. Норвегия на практике доказала, что электрические и водородные суда — это не научная фантастика, а коммерчески доступная реальность. Норвежские компании теперь являются мировыми лидерами в области «зеленых» судоходных технологий.

Стоимость устойчивых решений для судов и инфраструктуры в Норвегии все еще дороги, несмотря на субсидии. Массовая электрификация транспорта создает нагрузку на местные энергосети, особенно в удаленных районах. Фомирование полной цепочки создания стоимости для водорода (производство, хранение, распределение, использование) остается сложной задачей. Норвегия — это живая лаборатория и глобальный пионер декарбонизации водного транспорта. Ее успех основан на четком стратегическом видении и политической воле, эффективном сочетании финансовых стимулов и жесткого регулирования и

прагматичном технологическом подходе: электрификации сначала там, где это технически осуществимо (паромах), и параллельном развитии водорода для более сложных задач.

2.5. Сингапур

Сингапур — это уникальный игрок в глобальной системе декарбонизации судоходства. Будучи крупнейшим в мире бункеровочным хабом, Сингапур фокусируется не на принудительном регулировании, а на том, чтобы стать глобальным хабом и инновационным центром для экологичных судоходных решений.

Общая стратегия заключается в том, чтобы пройти путь от топливного хаба к центру «зеленых» решений. Стратегия Сингапура продиктована его зависимостью от морской торговли. Его цель — не просто соответствовать новым стандартам, а возглавить переход и остаться незаменимым узлом для мирового судоходства в новой, низкоуглеродной реальности. Сингапур стремится достичь пика выбросов к 2030 г. и нулевых выбросов к 2050 г. Морской сектор является ключевым. Сингапурская дорожная карта декарбонизации морского транспорта фокусируется на четырех основных направлениях: порт и инфраструктура, топливо и бункеровка, суда и глобальное партнерство и финансы.

Ключевые направления и инструменты политики.

а) **Позиционирование себя как центра «зеленой» бункеровки** — главный приоритет Сингапура. Сингапур активно развивает инфраструктуру для бункеровки сжиженным природным газом (СПГ), позиционируя его как ключевое переходное топливо. Это позволяет ему сохранить долю рынка, пока суда переходят с мазута. Сингапур тестирует и коммерциализирует поставки биотоплива и готовится к поставкам метанола. Успешно проведены сделки по бункеровке смесей биотоплива (например, В24). Сингапур работает над созданием глобальных стандартов безопасности для бункеровки новых видов топлива, таких как метанол, аммиак и водород.

б) **Создание финансовых и деловых стимулов.** Фонд «Зеленые суда Сингапура» предоставляет судовладельцам финансовые стимулы для модернизации или строительства судов, которые используют одобренные Сингапуром низко- или безуглеродные технологии. Субсидии покрывают до 30 % разницы в стоимости между «зеленым» судном и обычным. Сингапурская Морская администрация предоставляет скидку до 100 % на портовые сборы для судов, использующих СПГ в Сингапуре, или судов с нулевым уровнем выбросов, таких как полностью электрические.

в) **Инвестиции в НИОКР и пилотные проекты.** Для испытаний и разработки новых морских технологий, включая системы управления энергопотреблением, новые виды топлива и технологии улавливания углерода создан Центр морских энергоресурсов (МЕС).

Электрические катера-буксиры, испытания «зеленого коридора» Сингапур — Роттердам, где тестируются безуглеродные цепочки поставок.

г) **Активная роль в глобальном регулировании.**

Сингапур является влиятельным членом Совета ИМО Категории А и активно участвует в формировании глобальных правил, чтобы они были практичными и учитывали интересы ключевых портов и судоходных компаний.

Внутренний водный транспорт и порт. Поощряется переход на электрические вилочные погрузчики, краны и тягачи. На новых терминалах внедряется береговое электроснабжение.

Таблица 8

Меры Сингапура по декарбонизации водного транспорта

Уровень	Мера	Описание	Цель
Топливный/ рыночный	Развитие «зеленой» бункеровки	Стать хабом для СПГ, биотоплива, метанола	Сохранить лидерство на рынке бункеровки в эпоху энергоперехода
Финансовый	Фонд «Зеленые суда»	Субсидии на строительство/модернизацию «зеленых» судов	Стимулировать спрос и привлечь современных судовладельцев
Инновационный	НИОКР и пилотные проекты	Испытания новых технологий и топлив	Стать испытательным полигоном и первопроходцем в новых решениях
Регуляторный	Скидки на портовые сборы	Поощрение использования СПГ и нулевых технологий	Немедленно стимулировать более чистые операции в порту

Нехватка земли затрудняет размещение крупных производственных мощностей для «зеленого» водорода или аммиака. Создание всей новой инфраструктуры для безуглеродных топлив требует значительных инвестиций. Другие порты (Роттердам, Шанхай) также стремятся стать центрами «зеленой» бункеровки. Сингапuru придется импортировать «зеленые» топлива, такие как аммиак или водород, что создает риски для энергетической безопасности.

Выводы по разделу. Сингапур демонстрирует умный и проактивный подход к декарбонизации. Понимая, что его существующая бизнес-модель под угрозой, он не сопротивляется изменениям, а активно их возглавляет. Его стратегия заключается в том, чтобы: диверсифицировать портфель бункеровочных топлив от мазута к СПГ, биотопливу, метанолу и в конечном итоге аммиаку. Создать экосистему, которая делает Сингапур наиболее удобным и безопасным местом для испытаний, финансирования и внедрения «зеленых» судоходных технологий. Опыт Сингапура показывает, что в XXI в. лидерство в морской логистике определяется не только размером порта, но и способностью инновировать и задавать стандарты для устойчивого судоходства будущего.

ВЫВОДЫ

Происходит стремительная и необратимая трансформация всей отрасли, движимая тремя ключевыми силами: регулированием, технологиями и финансиализацией выбросов.

1. Жесткое регулирование: ведущие игроки (ЕС, США, Китай) и международные организации (ИМО) вводят обязательные стандарты, которые делают выбросы CO₂ с судов финансово обременительными. ЕС с 2024 г. включил судоходство в свою систему торговли квотами EU ETS. ИМО ввела глобальные технические (EEXI) и операционные (CII) стандарты эффективности, которые уже меняют работу всего мирового флота. Планируется развитие этой системы, в том числе появление стандарта ИТВПГ (GFI).

2. Технологическая гонка за топливом будущего, в которой нет единого решения, но уже давно сформировались четкие направления:

- а) краткосрочное решение — массовый переход на СПГ и биотопливо;
- б) среднесрочное решение — метанол и аммиак;
- в) долгосрочное решение — «зеленый» водород и электрические аккумуляторы (для внутреннего транспорта или каботажных рейсов), применение ядерной энергии.

3. Финансиализация углеродного следа. «Зеленый» рейтинг судна (CII) становится коммерческим активом. Банки, страховщики и крупные фрахтователи (Amazon, IKEA, MAERSK и др.) уже сегодня отдают предпочтение и лучшие финансовые условия судам с низкими выбросами.

Таблица 9

Меры стран по декарбонизации водного транспорта

Страна/регион	Ключевые меры	Фокус
ЕС	EU ETS, FuelEU Maritime	Регуляторное и рыночное давление, создание углеродной стоимости
Китай	«Зеленые» коридоры, судостроение	Государственное планирование, захват рынка «зеленых» технологий
США	Стимулы, «зеленые» порты, коридоры	Финансирование инноваций и инфраструктуры, мягкая сила
Норвегия	Электрификация паромов, водород	Пилотные проекты, государственные закупки для создания рынка
Сингапур	«Зеленая» бункеровка, НИОКР	Позиционирование себя как будущего хаба для бункеровки альтернативными топливами

В настоящий момент стало ясно, что современное видение будущего в развивающихся (с точки зрения декарбонизации) стран — в гибридных решениях, исключающих использование единого энергоресурса. Страны играют разные роли: одни создают регуляторное давление (ЕС), другие — технологические решения (Китай, Корея, Япония в судостроении), третьи — инфраструктуру для топлива (Сингапур). Декарбонизация водного транспорта — это марафон, который только начался, но под давлением ИМО и таких игроков, как ЕС, он необратим.

На основе изложенного ранее сформулированы следующие ключевые выводы о состоянии и перспективах декарбонизации мирового транспорта.

1. Сформировалась глобальная архитектура регулирования.

ЕС стал бесспорным лидером, создав наиболее жесткую и комплексную систему регулирования через расширение EU ETS на морской (с 2024 г.) и автомобильный транспорт (EU ETS 2 с 2027 г.); запреты на ДВС автомобилей к 2035 г.; директиву CSRD, делающую углеродный след коммерческим параметром.

ИМО сохраняет роль ключевого глобального регулятора морского транспорта, внедрив стандарты EEDI и EEXI и операционный рейтинг CII, ставший «углеродным паспортом» судна, поэтапные цели декарбонизации до 2050 г.

2. Страны выбрали различные стратегические пути.

Китай: государственное планирование + массовые субсидии + система NEV-кредитов.

США: рыночное регулирование + инициатива штатов (в первую очередь Калифорнии) + технологические инновации.

Норвегия: радикальное фискальное стимулирование (освобождение от НДС и налогов) + запреты выбросов во фьордах.

Сингапур: позиционирование как хаб «зеленой» бункеровки + финансовые стимулы + стандартизация.

3. Углеродный учет стал стандартом бизнеса.

Расчет выбросов по методологии GHG Protocol (Scope 1, 2, 3) стал обязательным для крупных компаний. GLEC Framework и ISO 14083 обеспечили стандартизацию расчетов для смешанных перевозок. Ключевым параметром стала углеродоемкость электроэнергии, отличающаяся между странами в 50+ раз.

4. Технологическая трансформация набирает скорость.

Доминирование электрификации, 2035 г. как точка запрета ДВС в ведущих экономиках. Морской транспорт готовится к мультитопливному переходу (СПГ → метанол/аммиак → водород) + электрификации некоторых типов судов (паромов, буксиров и т.д.).

5. Сформировались новые бизнес-модели и риски.

Углеродный след стал коммерческим активом. Финансовые институты (Poseidon Principles) привязали финансирование проектов к их экологическим рейтингам. Низкие рейтинги СП ведут к юридическим последствиям и коммерческой изоляции судов.

6. Ключевые вызовы остаются нерешенными.

Речь идет о таких проблемах, как изыскание средств на финансирование перехода (создание инфраструктуры и судов), технологическая неопределенность, то есть отсутствие единой технологии нулевого выброса, социальная несправедливость, выражающаяся в росте стоимости логистики для развивающихся стран, зависимость от «зеленого» водорода и аммиака.

Транспортный сектор переживает самую глубокую трансформацию за 100 лет. Из консервативной отрасли он превращается в полигон климатических технологий и инноваций. Декарбонизация перестала быть экологической инициативой и стала стратегическим императивом экономической конкурентоспособности и национальной безопасности. Успех перехода будет определяться способностью стран и компаний создать синергию между жестким регулированием, финансовыми стимулами, технологическими инновациями, глобальным сотрудничеством. Тот, кто выиграет эту гонку, определит стандарты мировой торговли и логистики на десятилетия вперед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Maritime Organization. Fourth IMO GHG Study 2020. Full report. London: IMO, 2020.
2. Березин А.О. Сравнительный анализ документов стратегического планирования ИМО и Российской Федерации в области сокращения выбросов парниковых газов / А.О. Березин, С.А. Толмачев, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23–34. — EDN WZWOPO.
3. Клюев В.В. О конвергенции международного и национального регулирования выбросов парниковых газов в морском судоходстве // Образование и право. — 2025. — № 1. — С. 470–476. — URL: <https://education.law-books.ru/образование-и-право-№-1-2025> (дата обращения 22.01.2026).
4. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJOQTC.
5. Шурпяк В.К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В.К. Шурпяк, М.С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 29–36. — EDN QYFSKP.
6. 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. Шурпяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBVVJV.
7. International Maritime Organization. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.imo.org/ru/about/pages/default.aspx> (дата обращения 28.01.2026).
8. Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов. Резолюция МЕРС.304(72). 2018.
9. Стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов на 2023 год. Резолюция МЕРС.377(80). 2023.
10. Парижское соглашение (принято 12 декабря 2015 г.). — [Электронный ресурс] URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения 28.01.2026).
11. Толмачев С.А. Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (СП) и предлагаемые подходы к их совершенствованию / С.А. Толмачев, А.А. Серов, А.А. Михеева, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 24–32. — EDN FXBYEL.

12. Шурпак В.К. Влияние типа топлива на эксплуатационный показатель углеродоемкости (СП) морских судов / В.К. Шурпак, Д.С. Семионичев, В.В. Коренев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 119–128. — EDN FDJPZY.
13. Шурпак В.К. Анализ потребления топлива и энергоэффективности на российских морских судах (2019–2024) / В.К. Шурпак, А.Е. Чугаева, А.О. Березин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 148–163. — EDN YYPHNE.
14. Поправки 2021 года к приложению к протоколу 1997 года об изменении Международной Конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной протоколом 1978 года к ней. Резолюция МЕРС.328(76). 2021.
15. Реуцкий А.С. Декарбонизация морского судоходства: тенденции, регуляторные инструменты, альтернативные топлива, вызовы и достижение нулевых выбросов / А.С. Реуцкий, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 17–37. — EDN CVNGFP.
16. Буянов А.С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А.С. Буянов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 13–28. — EDN QJKVC.
17. Чернов О.А. Совершенствование модели межинституционального взаимодействия для повышения экономической эффективности морского транспорта на рынке логистических услуг / О.А. Чернов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. — 2025. — № 4. — С. 102–112. — DOI 10.24143/2073-5537-2025-4-102-112. — EDN JGJGXG.
18. Чернов О.А. Модернизация Системы проверки государств — членов ИМО для повышения эффективности деятельности морского транспорта / О.А. Чернов, Е.С. Палкина // Государственное управление. Электронный вестник. — 2023. — Вып. 101. — С. 103–119. — DOI 10.24412/2070-1381-2023-101-103-119. — EDN FDDZBH.
19. Амурская М.А. Концепция низкоуглеродной экономики и опыт Китая // Экономические науки. — 2023. — № 1. — С. 141–145. — EDN SNWHGQ.
20. China Academy of Transportation Sciences. Report on Sustainable Transport in China. Beijing: CATS, [s. a.].
21. China completes SIMOPS LNG bunkering op of CMA CGM containership in Shanghai // Manifold Times. — 2024. — 26 June. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/china-simops-lng-bunkering-op-of-cma-cgm-boxship-completed-in-shanghai/> (дата обращения 27.01.2026).
22. China's Shenzhen Yantian port to boost 2025 LNG bunkering volume to 450,000 cu m // S&P Global. — 2025. — 15 Jan. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/lng/011525-china-shenzhen-yantian-port-to-boost-2025-lng-bunkering-volume-to-450000-cu-m> (дата обращения 27.01.2026).
23. China annual LNG bunker volume at Ningbo-Zhoushan port exceeds 100,000 m³ for first time // Manifold Times. — 2025. — 8 Jan. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/china-annual-lng-bunker-volume-at-ningbo-zhoushan-port-exceeds-100000-m3-for-first-time/> (дата обращения 27.01.2026).
24. Tianjin port achieves China's first green methanol bunkering operation of ro-ro ship // Manifold Times. — 2025. — 17 Sept. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/tianjin-port-achieves-chinas-first-green-methanol-bunkering-operation-of-ro-ro-ship/> (дата обращения 27.01.2026).
25. China unveils world's first all-electric container ship // The Cool Down. — 2025. — 15 Apr. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.thecooldown.com/green-tech/greenwater-01-container-ship-china-electric/> (дата обращения 27.01.2026).
26. World's largest electric cruise ship makes maiden voyage in China with a whopping 7,500 kWh in battery power // Electrek. — 2022. — 31 Mar. — [Электронный ресурс] URL: <https://electrek.co/2022/03/31/worlds-largest-electric-cruise-ship-makes-maiden-voyage-in-china-with-a-whopping-7500-kwh-in-battery-power/> (дата обращения 27.01.2026).
27. Evtank released a report on the development of China's cylindrical battery industry 2025 // Electrification Solutions. — 2025. — 10 Mar. — [Электронный ресурс] URL: <https://electrification-solutions.com/evtank-released-a-report-on-the-development-of-chinas-cylindrical-battery-industry-2025/> (дата обращения 27.01.2026).
28. Реуцкий А.С. Обновление рынка морских судов: внедрение альтернативных топлив и энергоэффективных технологий (EETs) / А.С. Реуцкий, А.А. Буцанец // Сборник научных статей Нац. науч.-практ. конф. проф.-преп. состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». 06–20 октября 2025 года. Том 2. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2025.
29. Семенова Н.К. На пути к углеродной нейтральности: «умные» порты и «зеленые» корабли Китая // Восточная аналитика. — 2023. — № 1. — [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/na-puti-k-uglerodnoy-neytralnosti-umnye-porty-i-zelenye-korabli-kitaya> (дата обращения 27.01.2026).
30. Tianjin port to build world's first zero-carbon smart terminal // Safety4Sea. — 2023. — 1 Dec. — [Электронный ресурс] URL: <https://safety4sea.com/tianjin-port-to-build-worlds-first-zero-carbon-smart-terminal/> (дата обращения 27.01.2026).
31. Intelligent technologies and green transition empower Xiamen Port // ATNews. — 2024. — 22 May. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.atnews.co.za/intelligent-technologies-and-green-transition-empower-xiamen-port/> (дата обращения 27.01.2026).
32. The World's Largest Automated Container Port. — 2018. — [Электронный ресурс] URL: <https://e.huawei.com/se/case-studies/global/2018/201807050920> (дата обращения 28.01.2026).
33. United States Congress. Inflation Reduction Act. Public Law 117–169. — 2022. 16 Aug.
34. United States Environmental Protection Agency (EPA). Clean Air Act (CAA). — [Электронный ресурс] URL: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text> (дата обращения 28.01.2026).
35. California At-Berth Requirements // ABS Regulatory News. — 2023. — № 05/2023. — Apr. — 6 с. — [Электронный ресурс] URL: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/regulatory-news/2023/ABS%20Regulatory%20News%20-%20CARB%20at%20Berth%20Requirements.pdf> (дата обращения 28.01.2026).
36. California Congressman and Senator reintroduce Clean Shipping Act // Ship.Energy. — 2025. — 11 July. — [Электронный ресурс] URL: <https://ship.energy/technology/california-congressman-and-senator-reintroduce-clean-shipping-act/> (дата обращения 28.01.2026).

REFERENCES

1. International Maritime Organization. Fourth IMO GHG Study 2020. Full report. London: IMO, 2020.
2. 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.)
3. Klyuev V.V. About convergence of international and national regulations on greenhouse gas emissions from maritime shipping. *Education and Law*. 2025. No. 1. P. 470–476. — URL: <https://education.law-books.ru/образование-и-право-№-1-2025> (accessed 22.01.2026). (In Russ.)
4. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4–15. EDN FJOQTC. (In Russ.)
5. 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.)
6. 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 FBBJV. (In Russ.)
7. International Maritime Organization. URL: <https://www.imo.org/ru/about/pages/default.aspx> (accessed 28.01.2026).
8. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.304(72). 2018.
9. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.377(80). 2023.
10. Парижское соглашение (принято 12 декабря 2015 г.). URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed 28.01.2026).
11. Tolmachev S.A., Serov A.A., Mikheeva A.A., Semionichev D.S., Reutskii A.S. 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. Shurpyak V.K., Semionichev D.S., Korenev V.V. The impact of fuel type on carbon intensity indicator (CII) of marine ships. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 119–128. EDN FDJPZY. (In Russ.)
13. 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 YYPHHE. (In Russ.)
14. Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto. Resolution MEPC.328(76). 2021.
15. Reutskii A.S., Butsanets A.A. International experience of decarbonization of water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. Vol. 56, No. 1. P. 17–37. EDN CVNGFP. (In Russ.)
16. Buyanov A.S., Reutsky A.S. Formation of a methodology for determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 13–28. EDN QJIKBC. (In Russ.)
17. Chernov O.A. Improving the model of interinstitutional interaction to enhance the economic efficiency of maritime transport in the logistics services market. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2025. No. 4. P. 102–112. DOI 10.24143/2073-5537-2025-4-102-112. EDN JGJGXG. (In Russ.)
18. Chernov O.A., Palkina E.S. Modernizing the IMO Member State Audit Scheme to Increase Efficiency of Maritime Transport. *Public Administration. E-journal (Russia)*. 2023. Iss. 101. P. 103–119. DOI 10.24412/2070-1381-2023-101-103-119. EDN FDDZBH.
19. Amurskaya M.A. Low carbon economy vision and Chinese experience. *Economic Sciences*. 2023. No. 1. P. 141–145. EDN SNWHGQ.
20. China Academy of Transportation Sciences. Report on Sustainable Transport in China. Beijing: CATS, [s. a.].
21. China completes SIMOPS LNG bunkering op of CMA CGM containership in Shanghai. *Manifold Times*. 2024. 26 June. URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/china-simops-lng-bunkering-op-of-cma-cgm-boxship-completed-in-shanghai/> (accessed 27.01.2026).
22. China's Shenzhen Yantian port to boost 2025 LNG bunkering volume to 450,000 cu m. S&P Global. 2025. 15 Jan. URL: <https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/lng/011525-china-shenzhen-yantian-port-to-boost-2025-lng-bunkering-volume-to-450000-cu-m> (accessed 27.01.2026).
23. China annual LNG bunker volume at Ningbo-Zhoushan port exceeds 100,000 m³ for first time. *Manifold Times*. 2025. 8 Jan. URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/china-annual-lng-bunker-volume-at-ningbo-zhoushan-port-exceeds-100000-m3-for-first-time/> (accessed 27.01.2026).
24. Tianjin port achieves China's first green methanol bunkering operation of ro-ro ship. *Manifold Times*. 2025. 17 Sept. URL: <https://www.manifoldtimes.com/news/tianjin-port-achieves-chinas-first-green-methanol-bunkering-operation-of-ro-ro-ship/> (accessed 27.01.2026).
25. China unveils world's first all-electric container ship. *The Cool Down*. 2025. 15 Apr. URL: <https://www.thecooldown.com/green-tech/greenwater-01-container-ship-china-electric/> (accessed 27.01.2026).
26. World's largest electric cruise ship makes maiden voyage in China with a whopping 7,500 kWh in battery power. *Electrek*. 2022. 31 Mar. URL: <https://electrek.co/2022/03/31/worlds-largest-electric-cruise-ship-makes-maiden-voyage-in-china-with-a-whopping-7500-kwh-in-battery-power/> (accessed 27.01.2026).
27. Evtank released a report on the development of China's cylindrical battery industry 2025. *Electrification Solutions*. 2025. 10 Mar. URL: <https://electrification-solutions.com/evtank-released-a-report-on-the-development-of-chinas-cylindrical-battery-industry-2025/> (accessed 27.01.2026).
28. Reutskii A.S., Butsanets A.A. Obnovlenie rynka morskikh sudov: vnedrenie al'ternativnykh topliv i energoeffektivnykh tekhnologii (EETs) [Reinventing the Marine Vessel Market: Implementing Alternative Fuels and Energy-Efficient Technologies (EETs)]. *Sbornik nauchnykh statei Nats. nauch.-prakt. konf. prof.-prep. sostava FGBOU VO "GUMRF im. adm. S.O. Makarova [Proceedings of the National Science and Pract. Conf. of the Faculty Members of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Oct. 06–20, 2025. Vol. 2]. St. Petersburg: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2025.*

29. Semenova N.K. On the way to carbon neutrality: "smart" ports and "green" ships of China. Eastern Analytics. 2023. No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/na-puti-k-uglerodnoy-neytralnosti-umnye-porty-i-zelenye-korabli-kitaya> (accessed 27.01.2026).
30. Tianjin port to build world's first zero-carbon smart terminal. *Safety4Sea*. 2023. 1 Dec. URL: <https://safety4sea.com/tianjin-port-to-build-worlds-first-zero-carbon-smart-terminal/> (accessed 27.01.2026).
31. Intelligent technologies and green transition empower Xiamen Port. *ATNews*. 2024. 22 May. URL: <https://www.atnews.co.za/intelligent-technologies-and-green-transition-empower-xiamen-port/> (accessed 27.01.2026).
32. The World's Largest Automated Container Port. 2018. URL: <https://e.huawei.com/se/case-studies/global/2018/201807050920> (accessed 28.01.2026).
33. United States Congress. Inflation Reduction Act. Public Law 117–169. 2022. 16 Aug.
34. United States Environmental Protection Agency (EPA). Clean Air Act (CAA). URL: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text> (accessed 28.01.2026).
35. California At-Berth Requirements. *ABS Regulatory News*. 2023. № 05/2023. Apr. 6 p. URL: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/regulatory-news/2023/ABS%20Regulatory%20News%20-%20CARB%20at%20Berth%20Requirements.pdf> (accessed 28.01.2026).
36. California Congressman and Senator reintroduce Clean Shipping Act. *Ship.Energy*. 2025. 11 July. URL: <https://ship.energy/technology/california-congressman-and-senator-reintroduce-clean-shipping-act/> (accessed 28.01.2026).

Статья поступила в редакцию 09.02.2026.

Принята к публикации 12.03.2026.

УДК 656.6:662.769.2
EDN KCVCWR

АНАЛИЗ СВОЙСТВ, ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДОРОДА В ГАЗОВОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ

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 статье рассматриваются физико-химические свойства водорода в различных агрегатных состояниях с акцентом на обеспечение безопасности его транспортировки в сжиженном виде (LH₂) на морских судах. Цель исследования — выявление ключевых опасностей для судовых систем хранения, экипажа, персонала и окружающей среды, связанных с хранением и транспортировкой LH₂. Для достижения этой цели автор обобщил данные отечественных и зарубежных исследований, а также нормативных документов, включая фазовые диаграммы, характеристики изомеров водорода (орто- и параводорода), пределы воспламеняемости и взаимодействия с материалами.

Основные задачи статьи включают: анализ физических характеристик водорода в газовом и жидком состояниях; оценку химических свойств, таких как высокая диффузионная способность, широкие пределы воспламеняемости и склонность к детонации; изучение влияния на конструкционные материалы, включая водородное охрупчивание и криогенное воздействие на пластичность металлов; анализ физиологического воздействия на человека.

В результате выделены категории рисков: криогенные (холодовые травмы, охрупчивание материалов), пожароопасные (невидимое пламя, взрывоопасные смеси с кислородом), технологические (утечки, проницаемость) и связанные с человеческим фактором (недостаток подготовки экипажа). LH₂ — наиболее эффективный, но сложный в обращении носитель энергии, требующий специальных мер митигации рисков, включая выбор материалов (аустенитные стали, алюминий) и систем изоляции. Актуальное в контексте перехода к водородной энергетике и декарбонизации транспорта исследование предлагает основу для проектирования безопасных судовых систем. Рекомендуется дальнейшее изучение емкостей хранения и методов оценки рисков.

Цель статьи — выявить ключевые физико-химические свойства водорода в газовой и жидкой фазах, а также связанные с ними опасности для судовых систем хранения, для экипажа, персонала и окружающей среды, чтобы обеспечить безопасную морскую транспортировку сжиженного водорода (LH₂) как перспективного энергоносителя в контексте декарбонизации и перехода к экологически чистой энергетике. Задачи статьи:

- обобщить и проанализировать данные исследований и нормативов по свойствам водорода в различных агрегатных состояниях, включая фазовую диаграмму, плотность, диффузию и изомерные формы (орто- и параводород) с орто-параконверсией;
- изучить химические свойства водорода (пределы воспламеняемости, скорость горения, детонация, взаимодействие с кислородом) и влияние на материалы (водородное охрупчивание, криогенное воздействие, термическое сжатие);
- проанализировать физиологическое воздействие на человека (удушие, ожоги, переохлаждение), выделить категории рисков и предложить меры митигации для безопасных систем хранения и транспортировки LH₂ на судах.

Ключевые слова: водород, морская транспортировка водорода, сжиженный водород, LH₂, нижний концентрационный предел распространения пламени, верхний концентрационный предел распространения пламени, НКПР, ВКПР, состояния водорода, физические характеристики, химические характеристики, взаимодействие водорода с материалами, характеристики физиологического воздействия водорода на человека.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Анализ свойств, характеристик и особенностей водорода в газовой и жидкой фазах для обеспечения безопасной морской транспортировки // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 61–76. — EDN KCVCWR.

ANALYSIS OF PROPERTIES, CHARACTERISTICS AND FEATURES OF HYDROGEN IN GAS AND LIQUID PHASES TO ENSURE SAFE SEA TRANSPORTATION

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

The article discusses the physical-chemical properties of hydrogen in various states of aggregation, with an emphasis on ensuring the safety of its transportation in liquefied form (LH₂) on ships. The purpose of the study is to identify the key hazards to ship's storage systems, crew, personnel, and the environment associated with LH₂ storage and transportation. To achieve this goal, the author summarized data from domestic and foreign studies, as well as regulatory documents, including phase diagrams, characteristics of hydrogen isomers (ortho- and para-hydrogen), limits of flammability and interaction with materials.

The main objectives of the article include: analysis of the physical characteristics of hydrogen in gas and liquid states; assessment of chemical properties such as high diffusivity, wide flammability limits and propensity to detonation; study of the effects on structural materials, including hydrogen embrittlement and cryogenic effects on metal ductility; as well as analysis of the physiological effects on humans.

As a result, the following risk categories were identified: cryogenic (cold injuries, embrittlement of materials), fire-hazardous (invisible flames, explosive mixtures with oxygen), technological (leaks, permeability) and related to the human factor (lack of crew training). LH₂ is the most efficient but difficult-to-handle energy carrier, requiring special risk mitigation measures, including the choice of materials (austenitic steels,

aluminum) and insulation systems. The research is relevant in the context of the transition to hydrogen energy and decarbonization of transport, offering a framework for designing safe marine systems. Further study of storage capacities and risk assessment methods is recommended.

The purpose of the article is to identify the key physical-chemical properties of hydrogen in the gas and liquid phases, as well as the associated hazards to ship storage systems, crew, personnel and the environment, in order to ensure safe marine transportation of liquefied hydrogen (LH₂) as a promising energy carrier in the context of decarbonization and the transition to clean energy.

Objectives of the article:

- to summarize and analyze research and regulatory data on the properties of hydrogen in various states of aggregation, including the phase diagram, density, diffusion, and isomeric forms (ortho- and parahydrogen) with ortho-paraconversion;
- to study the chemical properties of hydrogen (flammability limits, burning rate, detonation, interaction with oxygen) and influence on materials (hydrogen embrittlement, cryogenic effect, thermal compression);
- analyze the physiological effects on humans (suffocation, burns, hypothermia), identify risk categories, and propose mitigation measures for safe LH₂ storage and transportation systems on ships.

Key words: hydrogen, marine transportation of hydrogen, liquefied hydrogen, LH₂, lower flammability limit, upper flammability limit, LFL, UFL, hydrogen states, physical characteristics, chemical characteristics, interaction of hydrogen with materials, characteristics of the physiological effects of hydrogen on humans.

For citation: Reutskii A.S. Analysis of properties, characteristics and features of hydrogen in gas and liquid phases to ensure safe sea transportation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 61–76. EDN KCVCWR. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире происходит активный поиск решения проблемы выбора экологически чистого источника энергии [1, 2], и одной из немногих концепций, способных объединить новую экологически чистую энергетику и транспорт, является использование водорода в качестве универсального экологически чистого энергоносителя. В отличие от известных на сегодняшний день альтернативных источников энергии [3], сырьевая база водорода практически безгранична: на Земле водород занимает второе место по количеству атомов (~17 %) после кислорода (~52 %) и девятое (~1 %) по массе — среднее содержание водорода в земной коре составляет 1,4 г/кг [4]. Дополнительной причиной пристального интереса к водороду как источнику энергии заключается в том, что некоторые процессы преобразования водорода характеризуются экологической чистотой и эффективностью. Из всех известных видов топлив водород имеет наибольшую весовую энергоёмкость (рис. 1) и содержит больше энергии на единицу массы, чем любое ископаемое топливо [5]. Несмотря на очевидные преимущества применения водорода в качестве топлива, его всегда сдерживали трудности, связанные с получением экологически и химически чистого водорода и его последующим хранением.

Получение водорода в качестве целевого продукта требует значительных затрат энергии, ведь лишь $\sim 5 \times 10^{-5}$ водорода содержится в атмосфере в виде простого вещества. В настоящий момент более 80 % промышленного водорода получают паровой конверсией метана, содержащегося в природном газе или легких фракциях нефти [6, 7].

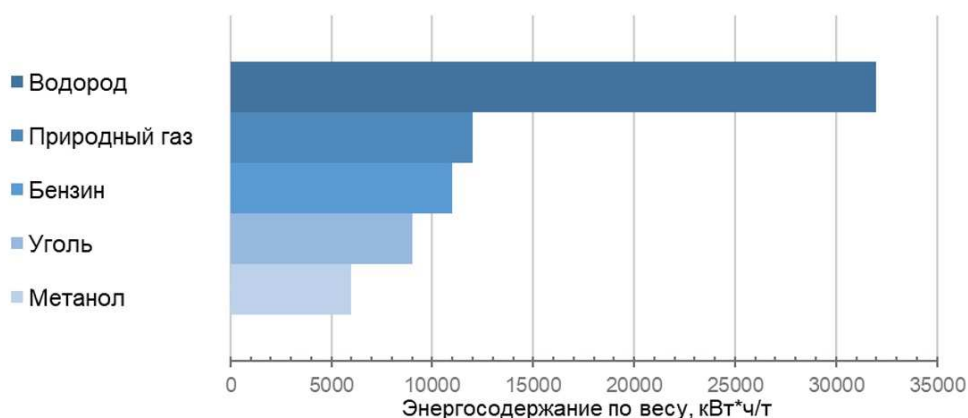


Рис. 1. Весовое энергетическое содержание различных видов топлив

Чистота получаемого этим способом водорода составляет 95–98,5 %, в качестве примесей присутствуют метан, CO и CO₂. Помимо того, что такой способ получения водорода противоречит концепции всеобщей декарбонизации [8], использование продукта с такой чистотой зачастую недопустимо. Для очистки получившихся в результате паровой конверсии смесей применяют абсорбционные установки, а также различные катализаторы [9, 10]. В настоящий момент лишь электролиз воды является основным промышленным способом получения водорода с чистотой 99,9 % и выше [11]. Любой рассмотренный метод получения водорода характеризуется большими затратами электроэнергии. Например, для электролиза необходима энергия для прохождения тока через электролит, а также при трансформации переменного тока в постоянный. При получении 1 м³ водорода электролизная установка расходует ~4–5 кВт·ч электроэнергии, что примерно в три раза дороже, чем производство эквивалентного по теплотворной способности количества бензина. Общий КПД электролизного способа не превышает 40–45 %. Из-за высокой стоимости производства доля электролизного водорода в его совокупном производстве на сегодняшний день не превышает 4–5 % [4, 12].

Помимо значительных затрат энергии, необходимых для производства водорода, одной из ключевых задач в рамках создания водородной энергетики является решение проблемы определения экономически целесообразного способа его хранения и транспортировки на большие расстояния. Как показано в статье [13], существует несколько способов транспортировки водорода водным транспортом: в виде аммиака при помощи газовоза LPG; в виде метанола, в соединенном с жидким органическим носителем (например, дибензилтолуолом) состоянии при помощи танкера, в сжиженном и сжатом виде на специализированных газовозах LH₂ и CGH₂ соответственно.

В настоящий момент существует множество концептуальных проектов судов LH₂ и даже одно построенное судно — Suiso Frontier [14] (рис. 2). Таким образом, технология хранения и транспортировки сжиженного водорода в настоящий момент наиболее освоена, и именно ей будет посвящена тема этого исследования.

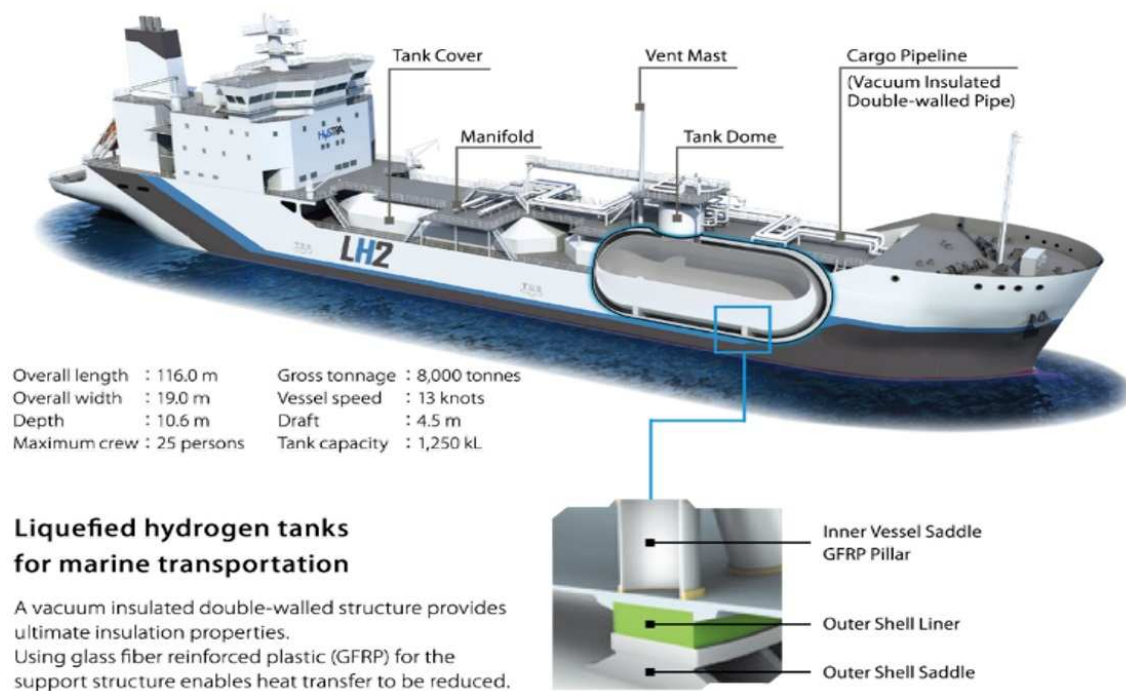


Рис. 2. Газовоз для транспортировки сжиженного водорода Suiso Frontier

Водный транспорт традиционно является одним из наиболее востребованных способов транспортировки грузов на значительные расстояния, по этой причине исследование вопроса безопасного хранения и транспортировки жидкого низкотемпературного водорода на борту судна является актуальным. Водный транспорт относительно других видов транспорта характеризуется высоким удельным соотношением перевозимого за рейс тоннажа к потраченному за рейс топливу, однако низкая скорость движения и значительная протяженность транспортных маршрутов увеличивает время доставки и, соответственно, хранения груза. Хранящийся при низкой температуре водород неизбежно получает тепло извне и, нагреваясь, меняет свое агрегатное состояние, что может послужить причиной возникновения серьезных последствий для безопасности судна, экипажа и специального персонала, а также окружающей среды.

Таким образом, актуальным становится исследование физико-химических свойств водорода, выявление основных опасностей и способов уменьшения вероятности их возникновения или смягчения последствий их возникновения (митигации) [15, 16] при хранении и транспортировке водорода в сжиженном состоянии как наиболее эффективно использующем полезную грузоподъемность транспортного судна. К числу решаемых в исследовании задач относятся: анализ исследований и нормативов по свойствам водорода в различных агрегатных состояниях, изучение его химических свойств и характера его влияния на материалы. Дополнительно выполнен анализ физиологического воздействия водорода на организм человека, выделение категорий рисков, и предложены меры митигации для безопасных систем хранения и транспортировки LH_2 на судах.

1. АНАЛИЗ СВОЙСТВ, ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДОРОДА В ГАЗОВОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

1.1 Физические характеристики различных агрегатных состояний водорода

Водород представляет собой самый легкий и часто встречающийся элемент во вселенной. При нормальных условиях (273 К (0°C) и 101,325 кПа) он представляет собой бесцветный, безвкусный, нетоксичный, неокислительный, неметаллический двухатомный газ, который при нормальных условиях не представляет угрозы для здоровья человека. Одной из наиболее важных особенностей водорода является его низкая плотность, которая создает трудности при его использовании и в большинстве технологических процессов вызывает необходимость в его сжатии или сжижении. Это свойство водорода наглядно показано на диаграмме зависимости плотности водорода от давления, представленной на рис. 3 [17].

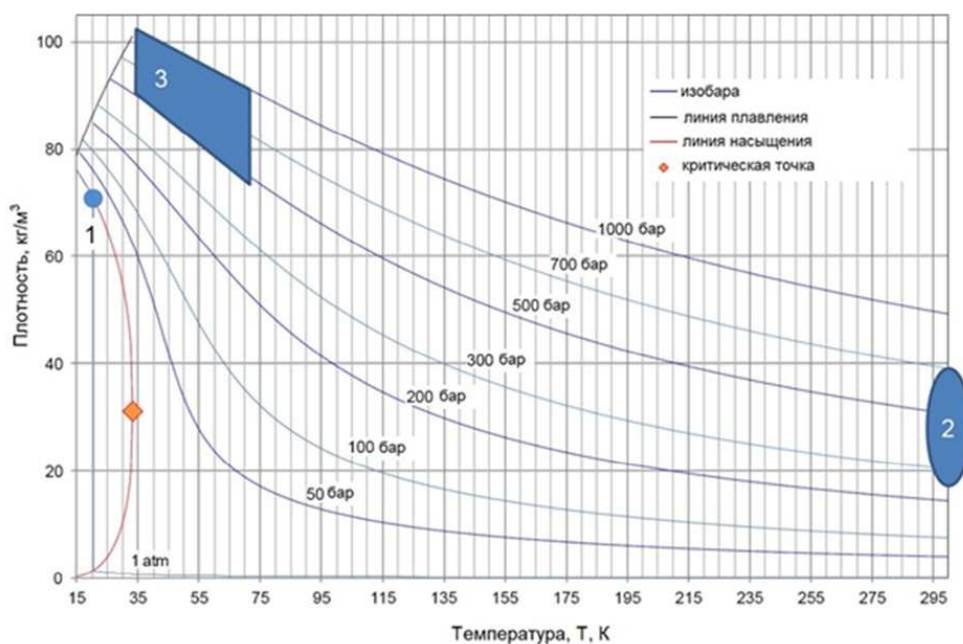


Рис. 3. Плотность водорода в зависимости от его давления [17]:

1 — жидкий водород при ≈ 20 К ($-253,15$ °C); 2 — сжатый газ при ≈ 300 К ($26,85$ °C); 3 — криогенный сжатый газ

Водород ведет себя как идеальный газ в широком диапазоне температур и давлений, но при значительном сжатии или охлаждении он начинает вести себя как реальный газ. Такое его поведение описывается уравнением Соаво–Редлиха–Квонга [18]:

$$p = \frac{RT}{V_{\text{мол}} - b} - \frac{a \cdot \alpha}{V_{\text{мол}}(V_{\text{мол}} + b)}, \quad (1)$$

где $a = 0,42747(R^2 T_{\text{кр}}^2)/p_{\text{кр}}$; $b = 0,08664(RT_{\text{кр}})/p_{\text{кр}}$; для водорода $\alpha = \alpha(T_{\text{пр}}) = 1,202 \exp\{-0,30288T_{\text{пр}}\}$;
 p — давление, Па;
 T — абсолютная температура, К;
 V_m — молярный объем, м³/моль;
 $R = 8,3145$ Дж/(моль·К) — газовая постоянная;
 $T_{\text{пр}} = T/T_{\text{кр}}$ — приведенная температура, К;
 $T_{\text{кр}} = 33,25$ — критическая температура, К;
 $p_{\text{кр}} = 1,297$ МПа — критическое давление водорода.

Фазовая диаграмма водорода. Тройная точка водорода на его фазовой диаграмме (рис. 4) характеризуется температурой 13,8 К (–259,35 °С) и давлением 7,2 кПа. В этой точке, то есть при сочетании характерных для нее параметров температуры и давления, все три состояния вещества находятся в равновесии. При росте давления выше точки кипения вещество достигает критической точки ($T_{\text{кр}} = 33,15$ К (–240 °С) и $p_{\text{кр}} = 1,296$ МПа) с плотностью $\rho_{\text{кр}} = 31,4$ кг/м³.

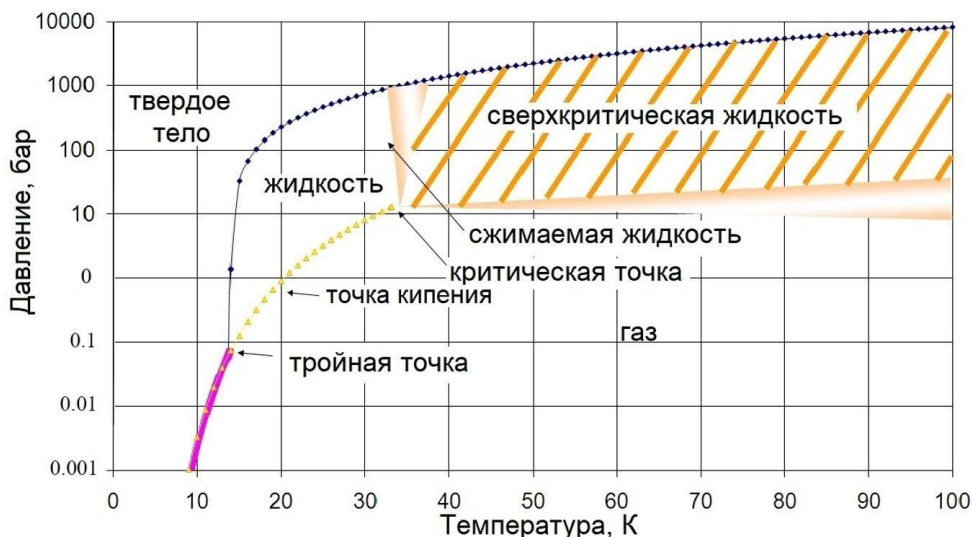


Рис. 4. Фазовая диаграмма водорода [19]

Газообразный водород GH_2 (газ). Водород в своей газообразной форме отличается высокой диффузионной способностью, он значительно легче воздуха в температурном диапазоне выше 22 К (–251,15 °С), то есть практически во всем диапазоне температур в своей газообразной форме и при атмосферном давлении. Ввиду своей исключительной диффузионной способности водород после разлива моментально смешивается с воздухом. Из-за своей малой молекулярной массы и низкой вязкости водород может создавать проблемы, связанные с его склонностью к утечке. Диффузия водорода возможна даже через неповрежденные материалы, в частности органические. Скорость утечки в 50 раз выше, чем у воды, и в 10 раз выше, чем у азота.

Сжиженный водород LN_2 (жидкость). При нормальном давлении (1 атм = 101,325 кПа) и температуре кипения (20,3 К = –252,85 °С) водород имеет плотность 70,8 кг/м³, что значительно выше, чем у водорода в газообразной форме (0,08987 кг/м³) при нормальных условиях (273 К (0°С) и 101,325 кПа). Сжижение водорода позволяет уменьшить занимаемый им объем в 845 раз по сравнению с газообразным состоянием, поэтому водород часто хранят и перевозят именно в сжиженном состоянии (Liquefied Hydrogen, далее — LN_2). LN_2 на диаграмме на рис. 3 соответствует температуре кипения при атмосферном давлении и обозначен цифрой 1. Однако даже в сжиженном состоянии плотность водорода намного меньше плотности воды, поэтому при разливе LN_2 на воду он будет «растекаться» по ее поверхности.

В отличие от невидимых утечек газообразного водорода, существующего при н.у., утечка жидкого водорода (LH_2) или переохлажденного газообразного водорода обычно приводит к образованию видимого водяного тумана (рис. 5). Добавление одоранта или красителя могли бы облегчить обнаружение небольших утечек газообразного водорода, если бы они не замерзали, будучи растворенными в LH_2 , из-за его низкой температуры.



Рис. 5. Видимый водяной туман в воздухе при утечке LH_2 [9]

При хранении LH_2 в замкнутом объеме существует опасность возникновения теплопритоков. При нагреве от точки кипения до нормальной температуры водород расширяется в 845 раз. Это может привести к значительному увеличению давления в замкнутом объеме хранения сжиженного водорода. Теоретическое исследование [20] показало, что в замкнутом объеме, полностью заполненном LH_2 , конечное давление после разогрева водорода до 300 К (26,85 °С) повысилось до значения в 172 МПа, что на практике может привести к повреждению и нарушению герметичности системы хранения.

Шугообразный водород SLH_2 (смесь жидкого и твердого). Снижение температуры ниже точки кипения водорода приводит к образованию шугообразного (смеси жидкого и твердого) водорода (Slush hydrogen — SLH_2). По сравнению с жидким, шугообразный водород имеет большую плотность (на 16 % выше, чем у сжиженного) и теплоемкость (на 18 % выше, чем у сжиженного), а также меньшую испаряемость [21], так как это вещество в твердой фазе поглощает тепло во время плавления. Шугообразный водород используется в качестве ракетного топлива и рассмотрение его как варианта транспортировки морским транспортом нецелесообразно из-за довольно узкого диапазона его температуры и давления, при которых он существует, и технических сложностей при их обеспечении.

Сверхкритический и металлический водород. Водород также имеет сверхкритическое криогенное состояние, характеризующееся более высокой плотностью, которая обусловлена сочетанием высокого давления и низкой температуры (цифра 3 на диаграмме на рис. 3). При нагреве жидкости до значений температуры, превышающих критическую, ее становится невозможно сжижать при помощи давления. При этом при приложении давления образуется однофазная сверхкритическая жидкость (рис. 4). В зависимости от температуры и давления в сверхкритическом состоянии теплофизические свойства криогенного водорода в околкритической области изменяются. В сверхкритическом состоянии водород обладает характеристиками, которые делают его похожим одновременно на газ и жидкость: он сжимаем и легко диффундирует через материалы, при этом имеет плотность как у жидкости и может растворять в себе материалы. Дополнительно стоит отметить, что советские исследователи предсказали возможность существования еще одной формы водорода — металлической [22], а современные исследования частично подтвердили эту теорию [23–25]. Некоторые исследователи заявляли о лабораторном получении металлического водорода, однако повторное воспроизведение экспериментов на сегодняшний день не дало ожидаемого результата.

Сверхкритическое и металлическое состояния водорода являются предметом изучения современной физики. Отсутствие потребности в характерных для этих состояний свойствах водорода при его транспортировке объясняет, почему подобные его состояния должны остаться за рамками данного исследования.

Изомерные формы водорода. Водород существует в двух изомерных формах, отличающихся своим энергетическим состоянием: ортоводороде (далее — $o\text{-H}_2$) и параводороде (далее — $p\text{-H}_2$). Обычный водород при нормальной температуре представляет собой смесь, состоящую на $\frac{3}{4}$ из ортоводорода и на $\frac{1}{4}$ из параводорода. Молекула водорода состоит из двух протонов и двух электронов. В молекуле ортоводорода протоны вращаются в одну сторону, а в молекуле параводорода — в разные (рис. 6а). Разница в энергетическом состоянии атома водорода возникает, когда спины двух протонов молекулы водорода либо параллельны ($o\text{-H}_2$), либо противонаправлены ($p\text{-H}_2$). Направление спинов их протонов зависит от температуры (рис. 6б) [26]. При очень низких температурах большинство молекул водорода будет обладать лишь кинетической энергией, и ротационная теплоемкость (часть теплоемкости, затрачиваемой на вращательное движение) будет равна нулю (параводород — $p\text{-H}_2$), при этом по мере повышения температуры часть внутренней энергии пойдет на вращательное движение, и такие молекулы преобразуются в ортоводород ($o\text{-H}_2$).

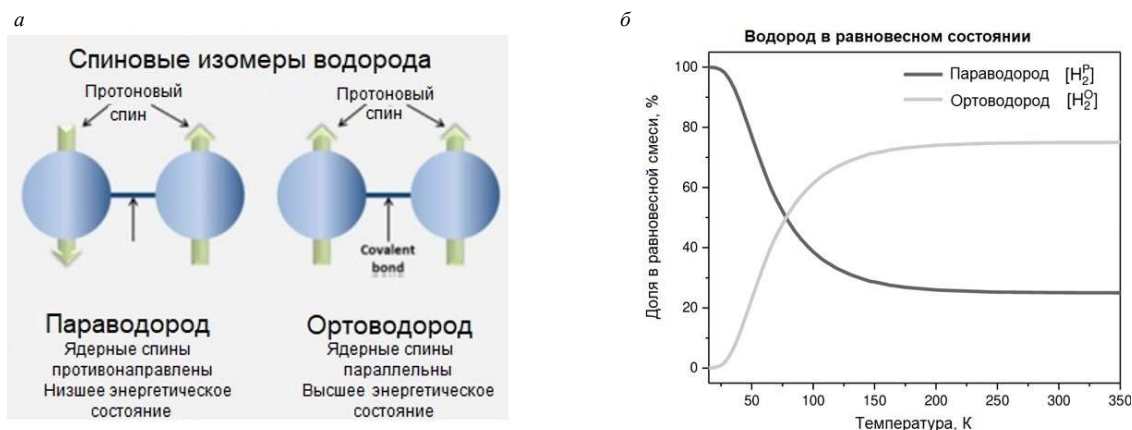


Рис. 6. Спиновые изомеры водорода (а), доля параводорода и ортоводорода в равновесной смеси в зависимости от температуры (б)

Таким образом, при понижении температуры с течением времени водород будет обогащаться параводородом и наоборот [27]. При температурах менее 80 К ($-193,15\text{ }^\circ\text{C}$) $p\text{-H}_2$ является более стабильной формой атома водорода, а при температуре 20 К ($-253,15\text{ }^\circ\text{C}$) концентрация $p\text{-H}_2$ составляет 99,825 %, а концентрация $o\text{-H}_2$ в равновесной смеси 0,175 % (рис. 6б). Переход от ортоводорода к параводороду в отсутствие катализатора происходит в течение 3–4 дней до достижения равновесного состояния. Присутствие катализатора способно ускорить процесс перехода до нескольких часов. При этом охлаждение водорода, сжижение или даже затвердевание при 14 К не приводит к равновесию в том смысле, что соотношение концентраций $o\text{-H}_2$ и $p\text{-H}_2$ остается таким же (3:1), как в обычном газообразном водороде, и на переход « $o\text{-H}_2 \rightarrow p\text{-H}_2$ » потребуется время. Превращение ортоводорода в параводород является экзотермической реакцией, сопровождающейся выделением тепла (270 кДж/кг при 293,15 К ($20\text{ }^\circ\text{C}$)), количество которого увеличивается с понижением температуры водорода вплоть до 77 К ($-196,15\text{ }^\circ\text{C}$), ниже которых она приобретает постоянное значение 523 кДж/кг. Выделяющаяся теплота при преобразовании ортоводорода в параводород превышает теплоту испарения/конденсации (446 кДж/кг при той же температуре), что означает, что обычный LH_2 способен полностью испаряться даже в идеально изолированном сосуде. Это явление имеет название «орто-параконверсия» — переход молекулярного водорода из одной спиновой формы в другую (из ортоводорода в параводород), сопровождается выделением тепла [28: п. 3.22].

По этой причине основная проблема безопасности при хранении LH_2 представляет собой фазовый переход внутри системы хранения из-за присутствия в смеси ортоводорода ($o\text{-H}_2$). Таким образом, после производства жидкий водород находится в метастабильном состоянии и должен быть преобразован в стабильную (параводородную) форму, чтобы избежать спонтанной экзотермической реакции его превращения, приводящей к самопроизвольному испарению полученного жидкого водорода. Более подробную информацию о состояниях водорода можно найти в исследованиях [29] и [27]. По этой причине стандарт [30] предъявляет требования к 98%-ному содержанию параводорода в топливном водороде.

1.2. Химические характеристики водорода

Водород является химически активным элементом и взаимодействует с большинством других веществ. В соединении с кислородом водород становится взрывоопасным в широком диапазоне концентраций. Бесцветное и бездымное горение воздушно-водородной смеси сопровождается образованием водяного пара и значительного количества тепловой энергии (286 кДж/моль). Стехиометрическая воздушно-водородная смесь содержит 29,5 % водорода. Область воспламенения для водородно-воздушной смеси составляет 4–75 % и 4–95 % для смеси водорода с чистым кислородом. При росте температуры значение нижнего концентрационного предела воспламенения (далее — НКПР) смеси снижается, а значение верхнего концентрационного предела воспламенения (далее — ВКПР) смеси повышается.

НКПР представляет собой более важный параметр, так как при утечке водорода он достигается в первую очередь. Влияние на него температуры исследовано в [31] и представлено в виде зависимости:

$$c_{\text{НКПР}} = 4 - 0,013 \cdot (T - 300), \text{ \%об.}, \quad (2)$$

где $150 \leq T \leq 300$ — абсолютная температура, К.

Для только что испарившегося водорода в точке его кипения ($20,28 \text{ К} = -252,87$) НКПВ составляет 7,7 %. Зависимость для определения ВКПР исследована в [32] и может быть представлена в виде зависимости:

$$c_{\text{ВКПР}} = 74 - 0,026 \cdot (T - 300), \text{ \%об.}, \quad (3)$$

где $150 \leq T \leq 300$ — абсолютная температура, К.

Данные, приведенные в исследованиях [31, 32], дополняются исследованием [33], значительно расширившим диапазон рассматриваемой температуры:

$$c_{\text{НКПР}} = c_{\text{НКПР}_{T_0}} \cdot [1 - K_{\text{Н}} \cdot (T - T_0)], \text{ \%об.}, \quad (4)$$

где $c_{\text{НКПР}_{T_0}} = 4,1$ моль;

$$K_{\text{Н}} = 0,00157 \text{ К}^{-1};$$

$295 \leq T \leq 660$ — абсолютная температура, К;

$$T_0 = 273,15 \text{ К (0 } ^\circ\text{C)}.$$

$$c_{\text{ВКПР}} = c_{\text{ВКПР}_{T_0}} \cdot [1 - K_{\text{В}} \cdot (T - T_0)], \text{ \%об.}, \quad (5)$$

где $c_{\text{ВКПР}_{T_0}} = 74,5$ моль;

$$K_{\text{В}} = 0,00044 \text{ К}^{-1};$$

$295 \leq T \leq 660$ — абсолютная температура, К;

$$T_0 = 273,15 \text{ К (0 } ^\circ\text{C)}.$$

Более точные экспериментальные данные [44] дают следующие зависимости для НКПР и ВКПР:

$$c_{\text{НКПР}} = 4,64 - 0,0067 \cdot T, \text{ \%об.}, \quad (6)$$

где $123,15 \leq T \leq 673,15$ — абсолютная температура, К.

$$c_{\text{ВКПР}} = 73,8 + 0,033 \cdot T, \text{ \%об.}, \quad (7)$$

где $213,15 \leq T \leq 73,15$ — абсолютная температура, К.

Зависимости НКПР и ВКПР из различных исследований представлены на рис. 7а, б.

Водородо-воздушная смесь имеет относительно высокую температуру воспламенения в 858 К (584,85 °С), однако минимальная энергия воспламенения стехиометрической смеси составляет всего 0,02 мДж, что намного меньше, чем у смесей углеводородов с воздухом. Недавние исследования были посвящены измерению минимальной энергии воспламенения при криогенных температурах [35]. Для воспламенения стехиометрической смеси водорода и воздуха достаточно слабой искры или электростатического разряда, накапливающегося на поверхности человеческого тела (энергия ≈ 10 мДж). Минимальная энергия воспламенения еще больше уменьшается с повышением температуры, давления или содержания кислорода в смеси.

Газы, содержащие углерод, помимо водяного пара и углекислого газа при сгорании выделяют не до конца сгоревший углерод (сажу). Сажа является инфракрасным излучателем, благодаря ей появляется видимое пламя. Источником теплового излучения в узком инфракрасном диапазоне, испускаемом при сжигании водорода, является водяной пар внутри водородного пламени. Коэффициент излучения водяного пара сравнительно низок ($\epsilon < 0,1$) и, несмотря на высокую температуру горения ($2318 \text{ К} = 2044,85$ °С),

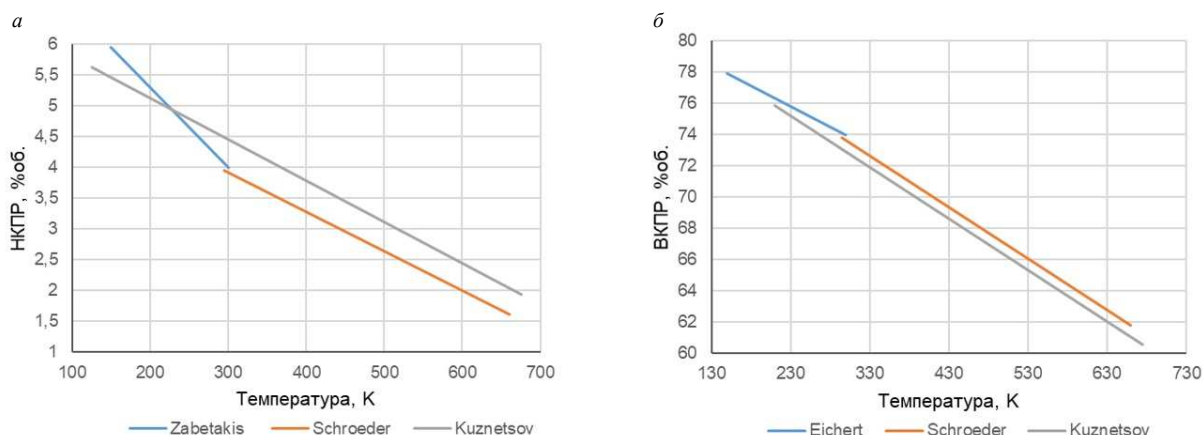


Рис. 7. НКПР и ВКПР смеси водорода и воздуха в зависимости от температуры

радиационная опасность от водородного пламени по сравнению с другими видами топлива невелика. По этой причине водородное пламя не видно даже в затемненном помещении, поэтому водородный пожар трудно распознать и локализовать, и это является серьезной проблемой.

Скорость горения водорода в воздухе при стехиометрических условиях окружающей среды составляет 2,37 м/с, достигая максимума в 3,46 м/с при концентрации 42,5 %. Из-за быстрой химической кинетики водорода и его высокого коэффициента диффузии это самый высокий показатель в сравнении с другими углеводородными топливоздушными смесями (например, у воздуха с метаном — 0,43 м/с). Скорость фронта пламени для водорода составляет около 24 м/с. Скорость турбулентного горения значительно выше и достигает нескольких сотен м/с из-за турбулентности и нестабильности пламени, которые увеличивают как передачу энергии, так и поверхность распространения пламени. Большинство реальных видов пламени являются турбулентными. Такая сравнительно высокая скорость горения увеличивает вероятность детонации. Диапазон детонации обычно составляет 18–59 % об. водорода по воздуху, однако был достигнут [36] более низкий предел детонации, составляющий всего 12,5 % по объему. Скорость детонации достигает значений в диапазоне 2000 м/с.

Для наземных хранилищ сжиженного водорода LH_2 необходимо учитывать, что холодный газообразный водород менее летуч по сравнению с воздухом и, следовательно, более подвержен образованию горючей смеси с ним. Кроме того, LH_2 при непосредственном контакте с окружающим воздухом быстро загрязняется из-за конденсации и затвердевания (замерзания) компонентов воздуха. Твердые частицы замерзших компонентов воздуха могут привести к закупорке клапанов сброса давления, вентиляционных отверстий или фильтров. Кроме того, из-за различных температур кипения азота (77,3 К (–195,85 °С)) и кислорода (90,2 К (–182,95 °С)) при охлаждении кислород конденсируется первым и при нагревании испаряется последним. Конденсат, обогащенный кислородом, всегда образует взрывоопасные смеси. Кроме того, жидкий или твердый кислород в сочетании с другим горючим материалом, даже если он твердый и, следовательно, не «воспламеняющийся», может образовывать взрывоопасные смеси с резко сниженной энергией воспламенения. Примерами могут служить LH_2 плюс твердый воздух с содержанием $\text{O}_2 > 40\%$ или жидкий кислород, пролитый на асфальт [31].

2. ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Водородное охрупчивание. Давно известно, что водород оказывает вредное воздействие на некоторые металлы, изменяя их физические свойства. В основном это связано с присутствием атомов водорода, растворенных в металлической сетке и накапливающихся в нарушенных областях кристаллической решетки. Водород, диффундирующий в кристаллической решетке металла, способен взаимодействовать с различного рода дефектами, содержащимися в реальных твердых телах [37]. Реальные твердые тела никогда не обладают однородной структурой; обычно они содержат широкий набор дефектов (несплошностей). Важным обстоятельством является тот факт, что водород, растворяющийся в металле, существенным образом изменяет его микроструктуру. Таким образом, водородное повреждение представляет собой поглощение атомарного водорода сталью. Это явление вызвано, с одной стороны, неоднородностью структуры стали,

а с другой стороны — способностью водорода легко диффундировать через нее. При температуре окружающей среды атомарный водород чаще всего образуется как побочный продукт реакции коррозии. Однако он также может образоваться вследствие диссоциации молекулярного водорода, как показано на рис. 8а.

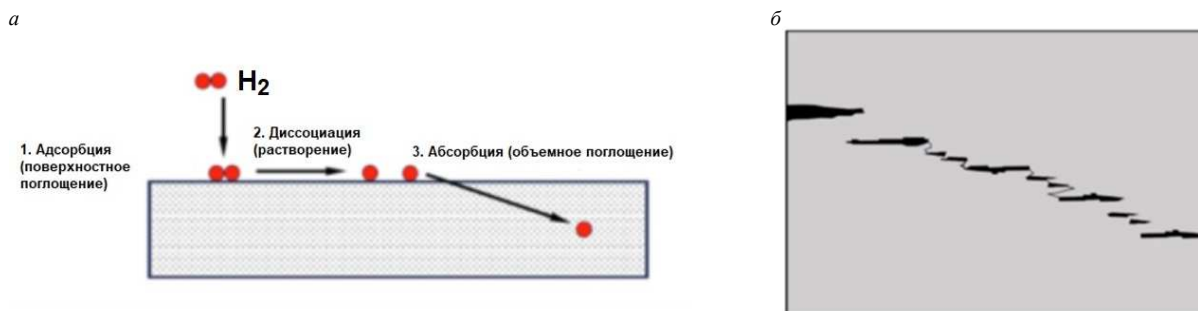


Рис. 8. Механизм объемного поглощения (абсорбции) газообразного водорода сталью (а), схематическая иллюстрация ступенчатого растрескивания НИС (б)

В идеальном случае водород, поглощенный сталью, проникал бы сквозь конструкцию и в конечном итоге выходил в атмосферу. Однако в стали присутствуют несплошности и различные дефекты (включения). Диссоциирующий водород оказывается запертым «в ловушке» в этих кавернах, где он начинает образовывать молекулярный водород H₂, тем самым создавая огромное внутреннее давление в стали полостей (каверн), в результате чего образуются микротрещины. В этом случае, если сталь имеет высокую плотность включений, микротрещины могут сливаться и расти, что приводит к явлению, известному как ступенчатое растрескивание, обычно называемое водородным растрескиванием (hydrogen induced cracking — НИС). В этом случае материал будет безвозвратно поврежден, как это показано на рис. 8б.

Проблема ступенчатого растрескивания усугубляется охрупчивающим действием водорода на сталь. При наличии в ней водорода сталь будет демонстрировать пониженную пластичность и ударную вязкость, что, в зависимости от ее микроструктуры, может привести к появлению других механизмов разрушения материала. Эти механизмы обычно называются водородным растрескиванием под напряжением (hydrogen stress cracking — HSC) и возникают в результате присутствия водорода в металле вместе с растягивающим напряжением (остаточным и/или приложенным).

Таким образом, двумя основными факторами, определяющими устойчивость материала к повреждению водородом, являются микроструктура и химический состав. Если сталь в процессе эксплуатации насыщается водородом, то единственным средством снижения риска водородного повреждения является контроль ее микроструктуры и ограничение действующих на нее напряжений.

Влияние низкой температуры сжиженного водорода на материалы емкости для хранения. Помимо эффекта водородного охрупчивания, существует дополнительное воздействие на конструкционные материалы при криогенных температурах, являющееся причиной большинства отказов криогенной техники. Напряжение, которое способен выдерживать конструкционный материал, определяется его пластичностью (рис. 9). Материал считается пластичным, если после деформации под воздействием напряжения он возвращает свою первоначальную форму и объем, как только напряжение снимается. На диаграмме деформирования этот отрезок графика называют зоной упругой деформации, на нем изменение размеров и форм образца прямо пропорционально приложенному напряжению. При определенном значении деформации материал сохранит свою форму, это состояние образца называется пластической деформацией, оно наступает, когда приложенное напряжение превышает предел текучести материала. При дальнейшем увеличении деформации достигается предельное напряжение, после которого напряжение неуклонно уменьшается вплоть до разрыва образца. Хрупкий материал не пластичен, не имеет ни зоны упругой, ни зоны пластической деформации и разрушается при достижении предела прочности.

С понижением температуры у большинства металлов увеличивается предел текучести и предельное напряжение, что, как правило, связано с соответствующим снижением ударной вязкости. Свойства материала могут измениться с пластичных на хрупкие, как только температура упадет ниже так называемой «температуры нулевой пластичности». Эта температура не является фиксированной величиной и для одного и того же материала может изменяться в зависимости от его предшествующей термической или механической обработки, а также от его состава. Это минимальная температура, при которой конструкционный материал считается полезным, и для некоторых материалов она может быть значительно выше температуры сжиженного водорода. Для разрушения некоторых материалов при криогенной температуре достаточно



Рис. 9. Диаграмма деформирования [19]

небольшого напряжения, приложение которого приведет к их почти мгновенному разрушению. Этот эффект является особой проблемой для криогенного оборудования, подверженного периодическим температурным изменениям. Компоненты криогенной системы обычно подвергаются перепаду температуры, некоторые из них во время фаз охлаждения или нагрева, другие — даже в стационарном режиме работы. Сильные перепады, особенно нелинейные, приводят к образованию внутренних напряжений, которые могут привести к разрушению.

Низкие температуры также могут влиять на материалы, вызывая термическое сжатие, вызывая большие термические напряжения, если система не может приспособиться к различному термическому сжатию материалов, из которых она состоит. Коэффициент теплового расширения материала зависит от температуры. Для многих материалов, охлажденных до криогенных температур, более 90 % общего сжатия происходит до значений температуры в 77 К. Коэффициент теплового расширения составляет приблизительно 0,3 % для сплавов на основе железа, 0,4 % для алюминия и более 1 % во многих пластмассах [20, 38]. Криогенные сосуды или трубопроводы должны конструктивно учитывать это тепловое расширение путем использования материалов с достаточно высокой прочностью и пластичностью, успешно работающих при низких температурах, таких как алюминий и большинство его сплавов, медь и ее сплавы, никель и некоторые его сплавы, а также аустенитные нержавеющие стали. Для многих материалов удельная теплоемкость сильно зависит от температуры ниже 200 К, что свидетельствует о том, что при криогенных температурах для повышения температуры тела требуется гораздо меньше тепла, чем при температуре окружающей среды. Пример: теплоемкость алюминия снижается примерно с 950 Дж/(кг·К) при температуре окружающей среды до менее чем 10 Дж/(кг·К) при температуре 20 К.

В наиболее общем виде требования к материалу для изготовления оборудования для обращения чистого водорода в различных его агрегатных состояниях сводятся к способности выдерживать нагрузки и давления, возникающие при их нормальной эксплуатации, и быть невосприимчивым ко всем видам водородного охрупчивания и растрескивания.

3. ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА ФИЗИОЛОГИЮ ЧЕЛОВЕКА

Газообразный водород является нетоксичным веществом. С точки зрения современной медицины водород полезен [39, 40] и оказывает антиоксидантное [41, 42] и противовоспалительное [43, 44] действие.

Однако испарение выделяющегося жидкого водорода влияет на состав атмосферы, особенно в полностью или частично замкнутых пространствах, что создает риск удушья. Действие водорода проявляется в высоких концентрациях, вызывая удушье вследствие уменьшения нормальной для организма человека концентрации кислорода в воздухе [45]. При вдыхании высоких концентраций проявляются характерные признаки удушья: головокружение, головная боль, сонливость, нарушение координации движений, в тяжелых случаях — потеря сознания. Процесс испарения разлива LH_2 в сочетании с конденсацией O_2 из окружающего воздуха и

горением легковоспламеняющихся смесей H_2 и воздуха приводит к значительному разрежению местной атмосферы. Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США (далее — НАСА) [38] считает, что объемная доля кислорода менее 19,5 % опасна для человека, менее 8 % может привести к летальному исходу в течение нескольких минут (табл. 1). Уровень срабатывания на датчиках газоанализа обычно устанавливается на 19%-ном содержании кислорода в атмосфере.

Таблица 1

Влияние на организм человека уменьшения содержания кислорода

Содержание кислорода в воздухе, %	Симптомы
≈ 21–19	Отсутствуют
≈ 19–15	Снижение скорости реакции, без видимых проявлений
≈ 15–12	Одышка, учащенное сердцебиение, нарушение внимания или координации
≈ 12–10	Головокружение, потеря логического мышления, нарушение координации, быстрая утомляемость, синие губы
≈ 10–8	Тошнота, рвота, утрата возможности движения, потеря сознания с последующим летальным исходом
≈ 8–6	Повреждение мозга в течение 4–8 минут, летальный исход через 8 минут
<6	Кома через 40 секунд, нарушение дыхания с последующим летальным исходом

Прямой контакт с жидким водородом или с поверхностями при очень низкой температуре вызывает криогенные ожоги, похожие на термические. Живые ткани замерзают, за исключением очень коротких периодов контакта, когда разница температур между криогенной жидкостью и кожей все еще высока (режим пленочного кипения), а теплоперенос мал. Примерзание кожи к холодной поверхности может привести к серьезным повреждениям: длительное воздействие холодного водорода на кожу может привести к обморожению. Симптомом является кратковременная локальная боль. Замороженные ткани безболезненны и имеют воскообразный, бледно-беловатый или желтоватый оттенок. Оттаивание замороженной ткани может вызвать сильную боль, может возникнуть шок. Длительное вдыхание холодных паров может привести к серьезному повреждению легких. Глаза особенно чувствительны к холоду. Длительное воздействие низких температур после крупного разлива приводит к снижению температуры тела, что приводит к переохлаждению, дисфункции органов и угнетению дыхания [20]. Утечка и/или аварийный выброс жидкого водорода не представляет существенной опасности для окружающей среды, поскольку водород не токсичен и не обладает парниковым эффектом.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены физико-химические свойства водорода в газообразном, жидком и шугообразном состоянии. Представлена фазовая диаграмма водорода, описаны возможные состояния водорода, в том числе сверхкритическая жидкость и металлический водород. Рассмотренные характеристики должны учитываться при проектировании систем хранения для обеспечения безопасной транспортировки водорода. В результате проведенного исследования следует выделить фундаментальные опасности, напрямую связанные с его физико-химическими характеристиками, присущие сжиженному водороду, разделив их на категории рисков.

Криогенные опасности. Сюда входят:

- холодовые травмы персонала при контакте с LH_2 (-253 °C) из-за неподходящих СИЗ;
- низкотемпературное охрупчивание материалов — потеря пластичности и растрескивание материалов (в частности, металлов) при криогенных температурах;
- водородное охрупчивание — проникновение водорода в металл, приводящее к снижению прочности и хрупкому разрушению;
- термическое сжатие — значительные напряжения в трубопроводах и конструкциях из-за их экстремального охлаждения.

Пожароопасность. Сюда входят:

- широкие пределы воспламеняемости водорода по воздуху (от 4 % до 75 %), что облегчает образование взрывоопасной атмосферы даже при малых утечках;
- невидимое пламя при горении водорода в воздухе (при дневном свете), что затрудняет обнаружение пожара;
- легкое воспламенение от электростатических разрядов;

- образование взрывчатых смесей с кислородом, когда при утечке LH_2 может происходить конденсация воздуха, образуя чувствительные к ударам смеси с обогащенным кислородом;

- риск взрывных явлений — теоретический риск BLEVE (взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости), RPT (быстрый фазовый переход) и DDT (переход дефлаграции в детонацию) в замкнутых и заставленных пространствах (машинное отделение).

Технологические и конструкционные опасности. Сюда относятся:

- ненадежность вакуумных систем изоляции: разрыв или отказ вакуумной системы приводит к резкому росту теплопритока и давления;

- проницаемость и утечки: высокая проникающая способность водорода требует особых материалов сварки и уплотнений, а быстрое рассеивание утечек создает риск в плохо вентилируемых зонах;

- проблемы с приборами и системами управления из-за конденсации и замерзания газов в приборах, сложности с измерением уровня и количества LH_2 , невидимость пламени для детекторов, необходимость надежной связи «судно — берег» для ESD.

Человеческий фактор и компетенции. Сюда относятся:

- ошибки при морских операциях [46, 47], то есть несоблюдение регламентов из-за недостаточного опыта и процедур;

- недостаточная подготовка экипажа, для повышения ее уровня технология LH_2 требует специального и углубленного обучения, создания симуляторов;

- ограниченность доступа, в том числе к путям эвакуации, то есть трудности с обслуживанием оборудования и эвакуацией в аварийной ситуации, особенно в зонах возможного скопления водорода.

По совокупности опасностей LH_2 представляет собой наиболее тяжелое с точки зрения организации процесса хранения, перегрузки и транспортировки вещество. По этой причине, а также в связи с наибольшей плотностью хранения LH_2 , целесообразно в дальнейших исследованиях рассмотреть опыт использования емкостей для его хранения и методов проведения оценки рисков его хранения и использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJOQTC.
3. Реуцкий А.С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А.С. Реуцкий, В.В. Якимов, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
4. Кузык Б.Н. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б.Н. Кузык, Ю.В. Яковец. — М.: Ин-т эконом. стратегий, 2007. — 398 с.
5. 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. Шурпяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBVVJV.
6. Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ / О.В. Крылов // Российский химический журнал. — 2000. — Т. 44. — С. 19–33.
7. Шварц А.Л. Конверсия метана в технологические газы / А.Л. Шварц, Л.Г. Брук. — М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2012. — 32 с.
8. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата [от 9 мая 1992 г.]. — [Электронный ресурс] URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convru.pdf> (дата обращения 23.12.2025).
9. Бебко Д.А. Исследование влияния электрических параметров водородного генератора на производство водорода и тепловой энергии, применяемой для снижения вязкости нефти и предотвращения АСПО на промышленном оборудовании / Д.А. Бебко, Е.И. Величко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2025. — № 2(386). — С. 14–18. — EDN BPQVUA.
10. Чистофорова Н.В. Исследование установки извлечения водорода из водородсодержащих газов / Н.В. Чистофорова // Современные технологии и научно-технический прогресс. — 2025. — № 12. — С. 123–124. — EDN ZUEZDB.
11. Щеклеин С.Е. Получение водорода и гибридное использование щелочных металлов в технологиях энергетического производства и хранения электрической энергии с применением ЭХГ и ГТУ / С.Е. Щеклеин, А.М. Дубинин, К.Ш. Юзбашиева // Альтернативная энергетика и экология. — 2025. — № 1(430). — С. 159–172. — DOI 10.15518/isjaec.2025.01.159-172. — EDN HXPQCZ.
12. Кулешов Н.В. Электролиз воды как основа водородной энергетики / Н.В. Кулешов, В.Н. Фатеев, А.А. Терентьев // Труды III Междунар. симпозиума по водородной энергетике. — М.: МЭИ, 2009. — С. 122–124.
13. Реуцкий А.С. Сравнительный анализ способов транспортировки водорода морским транспортом по критерию удельной грузоподъемности // А.С. Реуцкий, А.С. Буянов, А.А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 709–725.
14. The Suiso Frontier. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/> (дата обращения 16.06.2025).
15. Реуцкий А.С. Применяемые в морской практике методы оценки рисков / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2025. — № 6. — С. 156–162. — EDN YSSWRR.

16. Семионичев Д.С. Применение формализованной оценки безопасности в качестве инструмента принятия решений с целью обеспечения безопасности морских судов / Д.С. Семионичев, В.К. Шурпак, А.С. Реуцкий // Сборник научных статей Нац. науч.-практ. конф. проф.-преп. состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, 30 сентября — 20 октября 2024 года. Т. 3. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2025. — С. 91–95. — EDN XBGKMS.
17. Klier J. A new cryogenic high-pressure H₂ test area: First results / J. Klier, M. Rattey, G. Kaiser, M. Klupsch et al. // Proceedings of the 12th IIR International Conference, Dresden, September 11–14, 2012. — [Электронный ресурс] URL: https://www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/Artikel/2013/Wasserstoff/cryogenic_high-pressure_H2_test_area.pdf (дата обращения 28.03.2026).
18. Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich — Kwong equation of state / G. Soave // Chemical Engineering Science. — 1972. — Vol. 27. — P. 1197–1203.
19. Verfondern K. Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH₂ safety / K. Verfondern, D. Cirrone, V. Molkov, D. Makarov et al. — 31 March 2021. — (Pre-normative research for safe use of liquid hydrogen (PRESLHY): project deliverable.)
20. Edeskuty F.J. Safety in the handling of cryogenic fluids / F.J. Edeskuty, W.F. Stewart. — New York: Plenum Press, 1996. — (International Cryogenics Monograph Series.)
21. Цуцуран В.И. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив: учебник / В.И. Цуцуран, Н.В. Петрухин, С.А. Гусев. — М.: МО РФ, 1999. — 332 с.
22. Верещагин Л.Ф. Возможность перехода водорода в проводящее состояние / Л.Ф. Верещагин, Е.Н. Яковлев, Ю.А. Тимофеев // Успехи физических наук. — 1975. — Т. 117, № 1. — С. 183–184.
23. Weir S.T. Metallization of fluid molecular hydrogen at 140 GPa (1,4 Mbar) / S.T. Weir, A.C. Mitchell, W.J. Nellis // Physical Review Letters. — 2004. — Vol. 76, No. 11. — P. 1860. — DOI 10.1103/PhysRevLett.76.1860.
24. Deemyad S. The melting line of hydrogen at high pressures / S. Deemyad, I.F. Silvera // Physical Review Letters. — 2008. — Vol. 100, No. 15. — DOI 10.1103/PhysRevLett.100.155701. — arXiv:0803.2321.
25. Knudson M.D. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium / M.D. Knudson, M.P. Desjarlais, A. Becker, R.W. Lemke et al. // Science. — Vol. 348, No. 6242. — 26 June 2015. — P. 1455–1460. — DOI 10.1126/science.aaa7471.
26. Karlsson E. Catalytic ortho- to parahydrogen conversion in liquid hydrogen: Master's thesis / E. Karlsson; Lund University. — 2017.
27. Харитон Ю.Б. О двух модификациях водорода / Ю.Б. Харитон // Успехи физических наук. — 1930. — Т. 10, вып. 1. — С. 95–110.
28. ГОСТ Р 71076-2023 Оборудование криогенное. Системы транспортирования и хранения жидкого водорода. Общие требования к эксплуатации. — 2023.
29. Leachman J. Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen / J. Leachman, R. Jacobsen, S. Penoncello, E. Lemmon // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 2009— Vol. 38. — P. 721–748. — DOI 10.1063/1.3160306.
30. ГОСТ Р 56248-2014 Водород жидкий. Технические условия. — 2019.
31. Zabetakis M.G. Safety with cryogenic fluids / M.G. Zabetakis. — New York: Plenum Press, 1967.
32. Eichert H. et al. Gefährdungspotential bei einem verstärkten Wasserstoffeinsatz: Studie für das Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestags / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). — Stuttgart, 1992.
33. Schroeder V. Explosion characteristics hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures / V. Schroeder, K. Holtappels // [Papers of the International Conference on Hydrogen Safety 2005].
34. Kuznetsov M. Effect of temperature on laminar flame velocity for hydrogen-air mixtures at reduced pressures / M. Kuznetsov, M. Czerniak, J. Grune, T. Jordan // Proceedings of the 5th International Conference on Hydrogen Safety (IChS-5), Brussels, September 9–11, 2013. — Paper 231.
35. Proust C. INERIS research performed within PRESLHY / C. Proust // [Presentation at the] 13th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig, 2020.
36. Breitung W. A model for structural response to hydrogen combustion loads in severe accidents / W. Breitung, R. Redlinger // Nuclear Technology. — 1995. — Vol. 111, No. 3. — P. 420–425.
37. Гельд П.В. Водород и несовершенство структуры металла / П.В. Гельд, Р.А. Рябов, Е.С. Кодес. — М.: Metallurgiya, 1979. — 221 с.
38. NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident. 1986.
39. Биологические эффекты молекулярного водорода и возможности его применения в клинической практике / С.В. Чепур, Н.Н. Плужников, О.Г. Хурцилава, Е.И. Маевский и др. // Успехи современной биологии. — 2017. — Т. 137, № 3. — С. 311–318. — EDN YTMDBF.
40. Рахманин Ю.А. Молекулярный водород: биологическое действие, возможности применения в здравоохранении (обзор) / Ю.А. Рахманин, Н.А. Егорова, Р.И. Михайлова, И.Н. Рыжова и др. // Гигиена и санитария. — 2019. — № 4. — С. 359–365. — [Электронный ресурс] URL: <https://permedjournal.ru/0016-9900/article/view/640192/155528> (дата обращения 09.06.2025).
41. Hong Y. Hydrogen as a selective antioxidant: a review of clinical and experimental studies / Y. Hong, S. Chen, J.M. Zhang // Journal of International Medical Research. — 2010. — Vol. 38, No. 6. — P. 1893–1903.
42. Ohta S. Molecular hydrogen is a novel antioxidant to efficiently reduce oxidative stress with potential for the improvement of mitochondrial diseases / S. Ohta // Biochimica et Biophysica Acta. — 2012. Vol. 1820, No. 5. — P. 586–594.
43. Garib B. Anti-inflammatory properties of molecular hydrogen: investigation on parasite-induced liver inflammation / B. Garib, S. Hanna, O.M.S. Abdallahi, H. Lepidi et al. // Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série III: Sciences de la vie. — 2001. — Vol. 324, No. 8. — P. 719–724.
44. Ishibashi T. Molecular hydrogen: new antioxidant and anti-inflammatory therapy for rheumatoid arthritis and related diseases / T. Ishibashi // Current Pharmaceutical Design. — 2013. — Vol. 19, No. 35. — P. 6375–6381.
45. Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ. — [Электронный ресурс] URL: <https://trpohv.ru/online/detail.html?id=416> (дата обращения 09.06.2025).
46. Реуцкий А.С. Определение потерь СПГ при выполнении бункеровки и сопутствующих технологических операций / А.С. Реуцкий, В.А. Павловский, О.В. Таровик // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Специальный выпуск 1. — С. 122–130. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-122-130. — EDN TFMMJP.
47. Буянов А.С. Перспективы бункеровки судов альтернативными видами топлива / А.С. Буянов, А.С. Реуцкий // Сборник научных трудов АО «ЦНИИМФ». — СПб.: ЦНИИМФ, 2022. — С. 89–102. — EDN KOFEXZ.

REFERENCES

1. 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.)
2. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4–15. EDN FJOQTC. (In Russ.)
3. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 87–95. EDN ICJSDQ. (In Russ.)
4. Kuzyk B.N., Yakovets Yu.V. Russia: A strategy of transition to hydrogen energy. Moscow: Institut ekonomicheskikh strategii, 2007. 398 p.
5. 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.)
6. Krylov O.V. Uglekislottnaya konversiya metana v sintez-gaz [Carbon dioxide conversion of methane into synthesis-gas]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal [Russian Chemical Journal]*. 2000. Vol. 44. P. 19–33.
7. Shvarts A.L., Bruk L.G. Konversiya metana v tekhnologicheskie gazy [Conversion of methane into process gases]. Moscow: MITHT im. M.V. Lomonosova, 2012. 32 p.
8. United Nations Framework Convention on Climate Change [of May 9, 1992]. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/convention_text_-_with_annexes_english_for_posting.pdf (accessed 23.12.2025).
9. Bebeko D.A., Velichko E.I. Study of the influence of hydrogen generator electrical parameters on the production of hydrogen and thermal energy used to reduce oil viscosity and prevent asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD) on field equipment. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more [Construction of oil and gas wells on land and offshore]*. 2025. No. 2(386). P. 14–18. EDN BPQVUA. (In Russ.)
10. Chistoforova N.V. Study of a plant for extracting hydrogen from hydrogen-containing gases. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technologies and scientific and technological progress]*. 2025. No. 12. P. 123–124. EDN ZUEZDB. (In Russ.)
11. Shcheklein S.E., Dubinin A.M., Yuzbashieva K.Sh. Hydrogen production and hybrid use of alkali metals in technologies of energy production and storage of electric energy using ECG and GTU. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2025. No. 1(430). P. 159–172. DOI 10.15518/isjae.2025.01.159-172. EDN HXPQCZ. (In Russ.)
12. Kuleshov N.V., Fateyev V.N., Terent'yev A.A. Elektroliz vody kak osnova vodorodnoy energetiki [Water electrolysis as a basis for hydrogen energy]. *Trudy III Mezhdunar. simpoziuma po vodorodnoy energetike [Proceedings of the III International Symposium on Hydrogen Energy]*. Moscow: MEI, 2009. P. 122–124.
13. Reutskii A.S., Buyanov A.S., Butsanets A.A. Comparative analysis of methods of hydrogen transportation by sea transport based on the criterion of specific loading capacity. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 709–725.
14. The Suiso Frontier. URL: <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/> (accessed 16.06.2025).
15. Reutskii A., Semionichev D., Butsanets A. Risk assessment methods used in Russian Maritime Register of Shipping. *Transport Business in Russia*. 2025. No. 6. P. 156–162. EDN YSSWRR. (In Russ.)
16. Semionichev D.S., Shurpyak V.K., Reutskii A.S. Primenenie formalizovannoi otsenki bezopasnosti v kachestve instrumenta prinyatiya reshenii s tsel'yu obespecheniya bezopasnosti morskikh sudov [The use of a formalized safety assessment for decision-making to ensure the safety of ships]. *Sbornik nauchnykh statei Nats. nauch.-prakt. konf. prof.-prep. sostava FGBOU VO "GUMRF im. adm. S.O. Makarova [Proceedings of the National Science and Pract. Conf. of the Faculty Members of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Oct. 06–20, 2025. Vol. 2]*. St. Petersburg: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2025. P. 91–95. EDN XBGKMS.
17. Klier J., Rattey M., Kaiser G., Klupsch M. et al. A new cryogenic high-pressure H₂ test area: First results. *Proceedings of the 12th IIR International Conference, Dresden, September 11–14, 2012*. URL: https://www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/Artikel/2013/Wasserstoff/cryogenic_high-pressure_H2_test_area.pdf (accessed 02.04.2026).
18. Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich — Kwong equation of state. *Chemical Engineering Science*. 1972. Vol. 27. P. 1197–1203.
19. Verfondern K., Cirrone D., Molkov V., Makarov D. et al. Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH₂ safety. 31 March 2021. (Pre-normative research for safe use of liquid hydrogen (PRESLHY): project deliverable.)
20. Edeskuty F.J., Stewart W.F. Safety in the handling of cryogenic fluids. New York: Plenum Press, 1996. (International Cryogenics Monograph Series.)
21. Tsutsuran V.I., Petrukhin N.V., Gusev S.A. Voенно-tekhnicheskii analiz sostoyaniya i perspektivy razvitiya raketnykh topliv [Military-technical analysis of the state and prospects for the development of rocket fuels: textbook]. Moscow: MO RF, 1999. 332 p.
22. Vereshchagin L.F., Yakovlev E.N., Timofeev Yu.A. The possibility of the transition of hydrogen to a conductive state. *Physics-Uspekhi*. 1975. Vol. 18, Iss. 9. P. 746.
23. Weir S.T., Mitchell A.C., Nellis W.J. Metallization of fluid molecular hydrogen at 140 GPa (1,4 Mbar). *Physical Review Letters*. 2004. Vol. 76, No. 11. P. 1860. DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.1860.
24. Deemyad S., Silvera I.F. The melting line of hydrogen at high pressures. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100, No. 15. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.155701. arXiv:0803.2321.
25. Knudson M.D., Desjarlais M.P., Becker A., Lemke R.W. et al. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium. *Science*. Vol. 348, No. 6242. 26 June 2015. P. 1455–1460. DOI: 10.1126/science.aaa7471.
26. Karlsson E. Catalytic ortho- to parahydrogen conversion in liquid hydrogen: Master's thesis. Lund University. 2017.
27. Khariton Yu.B. O dvukh modifikatsiyakh vodoroda [On two modifications of hydrogen]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in Physical Sciences]*. 1930. Vol. 10, Issue 1. P. 95–110.
28. GOST P 71076-2023 Cryogenic equipment. Liquid hydrogen transportation and storage systems. General requirements for operation. 2023.
29. Leachman J., Jacobsen R., Penoncello S., Lemmon E. Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2009. Vol. 38. P. 721–748. DOI: 10.1063/1.3160306.
30. GOST P 56248-2014 Liquid Hydrogen. Specifications. 2019.
31. Zabetakis M.G. Safety with cryogenic fluids. New York: Plenum Press, 1967.
32. Eichert H. et al. Gefährdungspotential bei einem verstärkten Wasserstoffeinsatz: Studie für das Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestags / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Stuttgart, 1992.

33. Schroeder V., Holtappels K. Explosion characteristics hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures. [*Papers of the International Conference on Hydrogen Safety 2005*].
34. Kuznetsov M., Czerniak M., Grune J., Jordan T. Effect of temperature on laminar flame velocity for hydrogen-air mixtures at reduced pressures. *Proceedings of the 5th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS-5), Brussels, September 9–11, 2013*. Paper 231.
35. Proust C. INERIS research performed within PRESLEY. [*Presentation at the 13th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig, 2020*].
36. Breitung W., Redlinger R. A model for structural response to hydrogen combustion loads in severe accidents. *Nuclear Technology*. 1995. Vol. 111, No. 3. P. 420–425.
37. Gel'd P.V., Ryabov R.A., Kodes Ye.S. Vodorod i nesovershenstva struktury metalla [Hydrogen and imperfections of metal structure]. Moscow: Metallurgiya, 1979. 221 p.
38. NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident. 1986.
39. Chepur S.V., Pluzhnikov N.N., Khurtsilava O.G., Maevsky E.I. Biological effects of molecular hydrogen and its application in clinical practice. *Uspekhi sovremennoi biologii [Advances of Contemporary Biology]*. 2017. Vol. 137. No. 3. P. 311–318. EDN YTMDBF.
40. Rakhmanin Yu.A., Egorova N.A., Mikhailova R.I., Ryzhova I.N. et al. Molecular hydrogen: Biological effects, possibilities of application in health care. Review. *Hygiene & Sanitation (Russian Journal)*. 2019. No. 4. P. 359–365. URL: <https://permedjournal.ru/0016-9900/article/view/640192/155528> (accessed 09.06.2025). (In Russ.)
41. Hong Y., Chen S., Zhang J.M. Hydrogen as a selective antioxidant: a review of clinical and experimental studie. *Journal of International Medical Research*. 2010. Vol. 38, No. 6. P. 1893–1903.
42. Ohta S. Molecular hydrogen is a novel antioxidant to efficiently reduce oxidative stress with potential for the improvement of mitochondrial diseases. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2012. Vol. 1820, No. 5. P. 586–594.
43. Garib B., Hanna S., Abdallahi O.M.S., Lepidi H. et al. Anti-inflammatory properties of molecular hydrogen: investigation on parasite-induced liver inflammation. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série III: Sciences de la vie*. 2001. Vol. 324, No. 8. P. 719–724.
44. Ishibashi T. Molecular hydrogen: new antioxidant and anti-inflammatory therapy for rheumatoid arthritis and related diseases. *Current Pharmaceutical Design*. 2013. Vol. 19, No. 35. P. 6375–6381.
45. Federal'nyy registr potentsial'no opasnykh khimicheskikh i biologicheskikh veshchestv [Federal Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances]. URL: <https://rpoiv.ru/online/detail.html?id=416> (accessed 09.06.2025).
46. Reutsky A.S., Pavlovsky V.A., Tarovik O.V. Evaluation of liquefied natural gas losses during bunkering and accompanying working operations. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special issue 1. P. 122–130. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-122-130. EDN TFMMJP. (In Russ.)
47. Buyanov A.S., Reutskii A.S. Perspektivy bunkerovki sudov al'ternativnymi vidami topliva [Prospects for bunkering ships with alternative fuels]. *Sbornik nauchnykh trudov AO TsNIIMF [Collected scientific papers of the Central Research and Design Institute of the Marine Fleet]*. St. Petersburg: TsNIIMF, 2022. P. 89–102. EDN KOFEXZ.

Статья поступила в редакцию 09.02.2026.

Принята к публикации 10.03.2026.

УДК 629.561.11+62-838
EDN EDXJCU

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕАЛИЗУЕМОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ЗАМЕНЫ ФЛОТА ПОРТОВЫХ БУКСИРОВ-КАНТОВЩИКОВ НА СУДА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ, ОБОРУДОВАННОЙ АККУМУЛЯТОРНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

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

Исследование зарубежной нормативной базы показывает, что надежным способом снизить до нуля выбросы парниковых газов буксирными судами является использование судов с полностью электрической энергетической установкой, состоящей из аккумуляторных батарей. Целью нашего исследования является определение реализуемости климатического проекта соответствующей замены флота портовых буксиров-кантовщиков, возможности регистрации планируемых действий в качестве климатического проекта и экономической целесообразности подобного проекта в России и в ЕС. В статье оценена применимость этого проекта и показаны условия, при которых появляется возможность получения позитивного эффекта, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц. Показано, что с технической точки зрения климатический проект перевода буксирного судна на аккумуляторную энергетическую установку является осуществимым, так как в настоящий момент находятся в свободном доступе сами комплектующие для переоборудования (аккумуляторные батареи с необходимыми характеристиками, аварийные дизель-генераторы и т.д.), а также существуют аналогичные образцы морской техники. Важным аспектом и главным минусом исследуемого климатического проекта в нашей стране является то, что для его регистрации необходимо доказать, что предпринимаемые действия сократят углеродный след компании на необходимую величину (т.е. на 50 000 т CO₂-экв./год), что потенциально может выполнить буксирная компания, тратящая примерно 16 тыс. т нефтяного топлива в год и / или владеющая флотом буксиров суммарной мощностью 38 МВт.

Результаты расчетов экономической целесообразности исследуемого климатического проекта применительно к ЕС и Российской Федерации демонстрируют, что, несмотря на благоприятный «климат» для создания и реализации климатических проектов в ЕС, значительная цена на электроэнергию практически полностью нивелирует выгоду от отсутствия необходимости платить значительные налоги на выбросы серы и продажи относительно дорогих углеродных единиц. Применительно к ЕС ожидаемое снижение эксплуатационных расходов составляет незначительную величину, сравнимую с погрешностью самого расчета, в остальных случаях расчет показал значительное удорожание эксплуатационных расходов (до 46 %). Несмотря на относительно низкую стоимость углеродной единицы в Российской Федерации, здесь в ряде случаев снижение эксплуатационных расходов превысило 20 %, что может объясняться низкой ценой на электроэнергию.

Ключевые слова: климатический проект, энергетическая установка, транспортная эффективность судна, альтернативные топлива, углеродная единица, аккумуляторная батарея, аварийный дизель-генератор, электрический буксир, буксир-кантовщик.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Определение степени реализуемости климатического проекта замены флота портовых буксиров-кантовщиков на суда с электрической энергетической установкой, оборудованной аккумуляторными накопителями электроэнергии / А.С. Реуцкий. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 77–90. — EDN EDXJCU.

DETERMINATION OF THE FEASIBILITY OF A CLIMATE PROJECT FOR THE TRANSFER OF PORT TUGBOATS TO A FULLY ELECTRIC POWER PLANT EQUIPPED WITH ACCUMULATORS OF ELECTRIC POWER

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

A study of the foreign regulatory framework has shown that a reliable way to reduce greenhouse gas emissions to zero by tugboats is to use vessels with a fully electric power plant consisting of rechargeable batteries. For this reason, the purpose of the study is to determine the feasibility of creating a climate project for the transfer of port tugboats to a fully electric power plant consisting of rechargeable batteries; the possibility of registering planned actions as a climate project; the economic feasibility of such a project in Russia and in the EU.

The article evaluates the applicability of this project and shows the conditions under which it becomes possible to obtain a positive effect, when the costs of implementing measures can be partially offset by the implementation of carbon units. The article shows that from a technical point of view, the climatic project of transferring a tugboat to a battery power plant is feasible, since at the moment the components themselves for conversion (batteries with the necessary characteristics, emergency diesel generators, etc.) are freely available, as well as similar samples of marine equipment. An important aspect and the main disadvantage of the climate project under study in our country is that for its registration it is

necessary to prove that the actions taken will reduce the company's carbon footprint by the required amount (i.e. by 50,000 tons of CO₂-eq/year), which can potentially be performed by a towing company spending about 16 thousand tons of petroleum fuel per year and/or owning a fleet of tugboats with a total capacity of 38 MW.

The results of calculations of the economic feasibility of the studied climate project in relation to the EU and the Russian Federation demonstrate that despite the favorable "climate" for the creation and implementation of climate projects in the EU, the significant price of electricity almost completely negates the benefits of not having to pay significant taxes on sulfur emissions and sales of relatively expensive carbon units. In relation to the EU, the expected reduction in operating costs is an insignificant amount, comparable to the error of the calculation itself, in other cases, the calculation showed a significant increase in the cost of operating costs (up to 46 %). Despite the relatively low cost of a carbon unit in the Russian Federation, in some cases the reduction in operating costs exceeded 20 %, which may be explained by the low price of electricity.

Key words: *climate project, power plant, ship transport efficiency, alternative fuels, carbon unit, battery, emergency diesel generator, electric tugboat, tugboat.*

For citation: Reutskii A.S. Determination of the feasibility of a climate project for the transfer of port tugboats to a fully electric power plant equipped with accumulators of electric power. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. Vol. 56, No. 1. P. 77–90. EDN EDXJCU. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов побуждения участников экономики к сокращению выбросов парниковых газов (далее — ПГ) внутри любой страны является повышение экономической привлекательности обычно дорогостоящих «зеленых» решений. Обычно это делается не путем прямого финансирования, а путем предоставления квот и одновременного создания нормативной базы [1], предусматривающей создание климатических проектов (далее — КП) и получение углеродных единиц, которые затем можно учитывать при оценке сокращения выбросов ПГ и зачислять на счет своей или какой-либо другой организации. Ожидается, что разработка КП заинтересует организации, которые ставят цели по сокращению своего углеродного следа в рамках добровольной сертификации или планируют заниматься продажей углеродных единиц.

Согласно своему определению, КП содержит действия, направленные на уменьшение (предотвращение) выбросов ПГ и/или увеличение их поглощения, на уровне государства или компании. Высокая степень актуальности КП в России продемонстрирована в исследованиях [2, 3], где представлены российские КП, прошедшие валидацию и зарегистрированные в реестре углеродных единиц. Большая часть КП (67 % от всех выпускаемых углеродных единиц) касаются модернизации цепочек поставок или модернизации оборудования в рамках технологического цикла компании, то есть являются технологическими, но есть и природные КП, направленные на восполнение утраченного в результате антропогенной деятельности баланса экосистем, а также восстановление утраченных экосистем (лесопосадки, осушение заболоченных участков в результате очистки русел рек и т.д.). Несмотря на озвучиваемое в настоящее время мнение [3], что для Российской Федерации реализация природных КП имеет наибольшие перспективы в части уменьшения последствий воздействия антропогенного влияния из-за естественных природно-климатических факторов, должны реализовываться и технологические КП на различных видах транспорта, поскольку это является не в последнюю очередь стимулирующей мерой для развития промышленности, техники и технологий [4].

Необходимость удовлетворять международным требованиям [5] по выбросам заставляет судовладельцев вносить существенные изменения в проекты строящихся судов и проводить модернизацию существующих судов различными способами. Таким образом, введение понятия климатического проекта в российскую нормативную базу может быть интересно отечественным судовладельцам отчасти по уже обозначенным выше причинам, а также и потому, что это дает возможность получения позитивного эффекта, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц [6].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Тема сокращения выбросов ПГ различными видами транспорта является в настоящий момент весьма животрепещущей, несмотря на то, что на долю судоходства приходится всего около 3 % всех мировых выбросов ПГ. Источниками выбросов ПГ на морских и речных судах являются двигатели внутреннего сгорания (двигатели главной энергетической установки, приводные дизель-генераторы, аварийные генераторы), инсинераторы (мусоросжигатели), а также котлы для выработки водяного пара, используемого для привода механизмов, обогрева помещений и/или груза. В соответствии с проведенным авторами [2] анализом, практически любое действие с транспортным судном, напрямую или косвенно приводящее к уменьшению выбросов ПГ или к повышению эффективности транспортной работы при сохранении или уменьшении уровня выбросов ПГ в атмосферу, может быть квалифицировано как климатический проект, но не каждый климатический проект выгоден для судовладельца.

В настоящее время большое количество исследований [7, 8] указывает на то, что снижение количества выбрасываемых в атмосферу ПГ служит в первую очередь улучшению качества жизни, особенно в городских густонаселенных районах с высокой концентрацией грузопотоков. Крупные города зачастую находятся в прибрежной зоне, ведь на приморские районы приходится около 40 % населения мира с плотностью, превышающей средний мировой показатель в 2,5 раза [9]. Проблема загазованности в крупных городах давно решается при помощи перевода общественного транспорта на альтернативные источники энергии, и морской транспорт не является исключением [10–12].

Работающие в порту суда, будь то транспортные или суда портового флота, выбрасывают в атмосферу ПГ, источником которых является их работающая энергетическая установка. Что касается транспортных судов, то работа их стояночного дизель-генератора в акватории порта также наносит вред окружающей среде из-за выбросов в атмосферу и шумового загрязнения акватории, и уже сейчас некоторые зарубежные портовые администрации прилагают значительные усилия к созданию инфраструктуры для обеспечения судов электроэнергией с берега [13], чтобы исключить потребность в работающем стояночном генераторе.

Для транспортного судна стоянка в порту в ожидании грузовых операций или во время грузовых операций является скорее вынужденной мерой, и усилия всех мировых логистических компаний направлены на минимизацию этого времени. Однако есть категория судов, которые работают в портовых условиях постоянно, обладают высокой удельной энерговооруженностью и мощностью и обеспечивают производительность порта путем выполнения буксирных и эскортных операций, — буксирные суда.

Зарубежный опыт борьбы с выбросами ПГ в атмосферу с буксирных судов включает использование СПГ [14, 15] (рис. 1а), спиртовых топлив [16] (рис. 1б), аммиака [17] (рис. 1в) и электроэнергии [18] (рис. 1г). В зависимости от даты реализации проекта и действующей на тот момент нормативной базы, степень сокращения выбросов ПГ варьируется от 40 % для буксира на СПГ [19] до практически 100 % у аммиачных и электрических буксиров.

Таким образом, один из надежных способов снизить выбросы ПГ буксирными судами до нуля — использовать суда с полностью электрической энергетической установкой. Схема эксплуатации буксиров, и в особенности портовых буксиров-кантовщиков, предполагает их работу на коротком плече, чередование относительно краткосрочных периодов интенсивной работы и длительных простоев, в ходе которых можно заряжать батарею или производить ее замену на заряженную. Таким образом, из всех типов судов использование чисто электрической энергетической установки больше всего подходит для буксиров-кантовщиков, что подтверждается исследованием [20], поэтому реализация такого КП выглядит весьма актуальной.

При выборе способа соответствовать ужесточаемым международным климатическим нормам для морского судна или для снижения выбросов судна, функционирующего на внутренних водных путях или в территориальных водах Российской Федерации, необходимо ориентироваться на возможность регистрации принимаемых мер в качестве КП. В решении этой задачи может помочь определенный набор критериев, сформулированный авторами в статье [21] и раскрывающий сущностную часть климатического проекта, а также позволяющий оценить его применимость на водном транспорте. Разработка КП актуальна для организаций, чья деятельность сопряжена с выбросами ПГ в количестве > 50 000 т CO₂-экв. в год (ст. 7 закона № 296-ФЗ [22]).

Помимо этого, введение критериев оценки осуществимости КП должно быть основано на:

- реализуемости проекта в данное время;
- возможности регистрации планируемых действий в качестве КП;
- экономической целесообразности проекта.

РЕАЛИЗУЕМОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БУКСИРНОГО ФЛОТА КОМПАНИИ

В соответствии с [21] критерий реализуемости показывает, насколько велики трудности (организационные, юридические и т.п.) реализации рассматриваемого проекта. Его компонентами являются: степень подготовленности технологий, обеспеченность материально-техническими ресурсами, условия инвестирования, наличие производственных мощностей, подготовленность проектно-сметной документации и т.д.

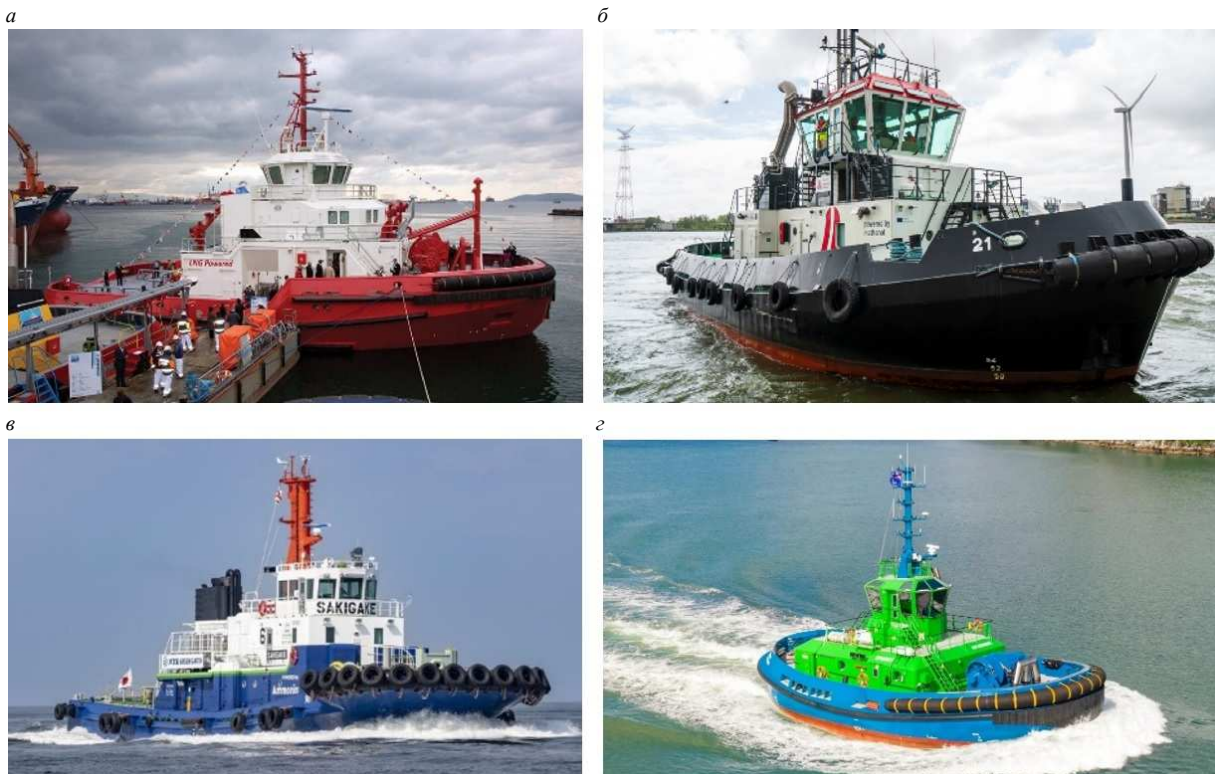


Рис. 1. Буксиры Borgøy на СПГ (а), Methatug на метаноле (б), Sakigake на аммиаке (в), Sparky — электроход (г)

Во многих зарубежных статьях рассматривается возможность создания электрических судов [23–25], а в нашей стране на класс Российского морского регистра судоходства строится пассажирский электроход «Байкал» проекта ТФРП700 [26], характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики пассажирского электрохода «Байкал»

Назначение	<ul style="list-style-type: none"> ● перевозка пассажиров, ● плавучий отель в межнавигационный период
Класс	Российский морской регистр судоходства
Длина наиб., L_{oa} , м	69,8
Ширина наиб., B , м	15,5
Осадка, d , м	2,5
Водоизмещение масс., Δ , т	1903
Скорость, v_s , уз	10,8
Автономность, сут	7
Мощность гребных электродвигателей, кВт	3×400 кВт
Экипаж + персонал, чел	10 + 31
Пассажировместимость, чел	152

Дальше всех в создании электрических портовых буксиров продвинулась компания Damen, построившая в 2023 г. судно Sparky проекта Stern Drive Tug 2513 Electric (рис. 1, 2), характеристики которого представлены в табл. 2. Батареи судна расположены под верхней палубой (рис. 2) и подзаряжаются от берега, однако в случае необходимости для выработки электричества на борту судна могут быть использованы вспомогательные дизель-генераторы, которые смогут обеспечить питанием электроэнергией гребные электродвигатели и все судовые потребители, в том числе насосы пожарного оборудования скоростью до 2400 м³/ч. Для удовлетворения нормам IMO Tier III дизель-генераторы оборудованы системой снижения содержания опасных оксидов азота в отработавших газах Damen SCR System. Автономность судна на электробатареях составляет около 12 часов.

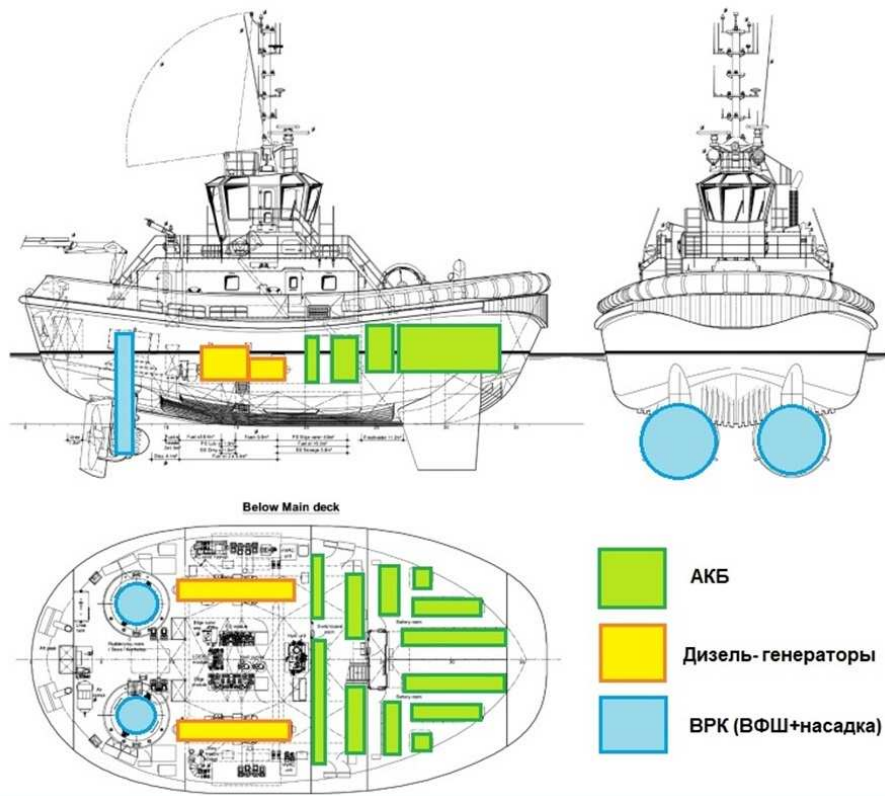


Рис. 2. Общее расположение буксира Sparky от компании Damen

Таблица 2

Характеристики буксира Sparky

Назначение	<ul style="list-style-type: none"> • буксирование самоходных и несамоходных судов, • несение аварийно-спасательного дежурства, • борьба с пожаром
Класс Длина наиб., <i>Loa</i> , м Ширина наиб., <i>B</i> , м Осадка, <i>d</i> , м Высота борта, <i>H</i> , м Водоизмещение масс., Δ , т Тяга на пер. ходу, <i>BP</i> , тс Скорость, <i>v_s</i> , уз Гребные электродвигатели Мощность гребных электродвигателей, кВт Винторулевые колонки Емкость батарей, кВт·ч Диаметр гребного винта, мм Вспомогательные дизель-генераторы Экипаж, чел.	Bureau Veritas 24,73 13,13 4,95 6,5 607 70 12 2 × Ramme TW 1400 2 × 1850 кВт при 500 об/мин 2 × Kongsberg Maritime US 255 L-Dive 2782 3000 2 × Caterpillar C32TA, 1175 кВА, 690 В, 60 Гц 6

На судах, оборудованных электрической или гибридной силовой установкой, система аккумуляторных батарей имеет первостепенное значение, поскольку служит основным источником питания для всех электрических и электронных систем, а также источником энергии для движения судна.

Традиционно основными недостатками аккумуляторных батарей как источника энергии на судне считались их большие габариты, значительный вес, низкая энергоемкость и высокая цена. Однако уже сейчас, с развитием беспилотных технологий, габариты и вес современных аккумуляторных батарей уменьшаются, а энергоемкость растет. Наилучшими показателями здесь обладают аккумуляторы с литий-ионными и литий-полимерными ячейками. В статьях [27, 28] авторами были рассмотрены существующие в настоящий момент принципиальные решения по электрическим батареям в морском исполнении (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Характеристики АКБ в морском исполнении различных систем

Параметр АКБ	НПК МСА ¹	BR ²	AT ³	SWE ⁴	AT ⁵	FB ⁶	SPS ⁷
Тип ячейки	Lithium-ion	Lithium-polymer	Nickel-metal hydride	Lithium-ion	Lead-acid	Lead-carbon technology	Lithium-titanate
Длина, мм	386	384	500	1910	457	508	580
Ширина, мм	635	133	400	1890	305	303	320
Высота, мм	213	210	450	650	327	172	380
Площадь, мм ²	0,245	0,051	0,2	3,61	0,139	0,154	0,186
Объем, м ³	0,05	0,011	0,09	2,346	0,046	0,026	0,071
Масса (сух), кг	68	14,3	46	75	49	75	90
Энергоемкость, кВт·ч	8,3	1,5	0,95	3,2	–	2	3,5
Плотность энергии, т/МВт·ч	8,2	9,5	48,4	23,4	–	37,5	25,7
Использ. площадь, м ² /МВт·ч	29,53	34	211	1 128	–	77	53

¹НПК Морсвязьавтоматика — UniPower модули LTO (Россия);

²Bluefin's Robotics (США);

³Ashtead Technology — CDL Subsea Battery Pack (Сингапур, ОАЭ, Великобритания, США);

⁴Southwest Electronic Energy Group (США);

⁵Ashtead Technology — Deepsea Power & Light (Сингапур, ОАЭ, Великобритания, США);

⁶Furukawa Battery (Япония);

⁷Spear power systems — PBES Lithium Industrial Batteries (США).

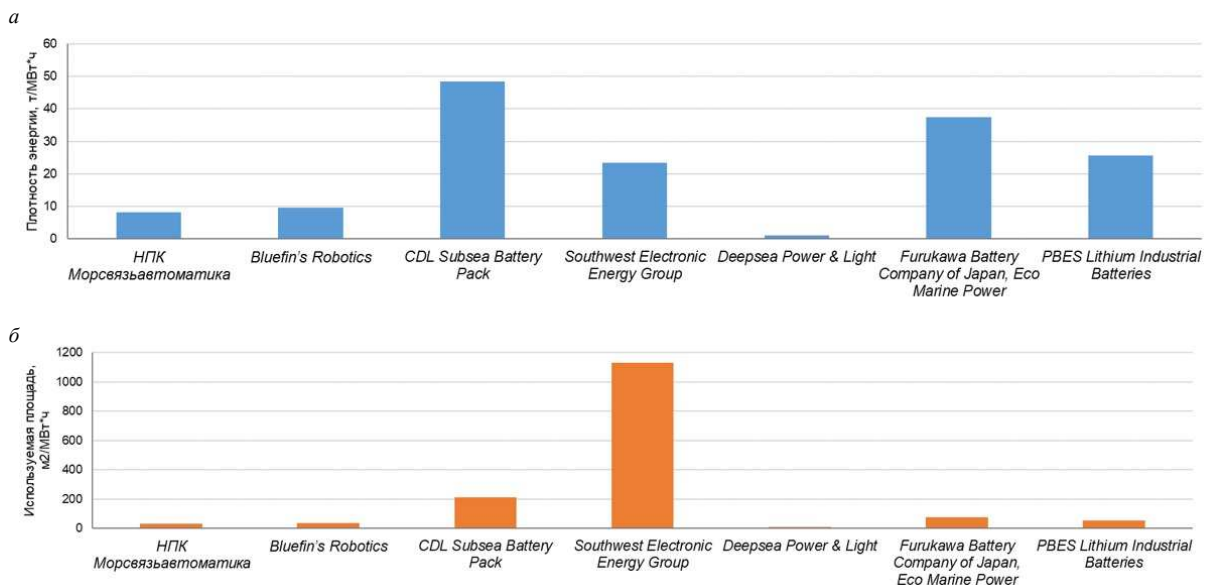


Рис. 3. Характеристики АКБ в морском исполнении от различных производителей:

a — плотность энергии; *б* — используемая площадь

Из табл. 3 становится ясно, что масса аккумуляторной системы в морском исполнении энергоемкостью около 3 МВт·ч в зависимости от технологии изготовления может составить от 20 до 145 т. В статье [2] авторы привели формулу расчета потребного количества аккумуляторных батарей:

$$n = \frac{P \cdot t}{V \cdot k \cdot Q_{\text{ном}}} = 24 \text{ ед.}, \quad (1)$$

где $P = 2784$ кВт — нагрузка двух электродвигателей буксира Sparky [30];
 $V = 5994$ В — напряжение накопителей энергии типа НЭ-650-160 [31];
 $t = 12$ ч — приемлемая автономность портового буксира-кантовщика, с энергоустановкой, оборудованной аккумуляторными батареями;
 $Q_{\text{ном}} = 0,16$ кА·ч — номинальная емкость батарей;
 $k = 1,428$ — коэффициент использования емкости аккумуляторов.

Таким образом, если масса одного НЭ-650-160 составляет 1,16 т [31], то суммарная масса батарей составит около 28 т. Такая величина вполне соотносится с суммарной массой заменяемых при переоборудовании позиций нагрузки масс аналогичного буксира с тягой на гаке 60 тс [32], а значит, с технической точки зрения климатический проект перевода буксирного судна на аккумуляторную энергетическую установку является осуществимым, в настоящий момент находятся в свободном доступе комплектующие, а также существуют аналогичные образцы морской техники.

ВОЗМОЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БУКСИРОВ В КАЧЕСТВЕ КП

Главным формальным критерием возможности регистрации климатического проекта, заключающегося в использовании буксиров с гибридной энергетической установкой, оборудованной аккумуляторными батареями, является количество ПГ, выбрасываемых заменяемыми традиционными буксирами. Вопрос сводится к тому, сколько ископаемого топлива за отчетный период нужно потратить компании, чтобы достичь цифры в 50 000 т CO₂-экв./год. В Приложении 2 Резолюции Подкомитета КЗМС ИМО [33] представлена величина углеродоемкости каждого вида морского топлива, имеющая размерность «г CO₂-экв./г топлива». На рис. 4 показано количество различных типов судового топлива [34], которое необходимо израсходовать, чтобы достичь искомой величины. Исходя из представленной информации, масса потраченного нефтяного топлива лежит в диапазоне от 15 500 до 16 500 т. Не каждая буксирная компания тратит в год сколько топлива, определенный интерес представляет определение минимального порога удовлетворения компании требованиям к новому КП. Здесь эту величину удобно выразить через суммарную мощность ГД всех буксиров компании, работающих на традиционном нефтяном топливе:

$$\sum_{i=1}^n N_{\text{ГД}} = \frac{P_{\text{топл}}}{K_{\text{ИМ}} \cdot C_{\text{уд}} \cdot A \cdot 10^{-6}}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $P_{\text{топл}}$ — количество израсходованного нефтяного топлива (рис. 4), т;
 $K_{\text{ИМ}}$ — коэффициент использования мощности буксира, то есть среднее значение в % от $Ne_{\text{ном}}$ всех ГД;
 $C_{\text{уд}}$ — удельный расход топлива, г/кВт·ч;
 A — бюджет рабочего времени буксира, час/год.

В исследовании [35] авторы провели натурные испытания на буксирах, оборудованных высокооборотными двигателями производства фирмы Caterpillar модели CAT 3500В номинальной мощностью до 1230 кВт и номинальной частотой вращения до 1850 мин⁻¹. В результате анализа данных, накопленных за 10 лет работы этих двигателей, авторы выяснили, что значительную часть эксплуатационного времени они работали в диапазоне нагрузок до 50 % от номинальной мощности, причем для работы на нагрузках до 10–15 % $Ne_{\text{ном}}$ приходилось до 80 % эксплуатационного времени судна. Поэтому примем значение $K_{\text{ИМ}}$ равным среднему медианному, равному 25 % $Ne_{\text{ном}}$. Удельный расход топлива примем равным 220 г/кВт·ч [35]. Бюджет рабочего времени буксира A , час/год, может быть определен по СП [36] и равен произведению 625 час/мес на 12 месяцев = 7500 час/год.

$$\sum_{i=1}^n N_{\text{ГД}} = \frac{15868}{0,25 \cdot 220 \cdot 7500 \cdot 10^{-6}} \approx 38,5 \text{ МВт.}$$

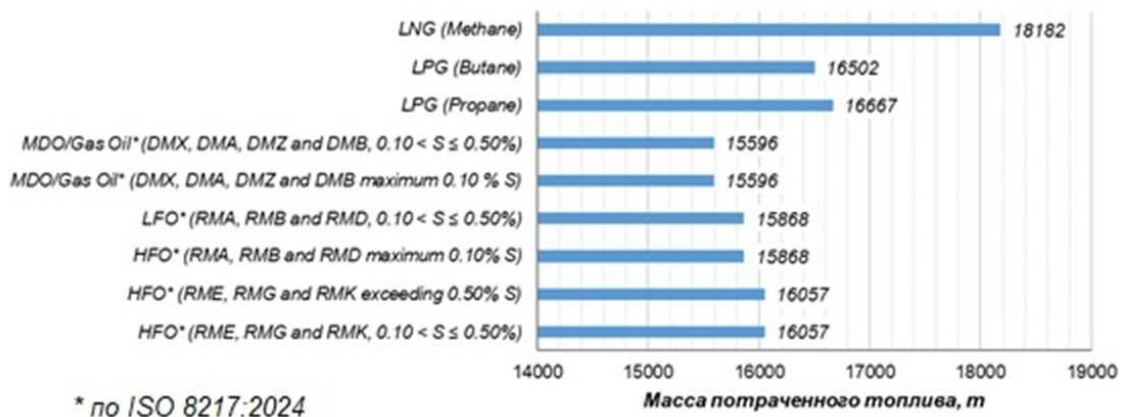


Рис. 4. Количество потраченного судового топлива [34], достигнув которого можно зарегистрировать КП (50 000 т CO₂-экв./год)

Таким образом, если масса потраченного компанией нефтяного топлива лежит в диапазоне от 15 500 до 16 500 т и/или суммарная мощность всех буксиров компании превышает величину $\sum N_{ГД} \approx 38$ МВт, то КП может представлять собой результат обновления флота буксиров компании путем модернизации буксиров, использующих жидкое нефтяное топливо, или постройки новых судов, оборудованных аккумуляторной энергетической установкой. Модернизация судов представляет собой комплекс мероприятий, направленных на замену пропульсивной системы, состоящей из высокооборотных дизельных двигателей с прямой передачей на винторулевую колонку на гибридную силовую установку, состоящую из аккумуляторных батарей, систем их управления, гребных электродвигателей и аварийных дизель-генераторов, обеспечивающих питание в случае разряда батарей или их выхода из строя. Прототипом может послужить буксир Sparky (табл. 1).

Важным аспектом и главным минусом этого КП в Российской Федерации является то, что для его регистрации необходимо доказать, что предпринимаемые действия сократят углеродный след компании на необходимую величину (т.е. на 50 000 т CO₂-экв./год), что потенциально может выполнить буксирная компания, тратящая примерно 16 000 т нефтяного топлива в год и/или владеющая флотом буксиров суммарной мощностью 38 МВт, что эквивалентно примерно 14 буксирам-кантовщикам мощностью 2782 кВт каждый.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БУКСИРНОГО ФЛОТА КОМПАНИИ

Экономическую целесообразность можно оценить через полученное снижение эксплуатационных расходов флота буксирных судов за отчетный период. Выполним оценку ожидаемого снижения эксплуатационных расходов буксирного флота применительно к условиям ЕС и Российской Федерации по формуле:

$$Profit = OPEX_{new} - PEX_{old}, \% , \quad (3)$$

где $OPEX_{new}$ — годовые эксплуатационные расходы обновленного флота буксиров;
 $OPEX_{old}$ — эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления.

В обоих случаях эксплуатационные расходы складываются из затрат на топливо C_{fuel} , содержание экипажа C_{crew} и прочих затрат C_{other} , включающих расходы на ремонт, различные сборы и классификационные услуги. Тогда годовые эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления:

$$OPEX_{old} = (C_{fuel} + C_{crew} + C_{other}) \cdot n, \quad (4)$$

где n — количество буксиров.

Представим результаты расчетов в табличном виде. Результаты расчетов применительно к ЕС представлены в табл. 4, применительно к РФ — в табл. 5.

Таблица 4
Расчет изменения эксплуатационных расходов флота буксирных судов в результате создания КП применительно к ЕС

Тип судового топлива	Содержание серы, т серы/т топл.	Углеродоемкость топлива, т CO ₂ /т топл.	Потраченное топливо**, т/год	Кол-во буксиров в КП	Цена топлива, €	Затраты 1 буксира на топливо, €	Налог на выбросы серы, € /год	OPEX старого флота, €	Стоимость электроэнергии 1 буксира, €	OPEX нового флота (с учетом КП), €	Ожидаемое снижение экспл. расх., % OPEX
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,11	16 057	14	435	49 9206	625 260	24 142 524	1 458 124	24 688 474	+2
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,5 % S)	0,005	3,11	16 057	14	440	50 4944	625 260	24 222 856	1 458 124	24 688 474	+2
HFO* (RMA, RMB, RMD max. 0,1 % S)	0,001	3,15	15 868	14	440	50 4944	123 580	17 199 336	1 458 124	25 190 154	+46
LFO* (RMA, RMB, RMD, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,15	15 868	14	606	69 5446	617 900	26 786 844	1 458 124	24 695 834	-8
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB 0,1 % S)	0,001	3,21	15 596	14	622	71 3807	121 462	20 093 766	1 458 124	25 192 272	+25
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,21	15 596	14	606	69 5446	607 308	26 638 556	1 458 124	24 706 426	-7
LNG (Methane)	0	2,75	18 182	16	835	95 8246	0	24 931 936	1 458 124	29 429 981	+18

* По ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels [34].
** Количество топлива, эквивалентное выбросам ПГ 50 000 т CO₂-экв.

Таблица 5
Расчет изменения эксплуатационных расходов флота буксирных судов в результате создания КП применительно к РФ

Тип судового топлива	Содержание серы, т серы/т топл.	Углеродоемкость топлива, т CO ₂ /т топл.	Потраченное топливо**, т/год	Кол-во буксиров в КП	Цена топлива, руб.	Затраты 1 буксира на топливо, руб.	OPEX старого флота, руб.	Стоимость электроэнергии 1 буксира, руб.	OPEX нового флота (с учетом КП), руб.	Ожидаемое снижение экспл. расх., % OPEX
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,11	16 057	14	34 000	39 018 400	1 194 737 600	48 523 256	1 277 805 581	+7
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,5 % S)	0,005	3,11	16 057	14	34 000	39 018 400	1 194 737 600	48 523 256	1 277 805 581	+7
HFO* (RMA, RMB, RMD max. 0,1 % S)	0,001	3,15	15 868	14	47 000	53 937 200	1 403 600 800	48 523 256	1 277 805 581	-9
LFO* (RMA, RMB, RMD, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,15	15 868	14	60 000	68 856 000	1 612 464 000	48 523 256	1 277 805 581	-21
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB 0,1 % S)	0,001	3,21	15 596	14	63 000	72 298 800	1 660 663 200	48 523 256	1 277 805 581	-23
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,21	15 596	14	60 000	68 856 000	1 612 464 000	48 523 256	1 277 805 581	-21

* По ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels [34].
** При цене 1 угл. ед. 1000 руб.

В табл. 4 представлены расчеты $OPEX_{old}$ для ЕС, значения которых хорошо коррелируются с представленным в докладе [37] значением, в соответствии с которым стоимость годовых эксплуатационных затрат буксирного судна с тягой на гаке 60–70 тс в странах ЕС составляет около 1,65 млн. € в год. Применительно к новому и старому флоту буксиров значения затрат на экипаж ($C_{crew_{EU}}$, $C_{crew_{RF}}$) и прочих расходов ($C_{other_{EU}}$, $C_{other_{RF}}$) носят постоянные значения и определяются по формулам:

$$C_{crew_{EU}} = n_{crew} \cdot O_{crew} \cdot 12 = 6 \text{ чел.} \cdot 5000 \text{ €} \cdot 12 \text{ мес.} = 360\,000 \text{ €/год,}$$

$$C_{crew_{RF}} = n_{crew} \cdot O_{crew} \cdot 12 = 6 \text{ чел.} \cdot 250\,000 \text{ руб.} \cdot 12 \text{ мес.} = 18\,000\,000 \text{ руб./год.}$$

(5)

Значения прочих расходов ($C_{other_{EU}}$, $C_{other_{RF}}$) носят постоянные значения и в текущем исследовании приняты равными 3 % от стоимости нового буксира вне зависимости от страны постройки (3 % от 8 млн € = 240 000 € = 28,32 млн руб.). Стоимость нефтяного топлива в зависимости от места реализации КП является переменной величиной и определяется по формуле:

$$C_{fuel} = Price_{fuel} \cdot P_{fuel} \cdot n, \quad (6)$$

где $Price_{fuel}$ — цена соответствующего вида топлива [38–40];
 $OPEX_{old}$ — эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления;
 P_{fuel} — количество потраченного буксиром топлива, определяемое по формуле (2), т.

Годовые эксплуатационные расходы флота буксиров после обновления:

$$OPEX_{new} = (C_{el} + C_{crew} + C_{other}) \cdot n - (KPI_{CO_2} \cdot price_{CO_2} - KPI_s \cdot price_s), \quad (7)$$

где C_{el} — стоимость электричества, потраченного новым буксиром;
 $KPI_{CO_2} = 50\,000$ ед. CO_2 -экв. — количество климатических единиц;
 $price_{CO_2}$ — стоимость климатической единицы, в ЕС составляет 70 €, в РФ — 1000 руб.;
 KPI_s — предотвращенное количество выброшенной серы (в зависимости от типа топлива), т/год;
 $price_s$ — стоимость квоты на выброс тонны серы в ЕС 7788 € [41], в РФ налогами не облагается.

Стоимость электричества для обновленного флота буксиров в зависимости от места реализации КП является переменной величиной и определяется по формуле:

$$C_{el} = Price_{el} \cdot (P_{el} / \eta_{el}) \cdot n, \quad (8)$$

где $Price_{el}$ — цена электричества в ЕС или РФ [42, 43];
 $OPEX_{old}$ — эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления;
 $\eta_{el} = 0,86$ — КПД передачи электроэнергии от источника (сети) к аккумуляторной батарее;
 P_{el} — количество потраченной буксиром электроэнергии, определяемое по формуле (9), т:

$$P_{el} = Ne_{ном} \cdot K_{ИМ} \cdot A = 2782 \cdot 0,25 \cdot 7500 = 5\,216\,250 \text{ кВт/год}. \quad (9)$$

Результаты расчетов демонстрируют, что, несмотря на благоприятный «климат» для создания и реализации климатических проектов в ЕС, значительная цена на электроэнергию практически полностью нивелирует выгоду от продажи относительно дорогих углеродных единиц и отсутствия необходимости платить высокие налоги на выбросы серы. В двух случаях ожидаемое снижение эксплуатационных расходов составляет незначительную величину, сравнимую с погрешностью самого расчета, в остальных случаях расчет показал существенное удорожание эксплуатационных расходов (до 46 %). Несмотря на относительно низкую стоимость углеродной единицы в Российской Федерации, здесь в ряде случаев снижение эксплуатационных расходов превысило 20 %, что может объясняться низкой ценой на электроэнергию. Конечно, без учета капитальных затрат на строительство или модернизацию флота буксиров и создание соответствующей инфраструктуры судить о целесообразности проекта преждевременно, однако тот факт, что эксплуатационные затраты подобного проекта сравнимы с эксплуатационными затратами привычных для нас портовых буксиров-кантовщиков, сам по себе опровергает распространенный тезис о дороговизне альтернативных источников энергии.

ВЫВОДЫ

В работе была рассмотрена нормативная база климатических проектов на водном транспорте. Надежным способом снизить до нуля выбросы ПГ буксирными судами является использование судов с полностью электрической энергетической установкой, состоящей из аккумуляторных батарей. В статье была оценена применимость этого проекта и показаны условия, при которых появляется возможность получения позитивного эффекта, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц. В статье показано, что с технической точки зрения КП перевода буксирного судна на аккумуляторную энергетическую установку является осуществимым, так как в настоящий момент находятся в свободном доступе сами комплектующие для переоборудования (аккумуляторные батареи с необходимыми характеристиками, аварийные дизель-генераторы и т.д.), а также существуют аналогичные образцы морской техники. Важным аспектом и главным минусом исследуемого КП в нашей стране является то, что для его регистрации необходимо доказать, что предпринимаемые действия сократят углеродный след компании на необходимую величину (т.е. на 50 000 т CO_2 -экв./год), что потенциально может выполнить

буксирная компания, тратящая примерно 16 000 т нефтяного топлива в год и/или владеющая флотом буксиров суммарной мощностью 38 МВт.

Результаты расчетов экономической целесообразности исследуемого КП применительно к ЕС и Российской Федерации демонстрируют, что несмотря на благоприятный «климат» для создания и реализации климатических проектов в ЕС, значительная цена на электроэнергию в ЕС практически полностью нивелирует выгоду от отсутствия необходимости платить высокие налоги на выбросы серы и продажи относительно дорогих углеродных единиц. Применительно к ЕС ожидаемое снижение эксплуатационных расходов составляет незначительную величину, сравнимую с погрешностью самого расчета, в остальных случаях расчет показал существенное удорожание эксплуатационных расходов (до 46 %). Несмотря на относительно низкую стоимость углеродной единицы в Российской Федерации, здесь в ряде случаев снижение эксплуатационных расходов превысило 20 %, что может объясняться низкой ценой на электроэнергию.

Без учета капитальных затрат на строительство или модернизацию флота буксиров и создание соответствующей инфраструктуры, судить о целесообразности проекта преждевременно, однако тот факт, что эксплуатационные затраты подобного проекта сравнимы с эксплуатационными затратами привычных для нас портовых буксиров-кантовщиков, сам по себе опровергает распространенный тезис о дороговизне альтернативных источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 24 марта 2022 г. № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов».
2. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJQQTС.
3. Пинаев В.Е. Направления, опыт и перспективы реализации климатических проектов в России / В.Е. Пинаев, В.Н. Ухова, Т.Н. Ледашева // Отходы и ресурсы. — 2023. — Т. 10. — № 2. — [Электронный ресурс] URL: <https://resources.today/PDF/17ECOR223.pdf> (дата обращения 10.09.2024). — DOI 10.15862/17ECOR223.
4. 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. Шурпяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBVVJV.
5. Толмачев С.А. Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (СИ) и предлагаемые подходы к их совершенствованию / С.А. Толмачев, А.А. Серов, А.А. Михеева, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 24–32. — EDN FXBYEL.
6. Реуцкий А.С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А.С. Реуцкий, В.В. Якимов, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
7. Fuentes García G. Sea port SO₂ atmospheric emissions influence on air quality and exposure at Veracruz, Mexico / G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, A. García Reynoso, J.M. Baldasano Recio et al. // Atmosphere. — 2022. — Vol. 13. — P. 1950. — DOI 10.3390/atmos13121950.
8. Fuentes García G. Atmospheric emissions in ports due to maritime traffic in Mexico / G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, J.M. Baldasano Recio, J.D. Kahl et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. — P. 1186. — DOI 10.3390/jmse9111186.
9. Михайлов А.С. Побережья, на которых мы живем: может ли быть единое определение приморской зоны? / А.С. Михайлов, А.П. Плотникова // Балтийский регион. — 2021. — Т. 13, № 4. — С. 36–53. — DOI 10.5922/2079-8555-2021-4-3.
10. Павловский В.А. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа / В.А. Павловский, А.С. Реуцкий. — СПб.: ФГУП КГНЦ, 2019. — 88 с. — EDN EZHRNH.
11. 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.
12. Кондратенко А.А. Особенности проектирования СПГ бункеровщиков / А.А. Кондратенко, А.С. Реуцкий // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — Специальный выпуск 1. — С. 216–222. — DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-S-1-216-222. — EDN EНJHYJ.
13. CMA CGM and SIPP ink long-term onshore power cooperation // Seatrade Maritime. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.seatrade-maritime.com/sustainability/cma-cgm-and-sipp-ink-long-term-onshore-power-cooperation> (дата обращения 25.12.2025).
14. Borgøy: the world's first LNG-fueled tug // MarineLink. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.marinelink.com/news/lngfueled-worlds-first364856.aspx#> (дата обращения 25.12.2025).
15. Реуцкий А.С. Особенности проектирования судов-бункеровщиков сжиженным природным газом: дисс. ... канд. техн. наук / А.С. Реуцкий; СПбГМТУ. — 2021. — 346 с. — EDN CCFESV.
16. First methanol-fueled tug launches at port of Antwerp // The Maritime Executive. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.maritime-executive.com/article/first-methanol-fueled-tug-launches-at-port-of-antwerp> (дата обращения 25.12.2025).
17. NYK completes world's first commercial-use ammonia-fueled vessel // The Maritime Executive. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.maritime-executive.com/article/nyk-completes-world-s-first-commercial-use-ammonia-fueled-vessel> (дата обращения 25.12.2025).
18. Guinness world record for power set by Damen-built electric tug in UAE // The Maritime Executive. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.maritime-executive.com/article/guinness-world-record-for-power-set-by-damen-built-electric-tug-in-uae> (дата обращения 25.12.2025).

19. The role of LNG in emission reduction: Exploring the potential and limitations of LNG as a transition fuel for the shipping industry // *Diverse Daily*. — [Электронный ресурс] URL: <https://diversedaily.com/the-role-of-lng-in-emission-reduction-exploring-the-potential-and-limitations-of-lng-as-a-transition-fuel-for-the-shipping-industry/> (дата обращения 25.12.2025).
20. Ivanov G. Efficient application range of electric cargo ships / G. Ivanov // *International Journal of Maritime Engineering*. — 2023. — Vol. 165, No. A1. — P. 1–10.
21. Реуцкий А.С. Определение критериев целесообразности создания климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 78. — С. 16–22. — EDN ZURMGR.
22. Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов».
23. Minhazul Islam. Concept of an electric-powered passenger vessel in Bangladesh / Minhazul Islam, Saad Alif-A. Zaman, Md Mashiur Rahaman // *Journal of Maritime Research*. — 2023. — Vol. 20, No. 3. — P. 68–71.
24. Koričan M. Electrification of fishing vessels and their integration into isolated energy systems with a high share of renewables / M. Koričan, L. Frković, N. Vladimir // *Journal of Cleaner Production*. — 2023. — Vol. 425. — P. 138997.
25. Percić M. Environmental and economic assessment of batteries for marine applications: Case study of all-electric fishing vessels / M. Percić, M. Koričan, I. Jovanović, N. Vladimir // *Batteries*. — 2024. — Vol. 10, Issue 7. — DOI 10.3390/batteries10010007.
26. «Зеленый флот» для Байкала: заложен киль круизного электросудна проекта «Байкал» // *Водоход*. — [Электронный ресурс] URL: <https://vodohod.com/about/news/zelenyy-flot-dlya-baykala-zalozhen-kil-kruiznogo-elektrosudna-proekta-baykal/> (дата обращения 25.12.2025).
27. Koumentakos A.G. Developments in electric and green marine ships / A.G. Koumentakos // *Applied System Innovation*. — 2019. — Vol. 2, No. 4. — P. 34.
28. Roy R.B. Impact analysis on distribution network due to coordinated electric ferry charging / R.B. Roy, S. Alahakoon, P. Janse Van Rensburg, E. Basher et al. // *IET Energy Systems Integration*. — 2024. — Vol. 6, No. 4. — P. 638–663.
29. Васильев А.А. Анализ проектных характеристик судов снабжения ледового класса при применении альтернативных источников энергии / А.А. Васильев, К.Д. Овчинников // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2024. — № 1, часть 1. — С. 11–19.
30. RSD Tug 2513 Electric // *Damen Shipyards Group*. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.damen.com/vessels/tugs/electric-tugs/rsd-tug-2513-electric#specifications> (дата обращения 25.12.2025).
31. Накопители энергии НЭ-650-160 // *ЕЦС СКО*. — [Электронный ресурс] URL: <https://ecs-sko.ru/catalog/equipment/detail/nakopiteli-energii-ne-650-160/> (дата обращения 25.12.2025).
32. [Госзакупки: Характеристики буксира мощностью ~2800 кВт] // *ЕИС Закупки*. — [Электронный ресурс] URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok504/view/documents.html?regNumber=0172200002519000078> (дата обращения 25.12.2025).
33. Резолюция МЕРС.376(80) (принята 7 июля 2023 года): Руководство по интенсивности выбросов ПГ на протяжении жизненного цикла судового топлива (руководство по ОЖЦ).
34. ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels.
35. Николаев Н.И. Анализ экспериментальных данных по нагрузкам современных высокооборотных двигателей CAT 3500 серии морских буксиров / Н.И. Николаев, В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. — 2014. — № 6(28). — С. 49–55.
36. СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Стандартинформ, 2018.
37. Bossche M. van den. Economic impact of the European Towing sector / M. van den Bossche, R. Janse, O. de Jong, U. Mehmood. — Rotterdam, 29 October 2019.
38. Цены на бункерное топливо в Роттердаме // *OilMonster*. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/west-northern-europe/rotterdam/133> (дата обращения 25.12.2025).
39. Rotterdam bunker prices // *Ship & Bunker*. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam> (дата обращения 25.12.2025).
40. Стоимость бункерного топлива по итогам ноября 2023 года // *АСРФ*. — [Электронный ресурс] URL: <https://fsarf.ru/analytics/stoimost-bunkernogo-topliva-po-itogam-noyabrya-2023-goda/> (дата обращения 25.12.2025).
41. Wang H. Life cycle analysis of hydrogen powered marine vessels — Case ship comparison study with conventional power system / H. Wang, M.Z. Aung, X. Xu, E. Boulougouris // *Sustainability*. — 2023. — Vol. 15. — No. 17. — P. 12946. — DOI 10.3390/su151712946.
42. Список стран Европы по стоимости электроэнергии // *Википедия*. — [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_Европы_по_стоимости_электроэнергии (дата обращения 25.12.2025).
43. Цена на электроэнергию для бизнеса по субъектам РФ // *АО «Газпром Энергосбыт»*. — [Электронный ресурс] URL: <https://energосбыт.газпром.ru/> (дата обращения 06.04.2026).

REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 455 of March 24, 2022 'On Approval of the Rules for Verification of the Results of Climate Project Implementation'. (In Russ.)
2. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4–15. EDN FJOQTC. (In Russ.)
3. Pinaev V.E., Ukhova V.N., Ledashcheva T.N. Napravleniya, opyt i perspektivy realizatsii klimaticheskikh proektov v Rossii [Directions, experience and prospects for the implementation of carbon projects in Russia]. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023. T. 10. No. 2. URL: <https://resources.today/en/17ecor223.html> (accessed 10.09.2024). DOI 10.15862/17ECOR223.
4. 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.)
5. Tolmachev S.A., Serov A.A., Mikheeva A.A., Semionichev D.S., Reutskii A.S. 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.)
6. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 87–95. EDN ICJSDQ. (In Russ.)
7. Fuentes García G., Echeverría R.S., Reynoso A.G., Baldasano Recio J.M. et al. Sea port SO₂ atmospheric emissions influence on air quality and exposure at Veracruz, Mexico. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 1950. DOI 10.3390/atmos13121950.
8. Fuentes García G., Sosa Echeverría R., Baldasano Recio J.M., Kahl J.D. et al. Atmospheric emissions in ports due to maritime traffic in Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. P. 1186. DOI 10.3390/jmse9111186.
9. Mikhaylov A.S., Plotnikova A.P. The coasts we live in: can there be a single definition for a coastal zone? *Baltic Region*. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 36–53. DOI 10.5922/2079-8555-2021-4-3. (In Russ.)
10. Pavlovskii V.A., Reutskii A.S. Teplofizicheskie osnovy morskoi transportirovki i bunkerovki szhizhennogo prirodnogo gaza [Thermophysical principles of maritime transportation and bunkering of liquefied natural gas]. St. Petersburg: FGUP KGNTs, 2019. 88 p. EDN EZHRNH.
11. 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.)
12. Kondratenko A.A., Reutsky A.S. Design specifics of LNG bunkering ships. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Special Edition 1. P. 216–222. DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-216-222. EDN EHHYJ. (In Russ.)
13. CMA CGM and SIPG ink long-term onshore power cooperation. *Seatrade Maritime*. URL: <https://www.seatrade-maritime.com/sustainability/cma-cgm-and-sippg-ink-long-term-onshore-power-cooperation> (accessed 25.12.2025).
14. Borgøy: the world's first LNG-fueled tug. *MarineLink*. URL: <https://www.marinelink.com/news/lngfueled-worlds-first364856.aspx#> (accessed 25.12.2025).
15. Reutskii A.S. Osobennosti proektirovaniya sudov-bunkerovshchikov szhizhennym prirodnym gazom [Design peculiarities of LNG bunkering ships: PhD thesis] / St. Petersburg State Marine Technical University. 2021. 346 p. EDN CCFESV.
16. First methanol-fueled tug launches at port of Antwerp. *The Maritime Executive*. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/first-methanol-fueled-tug-launches-at-port-of-antwerp> (accessed 25.12.2025).
17. NYK completes world's first commercial-use ammonia-fueled vessel. *The Maritime Executive*. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/nyk-completes-world-s-first-commercial-use-ammonia-fueled-vessel> (accessed 25.12.2025).
18. Guinness world record for power set by Damen-built electric tug in UAE. *The Maritime Executive*. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/guinness-world-record-for-power-set-by-damen-built-electric-tug-in-uae> (accessed 25.12.2025).
19. The role of LNG in emission reduction: Exploring the potential and limitations of LNG as a transition fuel for the shipping industry. *Diverse Daily*. URL: <https://diversedaily.com/the-role-of-lng-in-emission-reduction-exploring-the-potential-and-limitations-of-lng-as-a-transition-fuel-for-the-shipping-industry/> (accessed 25.12.2025).
20. Ivanov G. Efficient application range of electric cargo ships. *International Journal of Maritime Engineering*. 2023. Vol. 165, No. A1. P. 1–10.
21. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Determining reasonability criteria for climate projects in water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 16–22. EDN ZURMGR. (In Russ.)
22. Federal Law No 296 On Limiting Greenhouse Gas Emissions, of July 2, 2021.
23. Minhazul Islam, Saad Alif-A. Zaman, Md Mashiur Rahaman. Concept of an electric-powered passenger vessel in Bangladesh. *Journal of Maritime Research*. 2023. Vol. 20, No. 3. P. 68–71.
24. Koričan M., Frković L., Vladimir N. Electrification of fishing vessels and their integration into isolated energy systems with a high share of renewables. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 425. P. 138997
25. Percić M., Koričan M., Jovanović I., Vladimir N. Environmental and economic assessment of batteries for marine applications: Case study of all-electric fishing vessels. *Batteries*. 2024. Vol. 10, Issue 7. DOI 10.3390/batteries10010007.
26. A "green fleet" for Lake Baikal: The keel of the Baikal project's electric cruise ship is laid. *Vodokhod*. URL: <https://vodokhod.com/about/news/zelenyy-flot-dlya-baykala-zalozhen-kil-kruiznogo-elektrosudna-proekta-baykal/> (accessed 25.12.2025).
27. Koumentakos A.G. Developments in electric and green marine ships. *Applied System Innovation*. 2019. Vol. 2, No. 4. P. 34.
28. Roy R.B., Alahakoon S., Janse Van Rensburg P., Basher E. et al. Impact analysis on distribution network due to coordinated electric ferry charging. *IET Energy Systems Integration*. 2024. Vol. 6, No. 4. P. 638–663.
29. Vasiliev A.A., Ovchinnikov K.D. Analysis of design characteristics of ice-class supply vessels with alternative energy sources. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 1, part 1. P. 11–19. (In Russ.)

30. RSD Tug 2513 Electric. *Damen Shipyards Group*. URL: <https://www.damen.com/vessels/tugs/electric-tugs/rsd-tug-2513-electric#specifications> (accessed 25.12.2025).
31. Nakopiteli energii NE-650-160 [Energy storage devices NE-650-160]. *ECS SKO*. URL: <https://ecs-sko.ru/catalog/equipment/detail/nakopiteli-energii-ne-650-160/> (accessed 25.12.2025).
32. [Goszakupki: Kharakteristiki buksira moshchnost'yu ~2800 kVt] [Public procurement: Characteristics of a ~2800 kW tugboat]. *EIS Zakupki [Unified information system for procurement]*. URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok504/view/documents.html?regNumber=0172200002519000078> (accessed 25.12.2025).
33. Resolution MEPC.376(80) (adopted on 7 July 2023): Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA guidelines).
34. ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels.
35. Nikolaev N.I., Gerasidi V.V., Lisachenko A.V. Modern high-speed engines CAT 3500 series of marine tugs analysis of loads experimental data. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2014. No. 6(28). P. 49–55.
36. SP 350.1326000.2018 Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov [Code 350.1326000.2018 Norms for technological design of sea ports]. Moscow: Standartinform, 2018. (In Russ.)
37. Bossche M. van den, Janse R., Jong O. de, Mehmood U. Economic impact of the European towage sector. Rotterdam, 29 October 2019.
38. Rotterdam bunker fuel price. *OilMonster*. URL: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/west-northern-europe/rotterdam/133> (accessed 25.12.2025).
39. Rotterdam bunker prices. *Ship & Bunker*. URL: <https://www.shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam> (accessed 25.12.2025).
40. Stoimost' bunkernogo topliva po itogam noyabrya 2023 goda [Bunker fuel prices as of November 2023]. *FSA*. URL: <https://fsarf.ru/analytics/stoimost-bunkernogo-topliva-po-itogam-noyabrya-2023-goda/> (accessed 25.12.2025).
41. Wang H., Aung M.Z., Xu X., Boulougouris E. Life cycle analysis of hydrogen powered marine vessels — Case ship comparison study with conventional power system. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 17. P. 12946. DOI 10.3390/su151712946.
42. Spisok stran Evropy po stoimosti elektroenergii [List of European countries by electricity cost]. *Wikipedia*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_Европы_по_стоимости_электроэнергии/ (accessed 25.12.2025).
43. Tsena na elektroenergiyu dlya biznesa po sub'ektam RF [Electricity prices for businesses by region of the Russian Federation]. *AO Gazprom Energosbyt*. URL: <https://energobyt.gazprom.ru/> (accessed 06.04.2026).

Статья поступила в редакцию 26.01.2026.

Принята к публикации 24.02.2026.



УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.61
EDN MFZHOD

ОБЗОР ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

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

Е.В. Бабчук, гл. специалист, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: babchuk.ev@rs-class.org

Н.Ю. Родионов, ст. эксперт, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: rodionov.ni@rs-class.org

А.О. Березин, д-р. экон. наук, профессор, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: berezin.ao@rs-class.org

В статье представлен анализ ключевых проблем развития Северного морского пути (СМП) как международной транзитной трассы, основанный на отчете Российской Федерации для рабочей группы ЭСКАТО. Авторы выделяют шесть основных категорий вызовов: природно-климатические (ледовая обстановка, короткая навигация, дрейфующий лед), инфраструктурные и логистические (неразвитость портов, нехватка спасательных средств), технологические и навигационные (зависимость от ледоколов, проблемы связи), экономические и финансовые (высокая стоимость, непредсказуемость сроков), административные и нормативные (разрешения, тарифы), а также экологические (запрет на НФО, риски загрязнения). Подробно рассмотрены меры по их преодолению: развитие атомного ледокольного флота (проекты 22220 и 10510 «Лидер»), выдача ледовых паспортов для судов, модернизация портовой инфраструктуры (Сабетга, Мурманск), создание интегрированной транспортной сети («Северный широтный ход»), внедрение систем мониторинга («Арктика-М», «Сфера»), льготные режимы в Арктической зоне РФ для привлечения инвестиций, а также экологические инициативы (ликвидация накопленного ущерба, охраняемые территории). Уделено внимание технологическим решениям, таким как суда двойного действия и тренажеры для экипажей. В выводах подчеркивается, что СМП успешно решает внутренние задачи, но для международного транзита требуется дальнейшее наращивание флота, инфраструктуры и международного сотрудничества. Несмотря на усилия, конкурентоспособность СМП ограничена по сравнению с южными маршрутами. Статья ориентирована на специалистов в области арктического судоходства, логистики и политики, предлагая основу для стратегического планирования.

Ключевые слова: Северный морской путь, Арктика, ледовая навигация, транзитное судоходство, инфраструктура, ледовые условия, ледокольный флот, экономические риски, экологические нормы, административные барьеры.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Проблемы развития Северного морского пути / А.С. Реуцкий, Е.В. Бабчук, Н.Ю. Родионов, А.О. Березин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 91–109. — EDN MFZHOD.

PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT OF THE NORTHERN SEA ROUTE: AN OVERVIEW

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

E.V. Babchuk, Chief Specialist, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: babchuk.ev@rs-class.org

N.Yu. Rodionov, Senior Expert, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: rodionov.ni@rs-class.org

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

The article presents an analysis of the key problems of the development of the Northern Sea Route (NSR) as an international transit route, based on the report of the Russian Federation to the ESCAP working group. The authors identify six main categories of challenges: natural and climatic (ice conditions, short navigation, drifting ice), infrastructural and logistical (lack of ports, lack of rescue equipment), technological and navigational (dependence on icebreakers, communication problems), economic and financial (high cost, unpredictable timing), administrative and regulatory (permits, tariffs), as well as environmental (prohibition of HFO, pollution risks). The measures to overcome them were considered in detail: the development of the nuclear icebreaking fleet (projects 22220 and 10510 "Leader"), the issuance of ice passports for ships, the modernization of port infrastructure (Sabetta, Murmansk), the creation of an integrated transport network ("Northern Latitudinal Passage"), the introduction of monitoring systems ("Arctic-M", "Sphere"), preferential treatment in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) to attract investment, as well as environmental initiatives (elimination of accumulated damage, protected areas). Attention is paid to technological solutions such as double-acting ships and crew simulators. The conclusions emphasize that the NSR is successfully solving internal problems, but further expansion of the fleet, infrastructure and international cooperation is required for international transit. Despite the efforts, the competitiveness of the NSR is limited compared to the southern routes. The article is aimed at experts in the field of Arctic shipping, logistics and politics, offering a framework for strategic planning.

Keywords: *Northern Sea Route, Arctic, ice navigation, transit navigation, infrastructure, ice conditions, icebreaking fleet, economic risks, environmental regulations, administrative barriers.*

For citation: Reutskii A.S., Babchuk E.V., Rodionov N.Yu., Berezin A.O. Problems of the development of the Northern Sea Route.: An Overview *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 90–109. EDN MFZHOD. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент использование СМП в качестве трассы для обеспечения внутренней потребности страны и снабжения оффшорных проектов, а также вывоза сырья развивается достаточно гармонично: грузопоток с этих проектов растет, появляются новые суда с ледовыми усилениями, способные работать круглогодично на маршрутах СМП. Таким образом, *внутренние задачи* СМП закрываются в полной мере. Однако использование потенциала СМП как *международной транзитной трассы* сталкивается с теми же самыми проблемами, но в совершенно другом масштабе. В настоящий момент влияние этих проблем на грузопоток отсутствует или незначительно, они рассматриваются лишь в контексте будущего увеличения транзитных проходов по СМП [1, 2]. Сгруппируем основные проблемы СМП в виде таблицы, и далее в тексте статьи они будут рассмотрены подробнее.

Таблица 1

Актуальные проблемы СМП для обеспечения международного транзита

№	Тип проблемы	Источник
1	Климатическая	Ледовые условия, короткая навигация, сложные метеоусловия, дрейфующий лед.
2	Инфраструктурная и логистическая	Неразвитость портовой инфраструктуры, нехватка аварийно-спасательных средств, ограниченные возможности снабжения, отсутствие альтернативных маршрутов и портов-укрытий.
3	Технологические и навигационные	Нехватка ледокольных судов и транспортных судов ледового класса, проблемы связи и навигации, неполные гидрографические данные на возможных маршрутах.
4	Экономические и финансовые	Высокая стоимость прохода из-за ледовых сборов и повышенных страховых ставок, непредсказуемость сроков прохода судов, отсутствие обратных грузопотоков из Азии в Европу.
5	Административные и нормативные барьеры	Необходимо получение разрешения Администрации СМП (ФГБУ «Главсевморпуть») для прохода по СМП, на определенных участках обязательна лоцманская проводка, требования к обязательному российскому страхованию гражданской ответственности судовладельца, изменчивость тарифов на ледокольную проводку и другие услуги.
6	Экологические	Ужесточение международных экологических норм: запрет на использование тяжелого судового топлива (HFO) в Арктике и запрет его транспортировки, отсутствие методов организации ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в ледовых условиях, давление со стороны экологических организаций, которые выступают против интенсификации судоходства в Арктике.

1. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ

Природно-климатические проблемы — это фундаментальный и непреодолимый (на текущем уровне технологий) вызов для транзитного судоходства по СМП [3]. Они формируют основу всех остальных сложностей — экономических, инфраструктурных и технологических.

Ледовая обстановка — главный и комплексный вызов. Ледовые условия, в которых оказывается судно, динамичны, сложны и часто непредсказуемы на длинном плече планирования. Так, по ходу движения судно приходится сталкиваться с молодым льдом (ниласом), однолетним, двухлетним и многолетним льдом (рис. 1). Многолетние паковые льды — самый опасный вид льда. Их толщина может превышать 3–4 м, они способны повредить даже суда высокого ледового класса. Такие льды дрейфуют, формируя торосы (нагромождения льда значительной высоты), которые являются абсолютным препятствием для морского транспорта.

Сезонная и межгодовая изменчивость ледовой обстановки. Потепление в Арктике — не линейный процесс [4], ледовая обстановка сильно меняется от года к году. Например, в один год Восточный сектор СМП (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское) в августе может очиститься, а в другой — остаться заблокированным льдом. Эта непредсказуемость сильно вредит логистике перевозок, требующей круглогодичного обеспечения грузопотока в рамках жестких графиков.



Рис. 1. Молодой лед (нилас) (а), многолетний лед (б) и ледяные торосы (в) [5–7]

Дрейфующий лед. Даже в период минимального ледового покрытия арктические моря не свободны. Ветры и течения гонят массы битого льда, перекрывая проложенные каналы. Судно, идущее без ледокола, может быть заблокировано или получить повреждения. Несмотря на изменение климата, льды (особенно многолетние паковые льды) остаются главным препятствием. Их распределение часто непредсказуемо и сильно варьируется в зависимости от сезона и года. Дрейфующие льды и айсберги (рис. 2) создают постоянную угрозу для судов в Арктике.

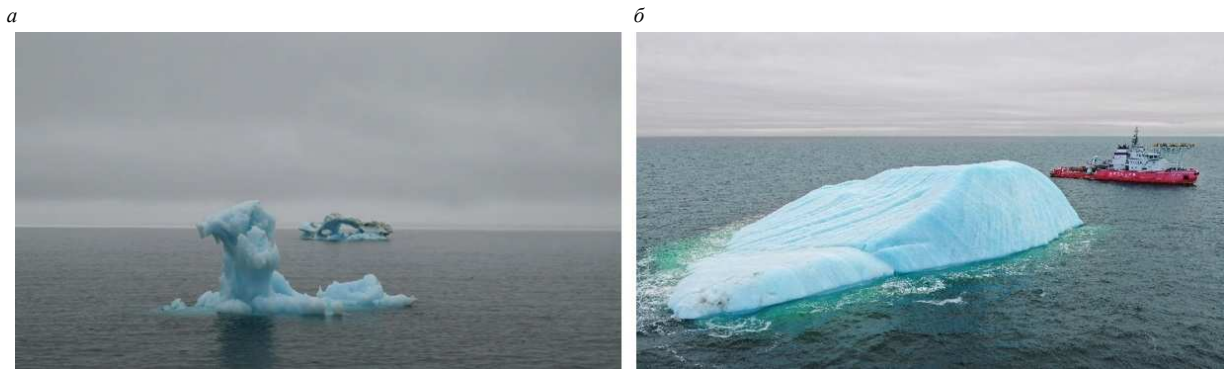


Рис. 2. Дрейфующий многолетний арктический лед вблизи Мурманска (а) [8] и айсберг (б) [9]

Непродолжительная навигация. Период относительно свободного ото льда плавания на большей части СМП длится всего 2–4 месяца [10]. Так, например, в 2024 г. этот период составил всего 31 день (рис. 3), а большую часть года сквозной проход по СМП закрыт для судов, не имеющих ледового класса.

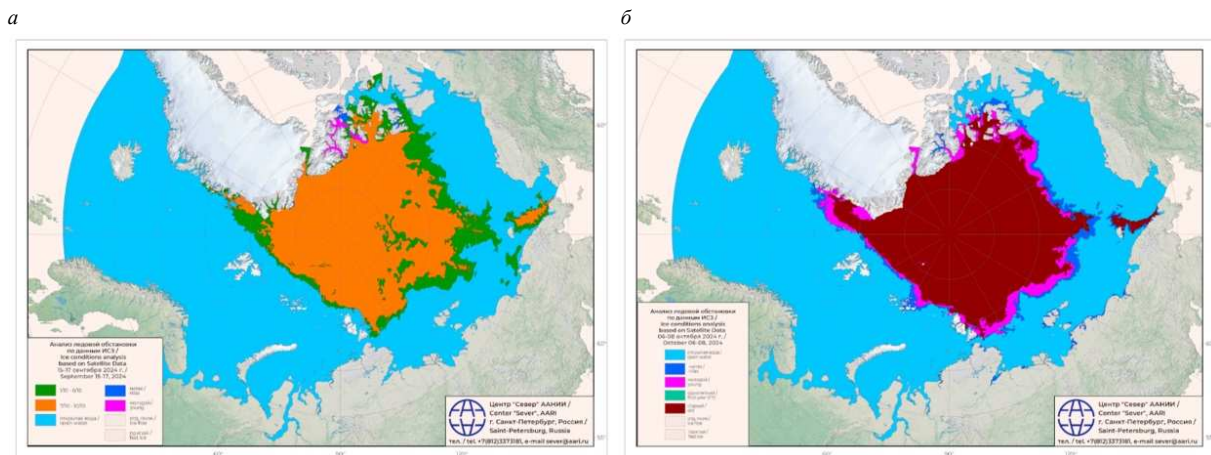


Рис. 3. 17.09.2024 — первый день без льда на СМП в 2024 г. (а);
18.10.2024 — последний день без льда на СМП в 2024 г. (б) [11]

Сложные метеоусловия. Туманы, штормы, низкие температуры, полярная ночь осложняют навигацию, увеличивают риски и усталость экипажей. Сочетание опасных влажности, отрицательной температуры и значительной силы ветра приводит к обледенению судов — опасному явлению, когда надводные конструкции судна покрываются значительным количеством льда, что может привести к нарушению его устойчивости и, в исключительных случаях, к опрокидыванию судна (рис. 4).



Рис. 4. Обледенение судов

Таким образом, целью статьи является представление результатов анализа существующих проблем организации круглогодичного грузового трафика по Северному морскому пути в контексте его развития как международной транзитной трассы и выявление ключевых мер по их преодолению для обеспечения устойчивого роста. Для цели статьи решаются следующие задачи:

- классификация и подробное описание основных проблем СМП, включая природно-климатические, инфраструктурные, технологические, экономические, административные и экологические аспекты;
- анализ мер борьбы с этими вызовами (развитие ледокольного и транспортного флота, выдача ледовых паспортов, модернизация инфраструктуры, внедрение систем мониторинга и навигации, а также экономические стимулы);
- оценка эффективности существующих подходов, включая государственно-частное партнерство, специальные режимы Арктической зоны РФ (АЗРФ) и экологические инициативы;
- обобщение выводов о перспективах СМП, приоритетных направлениях развития и факторах, влияющих на его конкурентоспособность в глобальной логистике.

2. БОРЬБА С ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИМИ ВЫЗОВАМИ

Решение приведенных выше проблем представляет собой комплексную задачу по адаптации, прогнозированию, технологическому превосходству и административному регулированию (рис. 5). Для России и СМП это критически важно для увеличения срока навигации и обеспечения ее предсказуемости.

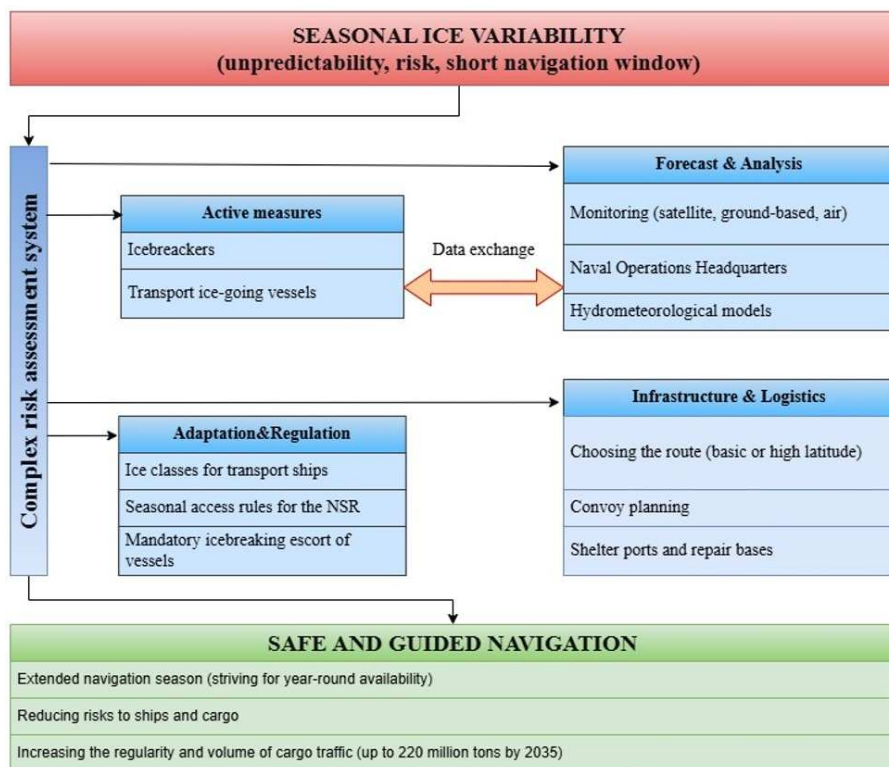


Рис. 5. Борьба с сезонной ледовой изменчивостью в Арктике

Технологическое лидерство: ледокольный флот — основной и наиболее эффективный способ преодоления ледовых «преград». Атомные ледоколы проекта 22220 («Арктика», «Сибирь», «Урал» и др.) благодаря своим характеристикам (мощность на валах 60 МВт, ширина корпуса 34 м) позволяют выполнять проводки судов во льдах толщиной до 3 м. Это достигается путем формирования «ледовых каналов» для караванов транспортных судов (рис. 6а).

В свою очередь на трассах СМП эксплуатируются специализированные транспортные суда, имеющие ледовые классы, в том числе суда двойного действия (DAS): например, газовозы типа «Кристоф де Маржери» (рис. 6б) могут идти кормой вперед в ледовых условиях, воздействуя на ледяной покров работой движительно-рулевого комплекса в дополнение к традиционному методу разрушения льда изгибом [12, 13]. Это повышает их показатели ходкости во льдах и снижает зависимость от ледовой проводки.

Строящийся в настоящий момент ледокол «Лидер» (проект 10510) мощностью на валах 120 МВт и шириной 47,7 м позволит преодолевать лед толщиной до 4,3 м и круглогодично поддерживать безопасную навигацию в восточном секторе СМП (рис. 6в).



Рис. 6. Атомный ледокол проекта 22220 «Арктика» [14] (а); СПГ-газовоз «Кристоф де Маржери» класса Arc7 [15] (б); ледокол «Лидер» проекта 10510 [16, источник: ЦКБ «Айсберг»] (в)

Адаптация транспортных судов — «правильный» ледовый класс. Не все суда должны быть ледоколами, но все суда должны быть адаптированы к ледовым условиям в зависимости от времени года и тяжести соответствующих ледовых условий. В настоящий момент выяснить способность судна, не имеющего ледового класса, преодолевать лед возможно при помощи специальной услуги, оказываемой несколькими организациями, в том числе Российским морским регистром судоходства, — разработки так называемого Ледового паспорта. Он представляет собой комплексное исследование параметров корпуса и пропульсивной установки судна, позволяющее оценить способность изначально не приспособленного для ледового плавания судна к безопасному проходу по СМП.

При этом проверяются нагрузки на борт судна (вертикальный/наклонный), производится оценка прочности при ледовом сжатии, определяются безопасные скорости движения. Методика определения допустимых и опасных скоростей хода судна в различных ледовых условиях базируется на расчете и сопоставлении строительной и ледовой прочности конструкций корпуса судна.

Допустимая скорость судна базируется на расчетах ледовой и фактической прочности корпуса судна. Достижимая скорость определяется ледовой ходкостью судна (в зависимости от характеристик льда,

мощности и обводов судна). Безопасная скорость судна в различных ледовых условиях определяется как минимальная из допустимой и достижимой скоростей.

Результатом проводимого исследования является заключение, представляющее собой диаграмму ледовой ходкости (рис. 7).

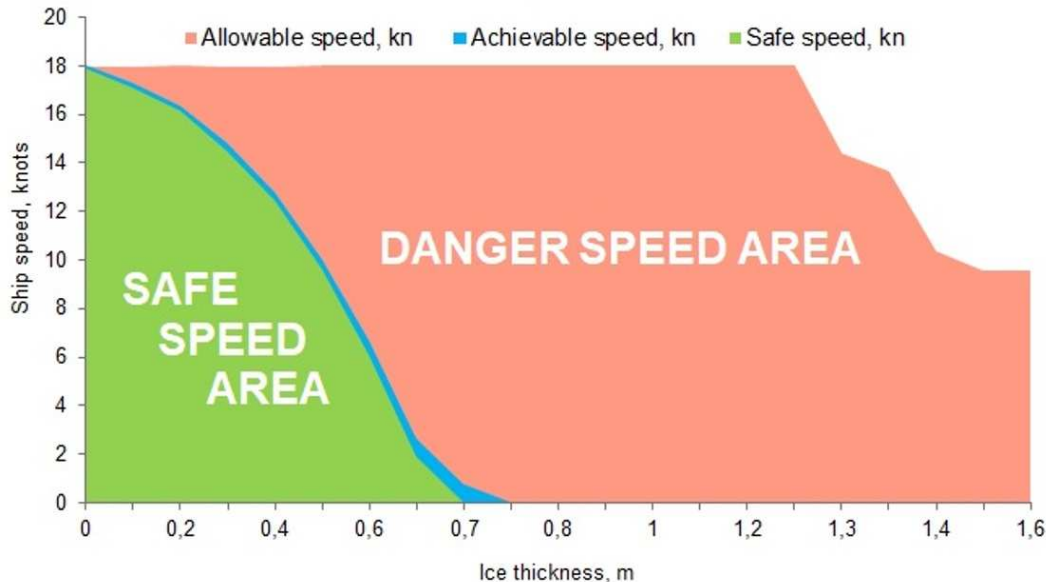


Рис. 7. Диаграмма опасных и безопасных скоростей движения судна в ледовых условиях

Дополнительно проводится анализ соответствия параметров энергетической установки исследуемого транспортного судна требованиям ледовых классов. Оценка соответствия мощности энергетической установки (ЭУ) требованиям Правил РС производится исходя из требований к мощности в рассматриваемых ледовых условиях, размерений судна и компоновки пропульсивной установки. Анализ соответствия элементов движительно-рулевого комплекса требованиям Правил РС выполняется на основе сопоставления фактических и требуемых размеров/характеристик элементов с учетом применяемых материалов и величин нагрузок. В основе требований к зубчатым передачам лежит величина соотношения допустимого и максимального крутящих моментов, возникающих на валах. Требования к системам ЭУ включают в себя анализ системы охлаждения и конструкцию кингстонных ящиков [17].

Таким образом, в результате комплексного исследования делается вывод о способности судна безопасно проследовать по СМП в определенных условиях. Ледовый паспорт (рис. 8) содержит ключевую информацию для безопасной эксплуатации судна во льдах. Он включает:

- анализ сценариев работы судна;
- сведения для определения достижимых и допустимых скоростей;
- оценку безопасных дистанций при буксировке ледоколом [18, 19];
- оценку прочности корпуса и характеристик энергетической установки;
- общие рекомендации для капитана.

Соблюдение Правил плавания по СМП. Доступ в акваторию зависит от ледового класса судна, сезона и ледового прогноза. Например, суда класса Arc7 могут ходить самостоятельно в ледовых условиях средней тяжести большую часть года. Российский морской регистр судоходства имеет правила и опыт освидетельствования в постройке и эксплуатации (рис. 9) специализированных судов с ледовыми усилениями. Их корпуса и энергетическая установка специальным образом подготовлены для эксплуатации в ледовых условиях, используются системы обогрева балластных цистерн, усиленные пропульсивные комплексы (винторулевые колонки [20], валопроводы с винтом фиксированного шага (ВФШ)). Это снижает риски повреждений и повышает надежность.

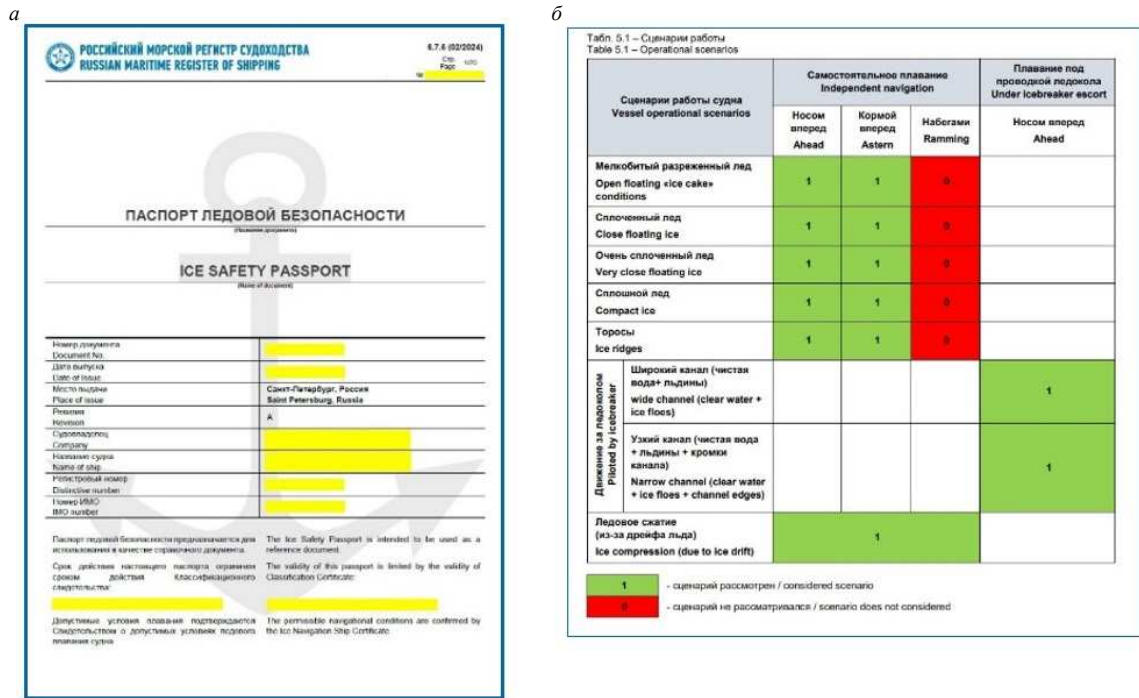


Рис. 8. Ледовый паспорт Российского морского регистра судоходства

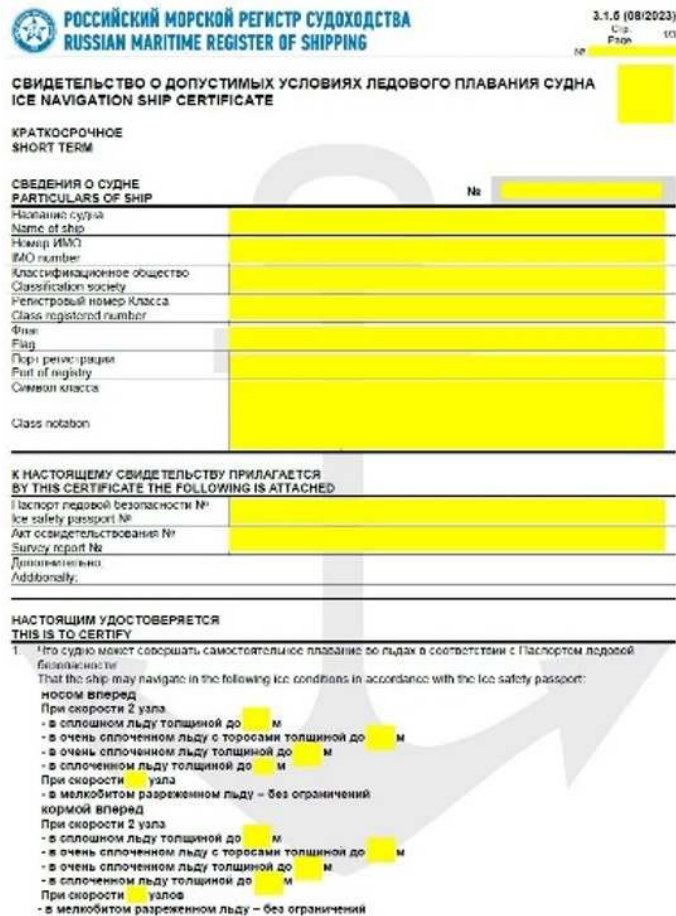


Рис. 9. Свидетельство о допустимых условиях ледового плавания судна, выданное Российским морским регистром судоходства

Управление логистикой и данными: прогнозы и диспетчеризация. Штаб морских операций (ШМО) Главсевморпути централизованно управляет движением судов по СМП (рис. 10), анализирует данные о ледовой обстановке. Составляет суточные планы движения караванов, выбирая оптимальный маршрут (традиционный, высокоширотный) в зависимости от ледовой обстановки. Назначает ледоколы и определяет тактику проводки. При благоприятных условиях ШМО направляет суда севернее традиционных путей, где льды могут быть тоньше или разреженнее, что сокращает время в пути.



Рис. 10. Презентация функционала Штаба морских операций Главсевморпути [21]

Правовое и административное регулирование. Правила запрещают судам низкого ледового класса заходить в Арктику в зимне-весенний период, что повышает безопасность судоходства, а лоцманская проводка повышает безопасность в сложных условиях.

Таким образом, стратегия обеспечения устойчивого судоходства в условиях сезонной ледовой изменчивости базируется на методологии комплексного управления рисками. Ее реализация через развитие специализированной ледокольной инфраструктуры, установление четких регламентов доступа и движение к круглогодичной навигации позволяет конвертировать экологические вызовы Арктики в фактор стратегического развития и экономической эффективности.

3. ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ И ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ

Неразвитость портовой инфраструктуры. Большинство арктических портов имеют ограниченные возможности по приему, обработке грузов, бункеровке и ремонту судов, особенно крупнотоннажных. Также положение осложняется тем, что большинство портов к востоку от Обской губы мелководные и недоступны к заходу крупнотоннажных судов.

Нехватка аварийно-спасательных средств. Большие расстояния и сложные условия делают спасательные операции крайне трудными и дорогими. Сеть спасательных центров разрежена. Из-за этого вблизи оффшорных объектов всегда находятся суда, несущие аварийно-спасательное дежурство (рис. 11), на трассах СМП эту функцию выполняют ледоколы. Количество их ограничено, а время прибытия может оказаться значительным (в случае самостоятельного следования транспортного судна без ледокольной проводки).

Ограниченные возможности снабжения судов. Присутствуют проблемы с доставкой топлива, провизии, запчастей в отдаленные районы трассы СМП.

Отсутствие альтернативных маршрутов и укрытий. На многих участках судам негде укрыться в случае аварии или ухудшения погодных условий.

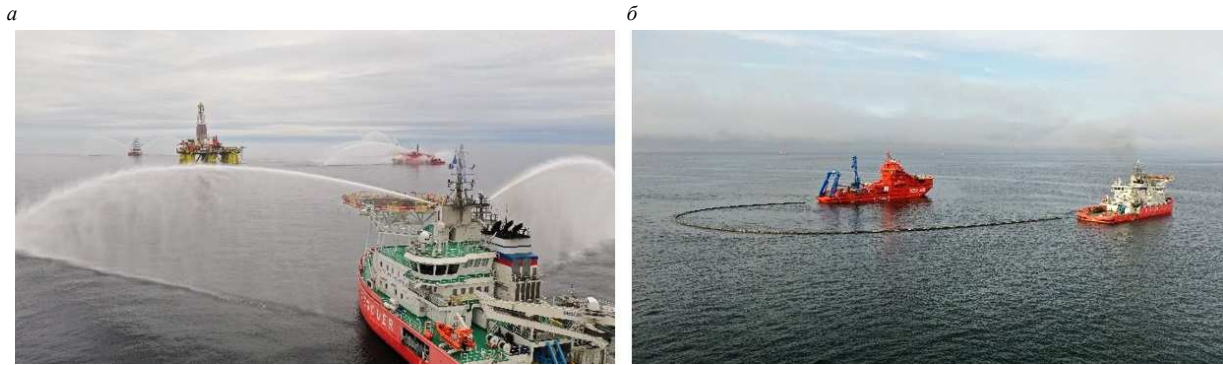


Рис. 11. Пожарные учения судов, несущих аварийно-спасательное дежурство (а), и отработка операций по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов с поверхности воды (б) [22]

4. БОРЬБА С ИНФРАСТРУКТУРНЫМИ И ЛОГИСТИЧЕСКИМИ ВЫЗОВАМИ В АРКТИКЕ

В контексте развития СМП трудности инфраструктурного развития и логистики решаются в рамках системного государственного подхода, благодаря крупным инвестициям и технологическим решениям. Проблемы носят комплексный характер: удаленность, экстремальный климат, вечная мерзлота, отсутствие наземной транспортной сети, высокая стоимость строительства и логистики (рис. 12).

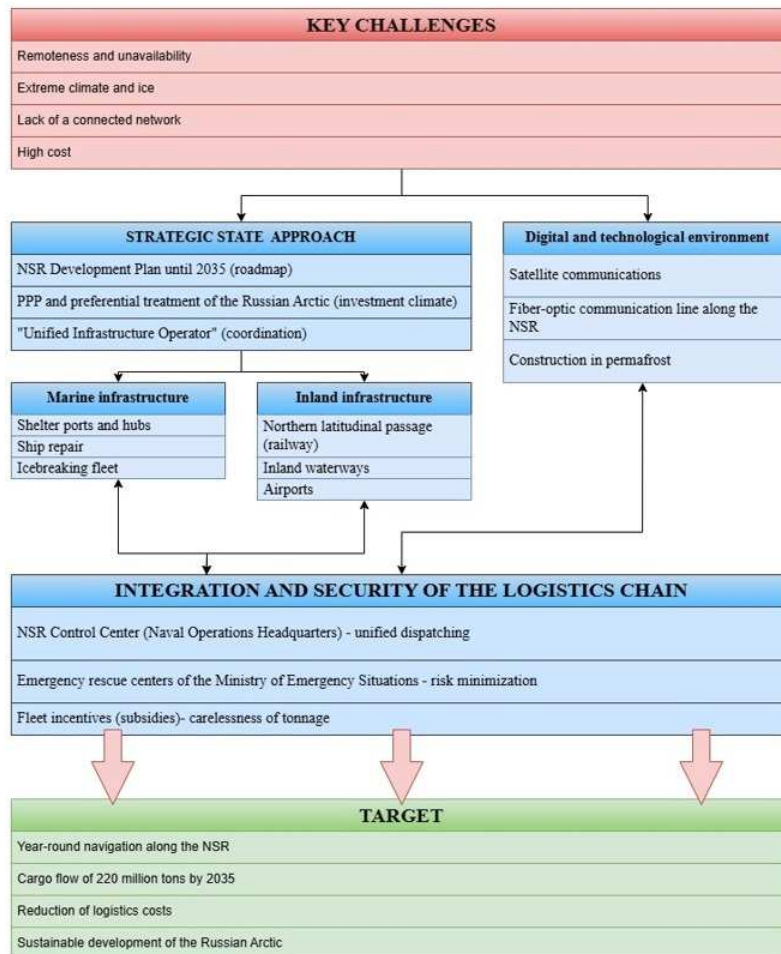


Рис. 12. Борьба с инфраструктурными и логистическими вызовами в Арктике

Государственно-частное партнерство (ГЧП). Крупнейшие проекты («Ямал СПГ», «Арктик СПГ 2», «Восток Ойл») реализуются с привлечением средств госкомпаний («Росатом», «Новатэк», «Роснефть», «Газпром») и частных инвесторов, включая иностранных (Китай, Индия).

Специальные режимы. Создание Арктической зоны Российской Федерации с льготным налоговым и административным режимом (например, «арктический гектар», нулевая ставка налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ), ускоренная амортизация) для привлечения бизнеса.

Развитие опорной инфраструктуры: порты и хабы. Портовая инфраструктура АЗРФ развивается по дифференцированной стратегии. Мурманск формируется как многофункциональный незамерзающий хаб Западной Арктики, включающий базирование атомного ледокольного флота и судоремонтные мощности. Специализированный морской порт Сабетта создан для обеспечения логистики крупных промышленных проектов («Ямал СПГ», «Арктик СПГ 2») по схеме «порт — завод». Параллельно ведется модернизация существующих арктических портов (Дудинка, Диксон, Певек, Тикси), направленная на увеличение их пропускной способности и продление навигационных периодов. Ведется строительство новых портовых пунктов для обслуживания месторождений (например, «Ворота Арктики» для Новопортовского месторождения).

Создание интегрированной транспортной сети. Ключевой задачей является интеграция разрозненных видов транспорта — морского, речного и наземного. Ведется модернизация судоходных частей рек Обь, Енисей, Лена (дноуглубление, навигационное оборудование) для обеспечения завоза грузов в порты СМП и функционирования единой транспортной сети. Реализуется стратегический проект «Северный широтный ход», создающий сухопутный коридор, связывающий Урал, Мурманск и порты Обской губы, что обеспечит синергию с морскими маршрутами. Развивается сеть аэропортов, в том числе с ледовыми взлетно-посадочными полосами, с целью организовать оперативные пассажирские и грузовые перевозки, а также обеспечить аварийно-спасательные функции.

Технологии для экстремальных условий. Для строительства на вечной мерзлоте используются свайные фундаменты, термостабилизаторы (охлаждающие грунт устройства) для предотвращения оттаивания грунта под объектами. Крупные объекты (заводы, жилые комплексы) собираются из модулей, доставленных по морю, что снижает стоимость и сроки работ на месте. Развивается система спутников для связи и мониторинга «Арктика-М». Ведется прокладка подводных волоконно-оптических линий связи (например, «Росатом-Арктика» вдоль СМП) для обеспечения навигации, связи и передачи данных.

Обеспечение логистической эффективности и безопасности. Функции Главсевморпути и «Росатома» как инфраструктурного оператора позволяют централизованно управлять ледокольной проводкой, движением судов, сбором платежей. Вдоль побережья разворачиваются аварийно-спасательные центры МЧС Российской Федерации, оснащенные ледокольными и аварийно-спасательными судами.

Российская Федерация решает проблемы инфраструктурного развития и логистики в Арктике через создание целостной управляемой системы. Эта система основана на государственном планировании, синхронизации морской, речной и наземной составляющих, внедрении специальных технологий и создании привлекательных условий для масштабных инвестиций. Главная цель — трансформировать географические и климатические барьеры в управляемые затраты, сделав Арктику зоной устойчивого экономического роста.

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ ВЫЗОВЫ

Зависимость от ледокольной проводки. Для безопасного транзита в ледовых условиях большинству судов необходима проводка атомными или дизель-электрическими ледоколами, что создает «узкое место» в логистике.

Ледокольная проводка подразумевает движение судов за ледоколами тремя методами:

- метод лидирования (рис. 13а);
- метод буксировки вплотную («на усах») (рис. 13б);
- метод буксировки на коротком буксире в канале в припайных льдах (рис. 13в).



Рис. 13. Основные способы осуществления ледовой проводки в Арктике: а — метод лидирования; б — метод буксировки вплотную («на усах»); в — метод буксировки на коротком буксире в канале в припайных льдах

Опыт ледокольных проводок используемого в настоящее время в акватории СМП грузового флота выявил ряд конструктивных и технологических проблем, снижающих эффективность применения ледоколов и, как следствие, влияющих на эффективность и безопасность самой морской перевозки.

К таким технологическим и конструктивным проблемам возможно отнести:

- полные носовые объемы транспортного судна, собирающие ледяную крошку перед судном и снижающие скорость его буксировки;
- выступающие якорные клюзы и якоря транспортного судна, препятствующие его буксировке вплотную к ледоколу;
- низкую энерговооруженность транспортного судна, затрудняющую как его маневрирование в канале за ледоколом, так и его самостоятельное движение;
- наличие у транспортного судна носового бульба, делающего невозможной буксировку вплотную и повышающего риски повреждения его корпуса и корпуса ледокола при маневрировании;
- отсутствие соответствующих усилений носовой оконечности транспортного судна в районе его стыковки с ледоколом при буксировке вплотную, приводящее к повреждению носовой оконечности транспортного судна;
- истончение металла из-за большого возраста эксплуатируемых судов и, как следствие, риск повреждения корпуса при действии ледовых нагрузок.

Для соблюдения безопасной и эффективной ледовой проводки в акватории СМП грузовое судно должно соответствовать определенным параметрам.

Для судов, нуждающихся в ледокольной проводке лидированием:

- длина судна не более 257 м;
- ширина судна не более 35 м;
- ледопроездимость судна в расчетных ледовых условиях должна быть подтверждена расчетами или модельными испытаниями;
- прочность корпусов судов возрастом более 15 лет должна быть подтверждена расчетами с учетом фактических остаточных толщин.

Для судов, нуждающихся в буксировке вплотную:

- ширина судна не более 35 м;
- водоизмещение не более 35 000 т;
- форма и конструкция носовой оконечности грузового судна должна обеспечивать надежное и безопасное размещение в кормовой выемке буксирного выреза ледокола;
- буксирно-швартовное устройство грузового судна должно соответствовать буксирному устройству ледокола;
- прочность корпусов судов возрастом более 15 лет должна быть подтверждена расчетами с учетом фактических остаточных толщин.

Необходимость того или иного метода ледокольной проводки должна быть определена по результатам соответствующих расчетов или испытаний.

Нехватка судов ледового класса. Круглогодичный транзит по СМП требует судов высокого ледового класса (преимущественно Arc7), строительство и эксплуатация которых обходится судовладельцам значительно дороже.

Проблемы связи и навигации. Несмотря на развитие проекта спутников «Сфера», на высоких широтах остаются проблемы со стабильным спутниковым покрытием, интернетом и точными навигационными данными в реальном времени.

Неполные гидрографические данные. Хотя работы по обследованию морского дна в обозначенных районах ведутся, акватория до сих пор недостаточно изучена, особенно в части рельефа дна, что требует от судов движения по узким обследованным коридорам.

6. БОРЬБА С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ВЫЗОВАМИ

Борьба с технологическими и навигационными проблемами в Арктике — это создание специализированных технологических систем и регламентов, которые компенсируют экстремальные условия: слабую спутниковую связь, отсутствие точных карт, тяжелые ледовые условия и человеческий фактор (рис. 14).

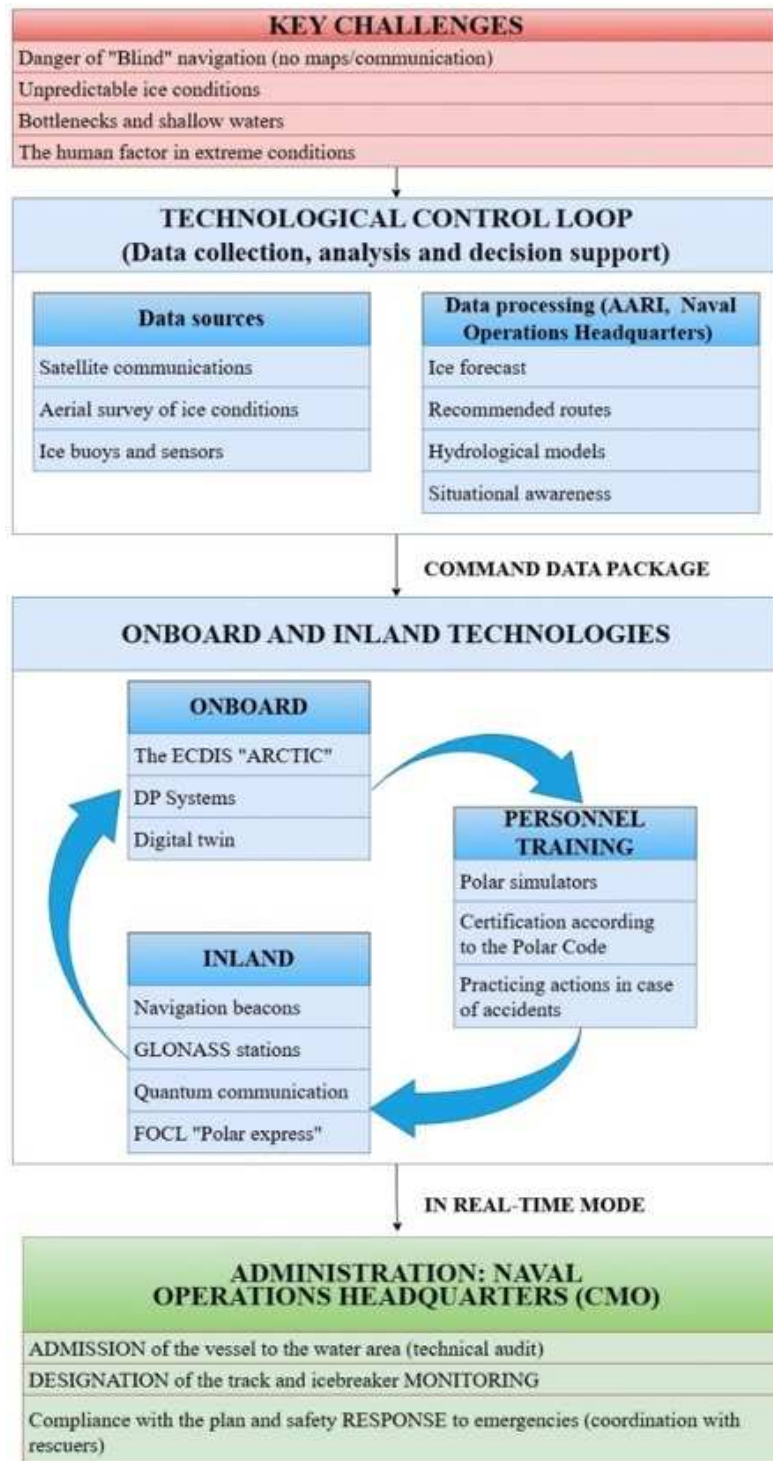


Рис. 14. Борьба с технологическими вызовами в Арктике

Высокоточное прогнозирование и мониторинг ледовой обстановки как основа арктической навигации необходимы, так как ледовая обстановка непредсказуема и меняется ежедневно. Российская гидрометеорологическая спутниковая группировка «Арктика-М» и данные иностранных спутников в режиме, близком к реальному времени, отслеживают:

- границу и концентрацию льда;
- направление и скорость дрейфа;
- образование трещин и разводий.

Дрейфующие буи и подводные глайдеры (автономные средства) измеряют температуру, соленость и толщину льда.

Гидродинамические модели (например, от Арктического и антарктического НИИ) на основе Big Data прогнозируют ледовую обстановку на 3–7–10 суток [22].

Стандартный GPS/GNSS на высоких широтах работает с перебоями, спутниковая связь (Iridium) дорогая и с низкой пропускной способностью. Развивается применение в высоких широтах российской системы ГЛОНАСС. Ведется развертывание кругополярной спутниковой группировки «Сфера» для высокоскоростной связи и навигации.

Наземные радионавигационные системы. В критических районах (подходы к портам, узкие проливы) устанавливаются дифференциальные станции (РСДН-20) и радиомаяки, не зависящие от спутников.

Квантово-оптическая связь и волоконно-оптические линии связи ВОЛС. В настоящий момент прокладываются подводные ВОЛС (проект «Полярный экспресс») для стабильного интернета в поселках и портах. Тестируется квантовая радиосвязь, устойчивая к арктическим помехам.

Электронные картографические навигационно-информационные системы (ЭКНИС) обязательны для оснащения судов. Постоянно обновляемые цифровые карты с учетом изменений глубин (из-за таяния вечной мерзлоты на побережье) и навигационных опасностей.

Подготовка кадров и моделирование чрезвычайных ситуаций. Специализированные тренажерные центры (например, в Государственном университете морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова) используют полномасштабные имитаторы ледового плавания, воспроизводящие поведение судна во льдах, работу с ледоколом.

Капитаны и вахтенные офицеры для работы на СМП должны проходить специальные курсы и иметь соответствующее свидетельство [19].

7. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ФИНАНСОВЫЕ ВЫЗОВЫ

Высокая стоимость. Ледокольный сбор, услуги лоцманов (при обязательной лоцманской проводке в ряде районов), высокая страховка (премии за «ледовый риск»), необходимость использовать суда ледового класса делают транзит экономически неконкурентным по сравнению с Суэцким каналом для большинства типов грузов.

Непредсказуемость сроков. Ледовая обстановка может сильно замедлить переход, делая сроки доставки ненадежными, что критично для современных логистических схем.

Отсутствие обратных грузопотоков. Грузы идут в основном с востока на запад (из Азии в Европу), а обратное направление слабо загружено, что увеличивает стоимость рейса в одном направлении.

8. БОРЬБА С ЭКОНОМИЧЕСКИМИ И ФИНАНСОВЫМИ ВЫЗОВАМИ

Для преодоления высоких экономических рисков освоения Арктики формируется многоуровневая система государственной поддержки и специальных финансовых механизмов (рис. 15).

Основу этой системы составляют прямые бюджетные инвестиции в стратегическую инфраструктуру: атомный ледокольный флот, гидрометеорологическое обеспечение, базовые портовые мощности и магистрали, такие как Северный широтный ход. Дополнительно применяются субсидии на ледокольную проводку и портовые сборы, а также государственные гарантии и специализированное арктическое страхование для защиты от специфических рисков.

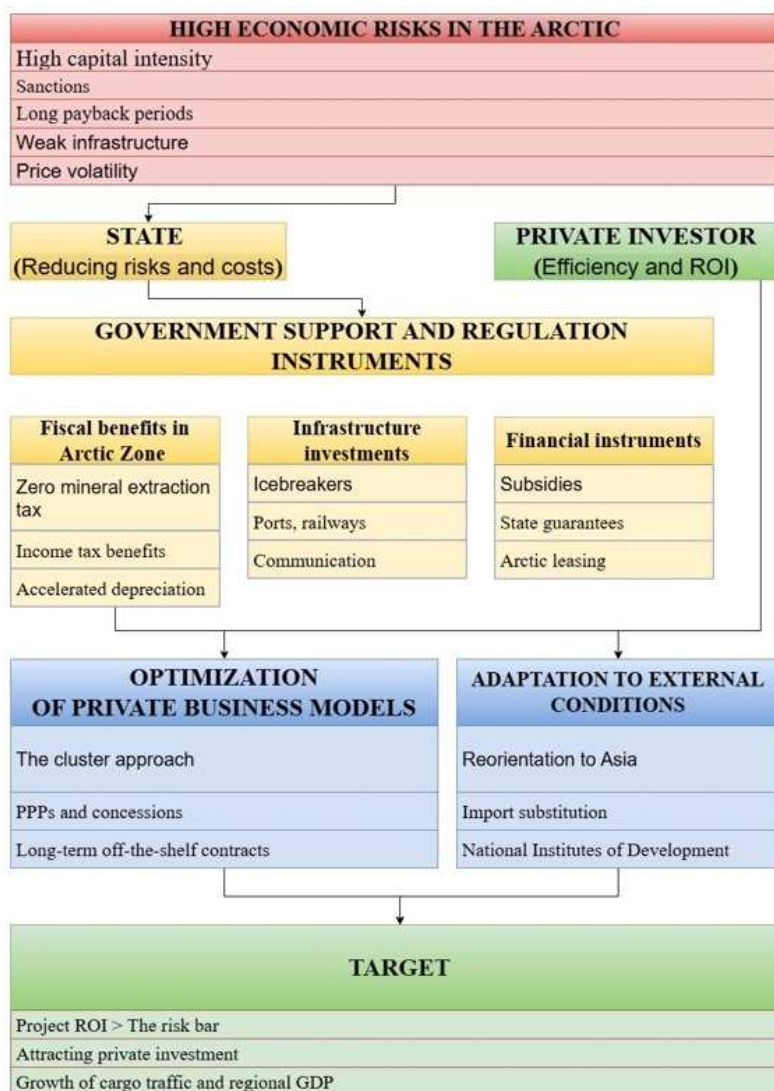


Рис. 15. Борьба с экономическими вызовами в Арктике

Краеугольным камнем привлечения частного капитала выступает специальный налогово-бюджетный режим АЗРФ. Он включает радикальные меры, такие как нулевая ставка НДС на новые шельфовые проекты, льготные ставки налога на прибыль, инвестиционные налоговые вычеты, режим свободной таможенной зоны и ускоренную амортизацию, что в совокупности значительно повышает рентабельность вложений.

Важную роль играют механизмы государственно-частного партнерства, включая концессионные соглашения и юридические гарантии для инвесторов. Крупные госкорпорации («Росатом», «Роснефть», «Новатэк») выступают в качестве якорных инвесторов, привлекая софинансирование, в том числе от партнеров из дружественных стран.

В ответ на санкционное давление осуществляется переориентация на азиатские рынки с привлечением финансирования в альтернативных валютах, а также активизация национальных институтов развития. Параллельно реализуется политика импортозамещения критических технологий для обеспечения устойчивости цепочек поставок.

Для повышения общей экономической эффективности используется кластерный подход, объединяющий смежные производства, и делается ставка на развитие сервисной экономики с высокой добавленной стоимостью — арктического судоремонта, логистики и экологического мониторинга, что диверсифицирует экономику региона.

Преодоление экономических и финансовых проблем освоения Арктики обеспечивается за счет формирования комплексной системы государственных преференций и финансовых инструментов, призванной компенсировать повышенные риски и капиталоемкость проектов. Ключевыми элементами данной

системы являются специальный налоговый режим АЗРФ, прямое софинансирование стратегической инфраструктуры, механизмы ГЧП, а также поддержка национальных финансовых институтов развития. Параллельно осуществляется адаптация бизнес-моделей через кластеризацию производств, заключение долгосрочных контрактов и диверсификацию источников финансирования и сбыта на рынки дружественных стран. Совокупность этих мер направлена на достижение приемлемого уровня доходности для частных инвестиций при реализации стратегических государственных задач в регионе.

9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ И ДАВЛЕНИЕ СО СТОРОНЫ ПРАВООЩИТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Ужесточение экологических норм. Запрет на использование и перевозку НФО в качестве судового топлива (с исключениями для судов с защищенными топливными танками) в Арктике вводится с 2024 г. в рамках Полярного кодекса Международной морской организации (ИМО). Этот запрет фактически делает невозможным транзитный переход по СМП для большинства современных судов. В настоящий момент три страны: Российская Федерация, Канада и Финляндия — не приняли данное требование до особого распоряжения их морских администраций.

Риск загрязнения. Любая авария в хрупкой арктической экосистеме может иметь катастрофические последствия и привести к штрафам, ужесточению регулирования и репутационным потерям. Это приводит к давлению со стороны экологических организаций, которые выступают против интенсификации судоходства в Арктике.

10. БОРЬБА С ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ВЫЗОВАМИ

Борьба с экологическими проблемами в Арктике требует комплексного подхода, учитывающего хрупкость экосистем, возрастающую антропогенную нагрузку и эффект климатических изменений. Приведем ниже ключевые направления и меры.

Предотвращение и минимизация загрязнений. Строгое регулирование судоходства, соблюдение Полярного кодекса ИМО и МАРПОЛ, запрещающих сброс любых отходов (нефтепродуктов, льяльных вод, мусора). Поэтапный отказ от использования и перевозки тяжелого мазута (НФО) — основного источника сажи, ускоряющей таяние льда. Технологии «нулевого сброса» для судов: оснащение судов современными системами очистки балластных вод и т.д. Разработка системы предотвращения и ликвидации разливов нефти (ЛРН) для полярных регионов, создание инфраструктуры спецоборудования (боновые заграждения, скиммеры, диспергенты) в ключевых портах, подготовка мобильных аварийных бригад, способных работать в ледовых условиях.

Восстановление ущерба прошлых лет. Ликвидация накопленного экологического ущерба: масштабные федеральные программы по очистке территорий от советского наследия — ржавых бочек, брошенной техники, развалин военных и промышленных объектов. Утилизация загрязнителей.

Мониторинг и наука. Комплексный экологический мониторинг: создание сети автоматических станций, отслеживающих качество воздуха, воды, почвы, состояние вечной мерзлоты. Использование спутников для обнаружения разливов нефти и выбросов метана.

Исследование биоразнообразия: изучение состояния ключевых видов-индикаторов (белый медведь, морж, нарвал, атлантический морж) для оценки общего здоровья экосистемы.

Изучение климатической обратной связи: исследование процессов таяния вечной мерзлоты и выбросов парниковых газов для построения точных климатических моделей.

Создание охраняемых природных территорий. Расширение сети заповедников и национальных парков позволяет защитить наиболее уязвимые и ценные экосистемы от промышленного освоения. Примеры: Национальный парк «Русская Арктика», Большой Арктический заповедник. Создание морских охраняемых районов: запрет или ограничение хозяйственной деятельности в ключевых местах нагула, размножения и миграции морских млекопитающих и птиц.

Участие коренных народов и международное сотрудничество. Учет интересов коренных народов: обязательные процедуры Свободного, предварительного и осознанного согласия (СПОС/FPIC) при реализации проектов, затрагивающих их традиционные земли и образ жизни. Использование их традиционных знаний в управлении ресурсами и мониторинге.

Таким образом, борьба за арктическую природу — это интеграция жестких экологических стандартов во всю хозяйственную деятельность, опора на науку и традиционные знания, создание буферов в виде заповедников и готовность адаптироваться к уже начавшимся необратимым изменениям. Успех зависит от способности государства и бизнеса рассматривать экологическую безопасность не как статью расходов, а как обязательное условие для любого долгосрочного присутствия в регионе.

ВЫВОДЫ

СМП является стратегически важной национальной транспортной артерией, успешно обеспечивающей внутренние потребности и снабжение арктических проектов. Развитие арктического флота и инфраструктуры демонстрирует устойчивую положительную динамику.

Реализация транзитного потенциала СМП в качестве международного коридора сопряжена с комплексом фундаментальных вызовов. Российская Федерация предпринимает масштабные меры по преодолению указанных барьеров, основанные на государственном планировании и инвестициях. Стратегия включает развитие технологического лидерства в ледоколостроении (проекты 22220, 10510 «Лидер») и создание специализированного транспортного флота, внедрение комплексных систем управления и безопасности судоходства (ледовые паспорта судов, централизованная диспетчеризация Штабом морских операций), реализацию программ развития опорной инфраструктуры портов и создания интегрированной транспортной сети в АЗРФ, применение специальных экономических режимов (льготное налогообложение, механизмы ГЧП) для привлечения инвестиций, развертывание современных систем связи, навигации и мониторинга (проекты «Сфера», «Арктика-М»), внедрение жестких экологических стандартов и программ по ликвидации накопленного ущерба.

Несмотря на предпринимаемые усилия, круглогодичный транзит по СМП остается высокорискованной и капиталоемкой логистической операцией, чья конкурентоспособность по сравнению с южными маршрутами (например, через Суэцкий канал) для большинства грузов на текущем этапе ограничена.

Перспективы СМП как глобального транзитного коридора носят долгосрочный характер и зависят от согласованного решения комплекса технологических, инфраструктурных, экономических и регуляторных задач. К приоритетным направлениям развития следует отнести: дальнейшее наращивание ледокольного флота и транспортного флота ледового класса, ускоренную модернизацию портовой и береговой инфраструктуры, диверсификацию грузовой базы и стимулирование обратных грузопотоков, гармонизацию административных процедур без ущерба для безопасности и экологии и углубление международного сотрудничества с заинтересованными странами.

Таким образом, Северный морской путь обладает значительным стратегическим потенциалом, реализация которого требует продолжения целенаправленной государственной политики, масштабных инвестиций и инновационных решений. Успешное развитие СМП способно укрепить позиции Российской Федерации в Арктике, обеспечить новые импульсы для экономического роста и создать устойчивую альтернативу в системе глобальных логистических маршрутов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаева А.Б. Международный транзит Северного морского пути: угрозы, возможности, прогнозы / А.Б. Николаева // Север и рынок: формирование экономического порядка. — 2025. — Т. 28, № 3(89). — С. 134–148.
2. Елисеев Д.О. Моделирование транзитных перевозок по Северному морскому пути в условиях климатических изменений / Д.О. Елисеев, Ю.В. Наумова // Проблемы прогнозирования. — 2021. — № 2(185). — С. 63–74.
3. Gunnarsson V. Ten years of international shipping on the Northern Sea Route: trends and challenges / V. Gunnarsson, A. Moe // Arctic Review on Law and Politics. — 2021. — Т. 12. — С. 4–30.
4. Соловьев Д. Северный морской путь: экономический потенциал, климатическая устойчивость и геополитическое партнерство России и Китая / Д. Соловьев, Л. Нефедова // Энергетическая политика. — 2025. — № 8(211). — С. 10–23.
5. Северный морской путь — дороги во льдах // Arctic.ru. — 26 августа 2015. — [Электронный ресурс] URL: <https://arctic.ru/photo/20150826/147398.html> (дата обращения 09.12.2025).
6. BBC News. — [Электронный ресурс] URL: www.bbc.com (дата обращения 09.12.2025).
7. Проблемы с поставками иностранного оборудования могут повлиять на строительство ледоколов на СПГ // Информационное агентство «Би-порт». — 21 апреля 2022. — [Электронный ресурс] URL: <https://b-port.com/news/266258> (дата обращения 09.12.2025).
8. Городецкий В. Фото дня: Дрейфующие льды Арктики / В. Городецкий // Арктический обозреватель. — 9 июля 2020. — [Электронный ресурс] URL: <https://murmansk.ru/247> (дата обращения 10.12.2025).

9. Емельянова И. Суровые правила Арктики / И. Емельянова, А. Науменко // Газпром. — 2020. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/reports/2020/arctic-rules/> (дата обращения 10.12.2025).
10. Лицкевич О.Н. Основные проблемы, возникающие при обеспечении связи и навигации в условиях Арктики Северного морского пути / О.Н. Лицкевич, А.В. Мешалов // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. — 2024. — № 2(47). — С. 30–37.
11. Обзорные карты состояния ледяного покрова Северного Ледовитого океана // ААНИИ: Центр ледовой и гидрометеорологической информации. — [Электронный ресурс] URL: https://data.aari.ru/odata/_d0015.php (дата обращения 09.12.2025).
12. Шаринкова О.С. Сравнительная оценка гидродинамических характеристик руля изменяемого профиля в составе винторулевого комплекса судна ледового класса / О.С. Шаринкова, А.П. Аносов, И.А. Новосельцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 66/67. — С. 49–57. — EDN GELNOD.
13. Андрушин А.В. Разработка проекта требований к величине глобальной ледовой нагрузки на корпус движительно-рулевой колонки для арктических судов ледовых классов Arc4 — Arc9 / А.В. Андрушин, С.С. Федосеев, М.А. Кутейников // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 37–57. — EDN FKMSMT.
14. Правительство утвердило план развития Севморпути // Страна Росатом. — 18 августа 2022. — [Электронный ресурс] URL: <https://strana-rosatom.ru/2022/08/18/pravitelstvo-utverdilo-plan-razvit/> (дата обращения 10.12.2025).
15. MarineTraffic. — [Электронный ресурс] URL: www.marinetraffic.com (дата обращения 10.12.2025).
16. Новый атомный ледокол проекта 10510 «Лидер» // Атомная энергия 2.0. — 6 ноября 2018. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.atomic-energy.ru/photo/90217> (дата обращения 10.12.2025).
17. Шурпяк В.К. Разработка руководства по обеспечению надежной работы систем охлаждения при плавании судов в условиях шуги / В.К. Шурпяк // Транспортные системы. — 2025. — № 4(38). — С. 16–21.
18. Петров А.А. Основные критерии безопасности буксировки судна ледоколом методом буксирования вплотную / А.А. Петров, В.Г. Арутюнян // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 81–87. — EDN RRDJWI.
19. Таровик О.В. Безопасная дистанция ледокольной проводки судов с винторулевыми колонками / О.В. Таровик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 66/67. — С. 4–18. — EDN RFIUFE.
20. Бойко М.С. Сопоставление методик расчета глобальной ледовой нагрузки на винторулевую колонку / М.С. Бойко, М.А. Кутейников // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 50–63. — EDN BPQLVB.
21. Президент России. — [Электронный ресурс] URL: <http://kremlin.ru> (дата обращения 25.02.2026).
22. Вопрос: Какой сертификат необходимо иметь членам экипажей судов для плавания в полярных водах? // Росморречфлот. — [Электронный ресурс] URL: <https://morflot.gov.ru/articles/obrazovanie/11624/> (дата обращения 25.02.2026).

REFERENCES

1. Nikolaeva A.B. International transit via the Northern Sea Route: Threats, opportunities, and future prospects. *The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2025. Vol. 28, No.3(89). P. 134–148. (In Russ.)
2. Eliseev D.O., Naumova Yu.V. Simulation of transit transportation along the Northern Sea Route under climate change. *Studies on Russian Economic Development*. 2021. Vol. 32, No. 2. P. 63–74. (In Russ.)
3. Gunnarsson B., Moe A. Ten years of international shipping on the Northern Sea Route: trends and challenges. *Arctic Review on Law and Politics*. 2021. Vol. 12. P. 4–30.
4. Solovyev D., Nefedova L. Northern Sea Route: economic potential, environmental and climatic resilience, and geopolitical partnership between Russia and China. *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*. 2025. No. 8(211). P. 10–23. (In Russ.)
5. Severnyi morskoi put' — dorogi vo l'dakh [The Northern Sea Route – roads in the ice]. *Arctic.ru*. August 26, 2015. URL: <https://arctic.ru/photo/20150826/147398.html> (accessed 09.12.2025).
6. BBC News. URL: www.bbc.com (accessed 09.12.2025).
7. Problemy s postavkami inostrannogo oborudovaniya mogut povliyat' na stroitel'stvo ledokolov na SPG [Problems with the supply of foreign equipment may be related to the construction of LNG-powered icebreakers]. *Informatsionnoe agentstvo «Bi-port» [B-port News Agency]*. April 21, 2022. URL: <https://b-port.com/news/266258> (accessed 09.12.2025).
8. Gorodetskii V. Foto dnya: Dreifuyushchie l'dy Arktiki [Photo of the day: Arctic drift ice]. *Arkticheskiy obozrevatel' [Arctic Observer]*. July 9, 2020. URL: <https://murmansk.ru/247> (accessed 10.12.2025).
9. Yemelyanova I., Naumenko A. Arctic's tough rules. *Gazprom*. 2020. URL: <https://www.gazprom.com/press/news/reports/2020/arctic-rules/> (accessed 10.12.2025).
10. Litskevich O.N., Meshalov A.V. The main problems encountered in providing communication and navigation in the Arctic conditions of the Northern Sea Route. *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova [Bulletin of the Admiral Ushakov State Marine University]*. 2024. No. 2(47). P. 30–37. (In Russ.)
11. Obzornye karty sostoyaniya ledyanogo pokrova Severnogo Ledovitogo Okeana [Overview maps of the state of the Arctic Ocean ice cover]. *ААНИИ: Tsentr ledovoy i gidrometeorologicheskoy informatsii [Ice and Hydrometeorological Information Center of the Arctic and Antarctic Research Institute]*. URL: https://data.aari.ru/odata/_d0015.php (accessed 09.12.2025).
12. Sharinkova O.S., Anosov A.P., Novoseltsev I.A. Comparative evaluation of hydrodynamic characteristics of variable profile rudder as a part of ice class ship propulsion complex. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2022. No. 66/67. P. 49–57. EDN GELNOD. (In Russ.)
13. Andryushin A.V., Fedoseev S.S., Kuteynikov M.A. Development of the draft requirements for the value of global ice loads acting on azimuth thrusters fitted on Arc4 — Arc9 ice class ships. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 37–57. EDN FKMSMT. (In Russ.)
14. Pravitel'stvo utverdilo plan razvitiya Sevморпути [The government approved the Northern Sea Route development plan]. *Strana Rosatom [Rosatom Land]*. August 18, 2022. URL: <https://strana-rosatom.ru/2022/08/18/pravitelstvo-utverdilo-plan-razvit/> (accessed 10.12.2025).
15. MarineTraffic. URL: www.marinetraffic.com (accessed 10.12.2025).

16. Novyy atomnyy ledokol proyekta 10510 «Lider» [The new nuclear icebreaker of project 10510 "Lider"]. *Atomnaya energiya 2.0 [Atomic Energy 2.0]*. November 6, 2018. URL: <https://www.atomic-energy.ru/photo/90217> (accessed 10.12.2025).
17. Shurpyak V.K. Razrabotka rukovodstva po obespecheniyu nadezhnoi raboty sistem okhlazhdeniya pri plavanii sudov v usloviyakh shugi [Development of guidelines for ensuring reliable operation of cooling systems when ships are sailing in brash ice]. *Transportnye sistemy [Transport systems]*. 2025. No. 4(38). P. 16–21.
18. Petrov A.A., Arutyunyan V.G. Essential safety criteria for ship close coupled towing by an icebreaker. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 81–87. EDN RRDJWI. (In Russ.)
19. Tarovik O.V. Safe distance for icebreaker escorting of ships with podded propulsors. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2022. No. 66/67. P. 4–18. EDN RFIUFE. (In Russ.)
20. Boyko M.S., Kuteynikov M.A. Comparison between methodologies for calculating global ice load acting on podded propulsion unit. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 50–63. EDN BPQLVB. (In Russ.)
21. President of Russia. URL: <http://en.kremlin.ru/> (accessed 25.02.2026).
22. Vopros: Kakoy sertifikat neobkhodimo imet' chlenam ekipazhey sudov dlya plavaniya v polyarnykh vodakh? [Question: What certificate is required for crew members of ships sailing in polar waters?]. *Rosmorrechflot [Federal Agency for Sea and River Transport]*. URL: <https://morflot.gov.ru/articles/obrazovanie/11624/> (accessed 25.02.2026).

Статья поступила в редакцию 02.02.2026.

Принята к публикации 10.03.2026.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.035
EDN MSSHNN

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОДРУЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТОННЕЛЬНОГО ТИПА

А.Ю. Яковлев, д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

А.Б. Кадомцева, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Е.В. Ермолаева, зав. науч.-иссл. лабораторией, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

М.А. Бережная, инженер науч.-образоват. лаборатории, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: mary.liverinova@mail.ru

С.И. Чепурко, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: kgm@smtu.ru

Существующие методики проектирования подруливающих устройств были разработаны в середине XX в. Назрела необходимость разработки современных методик. Целью работы является создание методики расчета гидродинамических параметров подруливающего устройства (ПУ) тоннельного типа. Методика реализована на базе гидравлического расчета ПУ как неразветвленного трубопровода с осевым насосом. В ходе разработки методики решались задачи разработки теоретических положений, определения потерь напора на входе и выходе в канал ПУ, при обтекании гондолы и стоек редуктора, при течении через защитные решетки, также решена задача определения насосной характеристики и ее согласование с характеристикой канала ПУ. Потери напора определялись с помощью массовых CFD-расчетов. На их основе были получены зависимости коэффициентов потерь напора от параметров геометрии элементов ПУ. Методика была верифицирована на экспериментальных данных и результатах CFD-расчетов ПУ. Таким образом, созданная методика может быть успешно использована при проектировании современных ПУ тоннельного типа. Разработка методики выполнена в рамках федерального проекта «Стимулирование спроса на отечественную продукцию судостроительной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений».

Ключевые слова: методика, гидравлический расчет, подруливающее устройство, гребной винт, защитная решетка, водозаборник, гондола, стойка, CFD-расчет.

Для цитирования: Яковлев А.Ю. Разработка методики гидродинамического расчета подруливающих устройств тоннельного типа / А.Ю. Яковлев, А.Б. Кадомцева, Е.В. Ермолаева, М.А. Бережная, С.И. Чепурко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 110–123. — EDN MSSHNN.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR HYDRODYNAMIC CALCULATION OF TUNNEL THRUSTERS

A.Yu. Yakovlev, DSc, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: kgm@smtu.ru

A.B. Kadomtseva, Senior Lecturer, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: kgm@smtu.ru

E.V. Ermolayeva, Head of scientific research laboratory, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: kgm@smtu.ru

M.A. Berezhnaya, Engineer of scientific education laboratory, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: mary.liverinova@mail.ru

S.I. Chepurko, Senior Lecturer, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: kgm@smtu.ru

The existing methods of thruster design were developed in the middle of the 20th century. Currently, there is a need to develop modern techniques. The purpose of the work is to create a methodology for calculating the hydrodynamic parameters of a tunnel thruster (TT). The technique is implemented on the basis of the hydraulic calculation of the TT as an unbranched pipeline with an axial pump. During the development of the methodology, the tasks of developing theoretical provisions, determining pressure losses at the entrance and exit to the TT channel, when flowing around the gearbox nacelle and struts, when flowing through protective grids, and the problem of determining the pumping characteristics and matching them with the characteristics of the TT channel were solved. Pressure losses were determined using a number of CFD calculations. Based on them, the dependences of the pressure loss coefficients on the geometry parameters of the TT elements were obtained. The methodology was verified based on experimental data and the results of CFD calculations of TT. Thus, the created methodology can be successfully used in the design of modern tunnel thrusters. The methodology was developed within the framework of the federal project "Stimulating demand for domestic products of the shipbuilding industry" of the state program of the Russian Federation "Development of shipbuilding and technology for the development of offshore fields".

Key words: methodology, hydraulic calculation, thruster, propeller, protective grid, inlet, nacelle, strut, CFD calculation.

For citation: Yakovlev A.Yu., Kadomtseva A.B., Ermolayeva E.V., Berezhnaya M.A., Chepurko S.I. Development of a method for hydrodynamic calculation of tunnel thrusters. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 110–123. EDN MSSHNN. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

История подруливающих устройств (ПУ) берет свое начало в середине XIX в. Однако их практическое внедрение началось только в конце 1950-х гг., когда развитие технологий позволило создавать компактные и мощные устройства.

Широкое использование ПУ привело к необходимости создания методик их проектирования. В рамках этого процесса в отечественном судостроении во второй половине XX в. сформировались три научные школы, занимающиеся проблемами ПУ: на базе ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (ныне Крыловский ГНЦ) под руководством Э.П. Лебедева и И.Г. Шапошникова [1], на базе Николаевского кораблестроительного института (Н.Г. Соколик и др.) [2] и на базе ЛКИ (ныне СПбГМТУ) под руководством А.Ш. Ачкинадзе [3]. В результате выполнения исследовательских работ и взаимодействия этих школ в 1980-х гг. на базе ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова была выпущена методика РД 5.076.031-82 [4], которая на долгие годы стала основой для разработки ПУ. Активным пользователем этой методики были отечественные конструкторские бюро, и в первую очередь НПО «Винт» [5].

За почти полвека, прошедшие с момента создания методики [4], ПУ стали значительно мощнее, а требования к точности прогнозирования их характеристики существенно возросли. Проектанты все чаще стали высказывать замечания к устаревающей методике [6]. В этой связи предпринимаются попытки расчета работы ПУ на базе наработок прошлого века путем внесения корректировок и дополнительных эмпирических параметров в исходную методику [7, 8].

Аналогичные проблемы возникли и за рубежом. В зарубежной монографии [9] дан обзор основных направлений исследований в области разработки и совершенствования ПУ, из него следует, что, несмотря на многочисленные исследования, общепризнанной современной методики расчета ПУ на данный момент не существует. В 2015 г. ведущие мировые производители ПУ организовали совместный промышленный проект, направленный на разработку систематической серии современных ПУ [10]. Часть результатов, полученных при выполнении этого проекта, представлена в работе [11].

Современные отечественные исследования представлены в недавней диссертации С.П. Шевцова [12]. В частности, в этой и других отечественных [13] и зарубежных [11, 14] работах исследуются способы снижения виброактивности ПУ. Использование в составе ПУ лопастных систем с концевым приводом (RIM-драйвер) рассмотрено в работах [15–17]. Исследования взаимодействия ПУ с корпусом — еще одно направление современных исследований. Взаимодействие ПУ с корпусом судна рассмотрено в [18, 19]; в работе [20] и отечественных работах [21–23] изучаются аспекты взаимодействия ПУ с корпусом подводного аппарата. Кроме того, проблемы разработки ПУ освещены в [24], а также частично в монографии [25], посвященной водометным движителям. Однако эти исследования не решали задачу разработки новой методики взамен и в развитие [4]. Таким образом, задача разработки новой методики остается актуальной.

Требования отечественных проектных организаций по разработке новой методики нашли поддержку в рамках федерального проекта «Стимулирование спроса на отечественную продукцию судостроительной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений» (Распоряжение правительства РФ от 25 апреля 2023 г. № 1069-р) [26], выполняемого АО «ЦС «Звездочка». В обеспечение работ по этому проекту, по заказу головного филиала НПО «Винт» АО «ЦС «Звездочка», СПбГМТУ выполнил разработку новой методики гидродинамического проектирования и расчета ПУ тоннельного типа. В данной статье представлены основные результаты этого исследования.

Исходная и вновь создаваемая методики предназначены для расчета ПУ тоннельного типа, то есть таких ПУ, которые представляют собой поперечный канал от одного борта судна до другого (рис. 1). Подобный тип ПУ является в настоящее время наиболее распространенным.

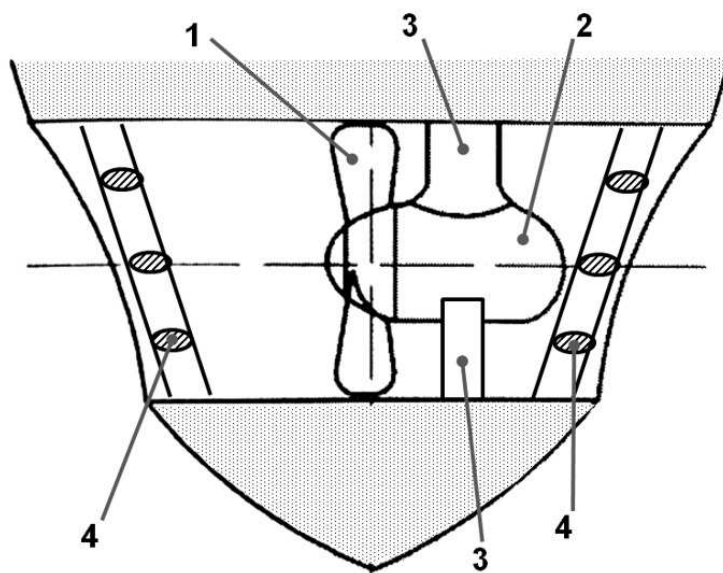


Рис. 1. ПУ тоннельного типа: 1 — гребной винт; 2 — гондола редуктора; 3 — стойки гондолы редуктора; 4 — защитные решетки

В состав ПУ тоннельного типа обычно входит гребной винт, устанавливаемый в трубе кругового сечения на осесимметричной гондоле. Габариты гондолы могут быть достаточно велики, поскольку в случае механической передачи внутри нее располагается редуктор. Вращающий момент на гребном винте создается двигателем, расположенным снаружи канала, и передается к механизму редуктора через передачу, проходящую в одной из стоек на которой крепится гондола. Количество стоек крепления редуктора может быть различным, как и их форма. Вход и выход в канал ПУ оформляются различным образом, в том числе они часто имеют в своем составе защитные решетки.

С точки зрения гидравлики [27] ПУ рассматриваемого типа представляет собой неразветвленный трубопровод, источником напора в котором служит осевой насос (гребной винт). Трубопровод включает в себя трубу кругового сечения, в которой располагается гидравлическая арматура (вход и выход из трубопровода, защитные решетки, гондола, стойки). На стенках канала имеют место потери на трение, а на элементах гидравлической арматуры — местные потери напора. Таким образом, разрабатываемая методика должна представлять собой частный случай гидравлического расчета трубопровода. Методы

гидравлического расчета трубопроводов в настоящее время также активно развиваются. В качестве примера можно указать на исследования коэффициентов потерь напора методами CFD [28], методы согласования насосной и напорных характеристик [29, 30], разработку методов расчета осевых рабочих колес [31].

Таким образом, целью работы является создание методики расчета гидродинамических параметров подруливающего устройства (ПУ) тоннельного типа. В ходе разработки методики необходимо решить следующие задачи: разработать теоретические положения расчета ПУ как неразветвленного трубопровода с осевым насосом, определить зависимости коэффициентов потерь напора от параметров геометрии на входе и выходе в канал ПУ, при обтекании гондолы и стоек редуктора, при течении через защитные решетки, разработать способы определения насосной характеристики и ее согласования с характеристикой канала ПУ.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

1.1. Основные положения методики

Расчет трубопроводов обычно осуществляется путем согласования напорной характеристики насоса и характеристики трубопровода [27]. Для решения данной задачи необходимо определить эти характеристики, а потом правильно согласовать их.

Характеристика трубопровода представляет собой зависимость напора H от расхода воды Q через канал:

$$H = 8 \frac{Q^2}{\pi^2 g D^4} \zeta_{\Sigma}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения;
 ζ_{Σ} — приведенный коэффициент потерь напора в канале ПУ;
 D — характерный диаметр канала ПУ.

Приведенный коэффициент потерь напора определяется путем суммирования коэффициентов потерь на различных элементах ПУ с учетом возможного изменения диаметра канала [27]. Будем считать, что диаметр канала ПУ постоянен или меняется незначительно, тогда формула для расчета приведенного коэффициента потерь напора в канале ПУ [27] приобретает следующий вид:

$$\zeta_{\Sigma} = (L/D)\lambda + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + 2\zeta_{\text{реш}} + \zeta_{\Gamma} + \zeta_{\text{ст}}, \quad (2)$$

где D — характерный диаметр канала в месте расположения гребного винта;
 L — длина канала, коэффициенты потерь напора: $\zeta_{\text{вх}}$ — на входе в канал, $\zeta_{\text{вых}}$ — на выходе из канала, $\zeta_{\text{реш}}$ — при протекании через защитные решетки, ζ_{Γ} — при обтекании гондолы, $\zeta_{\text{ст}}$ — при обтекании стоек и пилонов гондолы;
 λ — на трение по длине канала.

Перечисленные коэффициенты потерь напора являются функцией числа Рейнольдса, которое определяется по средней скорости потока и диаметру канала ПУ следующим образом:

$$Re = \frac{V_{\text{ср}} D}{\nu} = 4/\pi \cdot \frac{Q}{\nu D}, \quad (3)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости;
 $V_{\text{ср}}$ — средняя осевая скорость в канале ПУ.

Для практически реализуемых режимов работы натуральных ПУ число Рейнольдса обычно характеризуется величинами порядка 10^6 – 10^7 , что соответствует турбулентному режиму течения в канале ПУ.

Насосная характеристика может быть определена по диаграммам для серии гребных винтов в трубе [32]. Согласование насосной и трубопроводной характеристик осуществляется исходя из равенства приведенного коэффициента потерь напора ζ_{Σ} величине коэффициента нагрузки по упору гребного винта $C_{\text{ТР}}$,

$$C_{\text{ТР}} = \zeta_{\Sigma}(Re). \quad (4)$$

Коэффициент нагрузки $C_{\text{ТР}}$ определяется традиционным образом [25]:

$$C_{\text{ТР}} = \pi/2 \cdot D^2 \frac{T}{\rho Q^2}, \quad (5)$$

где T — упор гребного винта;
 ρ — плотность воды.

Таким образом, заданной геометрии ПУ соответствует единственный режим работы гребного винта. Упор гребного винта T может быть определен на основе выражений (4) и (5).

Для завершения расчета необходимо оценить тягу ПУ в целом T_E . Для расчета тяги может использоваться известное выражение [25]:

$$T_E = \rho Q(V_\infty - V_0), \quad (6)$$

где V_∞ — скорость в струе, отбрасываемой движителем на бесконечности за ним;
 V_0 — скорость на бесконечности перед движителем.

В наиболее распространенном случае работы ПУ на швартовном режиме (при $V_0 = 0$), в допущении, что $V_\infty = V_{ср}$, создаваемая им тяга может быть вычислена следующим образом:

$$T_E = 4\rho \frac{Q^2}{\pi D^2}. \quad (7)$$

1.2. Метод определения потерь напора в канале ПУ

Потери напора на различных элементах канала ПУ (см. выражение (2)) определялись путем CFD-расчета в пакете вычислительной гидромеханики с открытым кодом OpenFOAM [33].

В основе математической модели, реализованной в этом и аналогичных пакетах вычислительной гидромеханики, лежит система уравнений Навье — Стокса и неразрывности, осредненных по Рейнольдсу:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j^2 \partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0, \quad (9)$$

где u_i — компоненты вектора скорости;
 x_i — декартовы координаты;
 p — давление;
 $\langle \dots \rangle$ означает операцию осреднения по Рейнольдсу.

Для замыкания уравнений (8) и (9) используются градиентно-диффузионная гипотеза и уравнения переноса, где k — кинетическая энергия турбулентности, ω — удельная скорость диссипации [34] для модели турбулентности k - ω SST. Численная реализация задачи осуществляется методом контрольного объема.

Для системы дифференциальных уравнений (8) и (9) приняты следующие граничные условия (рис. 2):

- на входной границе расчетной области: $\vec{u} = \vec{u}_0$, $\partial p / \partial n = 0$, где \vec{u}_0 — скорость потока, p — абсолютное давление;
- на выходной границе расчетной области: $\partial U / \partial n = 0$, $\partial k / \partial n = 0$, $\partial \omega / \partial n = 0$, $p = p_0$, где p_0 — относительное давление;

- на стенках канала и на элементах ПУ: $\vec{u} = 0$, $\partial P / \partial n = 0$, k и ω определяются с помощью пристеночных функций.

Для каждой из рассмотренных ниже задач проверялась сеточная сходимость и проводилась верификация на основе данных, представленных в [27]. В случае исследования входа и выхода из канала ПУ перед трубой задавалась специальная расширенная область внешнего потока.

Потери напора по результатам CFD-расчетов определялись следующим образом. Выполнялись расчеты канала (рис. 2) в присутствии исследуемого элемента ПУ и без него. Затем для обоих случаев определялись потери напора на всем протяжении канала (разница напоров между входом и выходом из канала). Величина потери напора непосредственно на исследуемом элементе ΔH определялась в виде разности между этими значениями. Такая методика определения потерь напора соответствует классическому экспериментальному методу, изложенному в [27]. Полученная величина потерь напора приводилась к безразмерным коэффициентам потерь напора по формуле, обратной (1):

$$\zeta_i = \frac{\pi^2 g D^4}{8 \cdot Q^2} \Delta H, \quad (10)$$

где ΔH — разность величин потерь напора в канале, определенная в присутствии исследуемого элемента ПУ и без него.

Для каждого элемента ПУ варьировался ряд его геометрических параметров, а также число Рейнольдса. В результате для каждого элемента ПУ было выполнено несколько сотен CFD-расчетов. По результатам расчетов путем регрессионного анализа были построены зависимости коэффициентов потерь напора от варьируемых параметров.

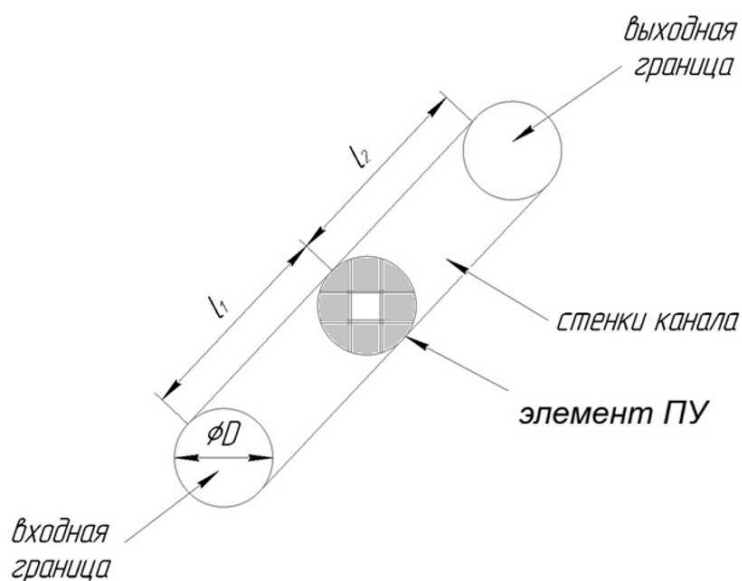


Рис. 2. Границы расчетной области при моделировании потерь напора на отдельных элементах ПУ

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Потери напора на входе и выходе канала ПУ

В рамках исследования потерь напора на входе в канал ПУ расчеты выполнялись для двумерной задачи. Были рассмотрены три варианта оформления входа в канал: коническое, скругленное и с прямоугольным уступом (см. рис. 3). Для этих вариантов варьировались диаметры канала, радиусы скругления входа в канал, наклон стенок в коническом уступе, а также протяженность уступов. Кроме того, проводились исследования влияния наклона линии борта на течение на входе в канал.

В результате анализа результатов CFD-расчета и данных, приведенных в [27], были определены зависимости коэффициента потерь напора на входе в канал ПУ $\zeta_{вх}$ в зависимости от угла развала борта, а также параметров геометрии входа в канал ПУ, представленных на рис. 3.

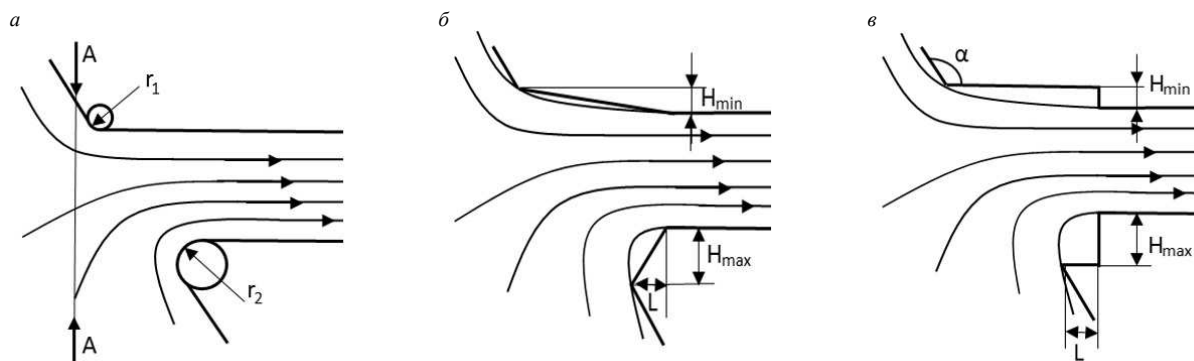


Рис. 3. Варианты оформления входа в канал ПУ: а — со скруглением; б — коническое; в — с прямоугольным уступом

Пример полученных зависимостей представлен на рис. 4 для случая конического входа в канал.

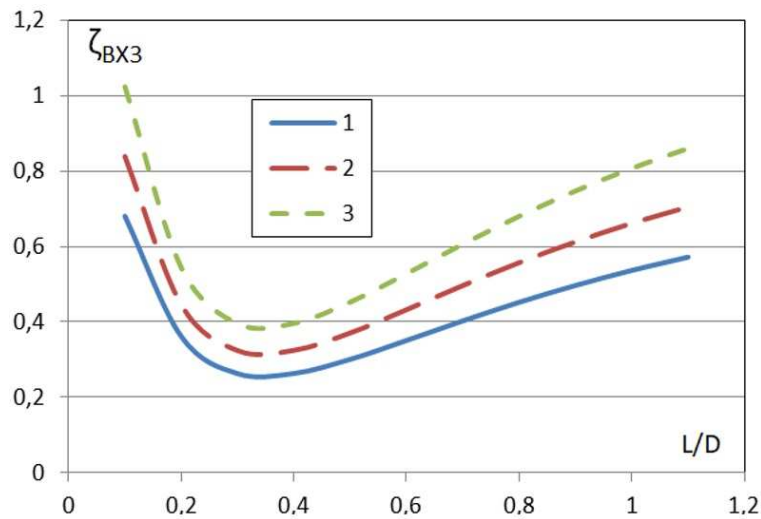


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь напора для конического входа в канал $\zeta_{\text{вхз}}$ от относительной глубины L/D и угла развала борта γ ($1-\gamma=0^\circ$, $2-\gamma=10^\circ$, $3-\gamma=20^\circ$); $H_{\text{мин}}/D=0,1$; $H_{\text{макс}}/D=0,2$

В случае работы ПУ при движении судна для потерь на входе в канал вводится корректирующий множитель $k_{\text{вх}}$, который определяется в зависимости от угла наклона ватерлинии по отношению к диаметральной плоскости α .

Коэффициент потерь на выходе из канала ПУ $\zeta_{\text{вых}}$ при отсутствии хода судна и в случаях, когда скорость хода судна V_S не превышает 0,8 от скорости протекания жидкости через канал ПУ, может приниматься равным единице для всех вариантов геометрии:

$$\zeta_{\text{вых}} = 1. \quad (11)$$

При больших скоростях хода судна рекомендуется определять коэффициент потерь по формуле:

$$\zeta_{\text{вых}} = 1 + 0,55 \cdot (V_S/V_{\text{сп}} - 0,8). \quad (12)$$

2.2. Потери напора при течении через защитные решетки

В ходе исследования течения через защитные решетки были рассмотрены два вида прутьев решетки: прутки кругового сечения и профилированные (ромбовидные) стойки. Расчеты проводились для различных комбинаций прутьев, вариантов их пересечения друг с другом и скорости потока в трубе.

Коэффициенты потерь при обтекании защитных решеток были определены в виде зависимостей от следующих параметров:

- количество пересечений элементов решеток между собой i (рис. 5);
- количество пересечений элементов решетки со стенками канала ПУ s (рис. 5);
- отношение суммарной длины элементов решетки к диаметру канала ПУ l/D , где l — суммарная длина элементов решетки;
- диаметр прутка d или толщина элемента решетки h и ее ширины b — для профилированной стойки.

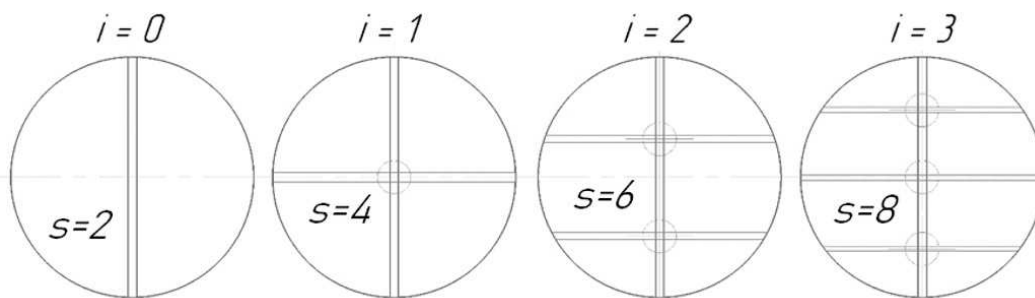


Рис. 5. Примеры определения количества пересечений элементов решетки

Примеры расчетных величин коэффициентов потерь напора при протекании через решетки различной конфигурации представлены на рис. 6.

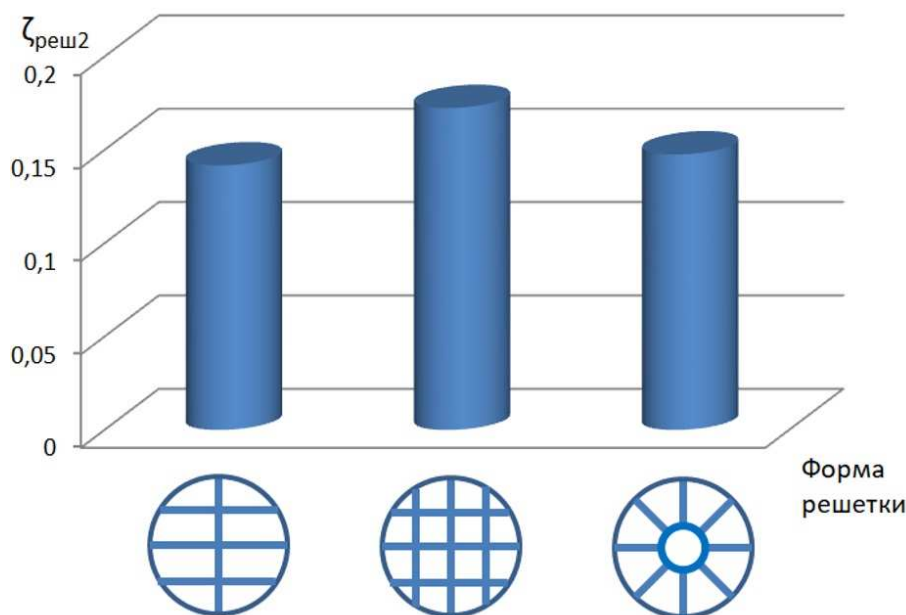


Рис. 6. Зависимость коэффициента потерь напора при протекании через защитные решетки. Прутья имеют ромбовидное сечение. $h/D=0,02$, $b/D=0,1$

2.3. Потери напора при обтекании гондолы и стоек редуктора

Величина коэффициента потерь напора при обтекании гондолы $\zeta_{Г}$ определяется в виде зависимости от следующих параметров (рис. 7):

- отношение диаметра гондолы d к диаметру канала в месте установки гребного винта d/D ;
- отношение длины цилиндрической вставки корпуса гондолы l к общей длине гондолы L — l/L ;
- числа Рейнольдса (3).

Все зависимости получены для двух случаев направления потока: со стороны корпуса гондолы (прямое обтекание) и со стороны гребного винта (обратное обтекание). В случае прямого обтекания гребной винт работает в следе за гондолой (см. рис. 7), а в случае обратного — гондола обтекается потоком, прошедшим через лопасти гребного винта.

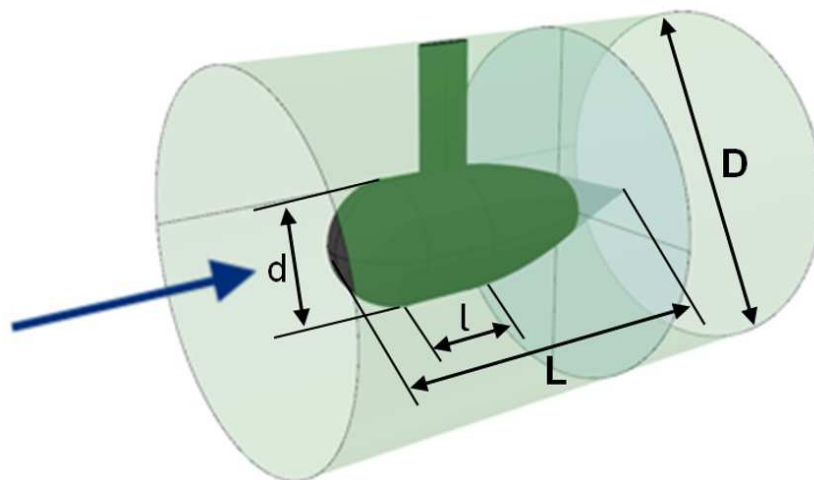


Рис. 7. Схема обтекания гондолы редуктора: стрелкой показано направление потока при прямом обтекании, полупрозрачной окружностью обозначен диск винта

Пример диаграмм для определения гидравлических потерь при обтекании гондолы в зависимости от параметров ее геометрии приведен на рис. 8.

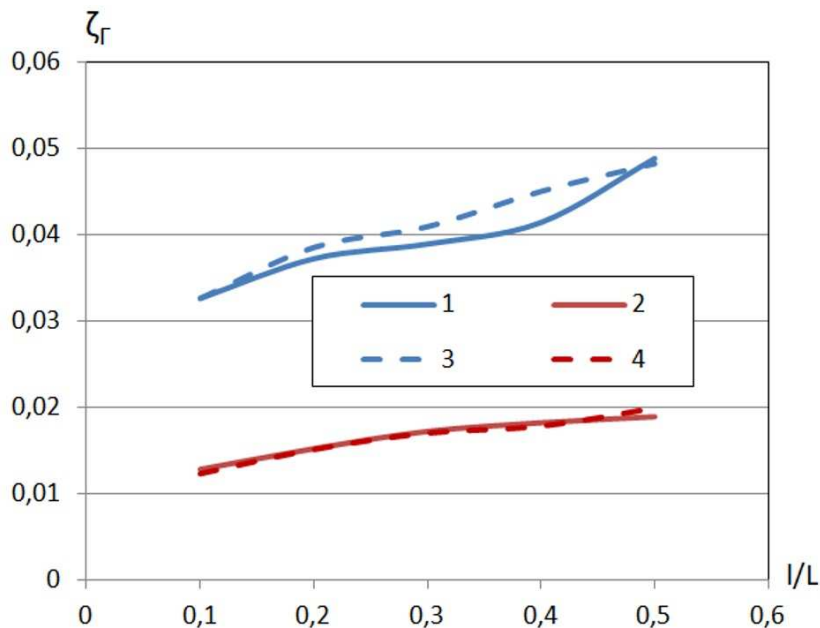


Рис. 8. Зависимость коэффициента ζ_G от параметров геометрии гондолы. $Re=1 \cdot 10^6$.
 1 — $d/D=0,5$ прямое обтекание; 2 — $d/D=0,33$ прямое обтекание;
 3 — $d/D=0,5$ обратное обтекание; 4 — $d/D=0,33$ обратное обтекание

В методике предусмотрен учет нескольких систем стоек гондолы, имеющих разную геометрию. Такая ситуация возникает, если часть стоек используются для размещения внутри них коммуникаций и привода гребного винта, а остальные служат для крепления гондолы.

Коэффициент гидравлических потерь, обусловленный наличием нескольких стоек $\zeta_{ст}$ определяется по следующей формуле:

$$\zeta_{ст} = k_N \frac{\sum_i N_i \zeta_{сти}}{N}, \quad (13)$$

где i — порядковый номер группы стоек с одинаковой геометрией;
 N — общее количество стоек;
 N_i — количество стоек i -го типа;
 $\zeta_{сти}$ — коэффициент гидравлических потерь при обтекании отдельно взятой стойки;
 k_N — коэффициент, учитывающий гидродинамическое взаимодействие нескольких стоек между собой.

2.4. Потери на трение в канале ПУ

Потери на трение в канале ПУ вычисляются в соответствии со стандартной методикой расчета этих потерь для труб кругового сечения [27]. С учетом характерных для работающего ПУ достаточно высоких чисел Рейнольдса можно считать режим течения в канале ПУ турбулентным. В таком случае коэффициент сопротивления трения λ может быть определен по формуле Блазиуса:

$$\lambda = 0,3164/Re^{1/4}. \quad (14)$$

В случае необходимости можно дополнительно учесть влияние шероховатости стенок канала ПУ [27].

2.5. Определение насосной характеристики и ее согласование с характеристикой трубопровода

В рамках разработанной методики насосные характеристики гребного винта, работающего в канале ПУ, определяются с помощью диаграмм, полученных для случая работы гребных винтов в трубе большой протяженности [32]. Диаграммы построены для серии гребных винтов, разработанной НПО «Винт» [35], которая включала в себя группы гребных винтов с различным числом лопастей Z и шаговым отношением A_e/A_0 . Всего было рассмотрено: 4 варианта дискового отношения ($A_e/A_0=0,55; 0,65; 0,75; 0,85$) для четырехлопастных гребных винтов, 2 варианта дискового отношения ($A_e/A_0=0,65$ и $0,75$) для пятилопастных гребных винтов и один вариант шестилопастного гребного винта (дисковое отношение $A_e/A_0=0,65$). Для каждого из этих вариантов величина шага гребных винтов варьировалась в широком диапазоне. Для разработки диаграмм использовались данные CFD-расчетов, выполненные НПО «Винт».

Для каждого варианта гребного винта, при различных значениях шага его лопастей, построены диаграммы коэффициентов упора K_T и момента K_Q на прямом и обратном режимах работы, в зависимости от поступи J , определяемой по средней скорости в канале ПУ:

$$J = 4/\pi \frac{Q}{nD^3}. \quad (15)$$

Коэффициенты упора и момента гребного винта при разработке диаграмм определялись традиционным образом:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad (16)$$

где T — упор гребного винта;
 n — число оборотов гребного винта;

$$K_Q = \frac{M}{\rho n^2 D^5}, \quad (17)$$

где M — вращающий момент на гребном винте.

Помимо зависимостей K_T и момента K_Q от поступи J , на диаграммах дополнительно нанесены линии равных значений КПД ГВ и линии равных величин $C_{TP} = \zeta_{\Sigma}$, полученные с помощью соотношения (5).

Из условия (4) в [32] получено уравнение, связывающее коэффициент упора гребного винта с потерями напора в канале (2) и поступью:

$$J^2 = 8/\pi \frac{K_T(J)}{\zeta_{\Sigma}}. \quad (19)$$

Решая это уравнение графически (с помощью разработанных диаграмм) при заданной величине ζ_{Σ} и одном дополнительном параметре, можно определить режим работы ПУ и шаг гребного винта. В качестве дополнительных параметров в этом алгоритме могут выступать коэффициент упора, коэффициент момента, поступь или шаг лопастей гребного винта.

Примеры диаграмм, способ их построения и алгоритмы расчетов, которые можно выполнить с помощью этих диаграмм, приведены в работе [32].

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе представлена апробация разработанной методики для ряда тестовых примеров.

Первый из тестовых примеров представляет собой экспериментальную модель канала ПУ. В канале была установлена неповоротная колонка с четырехлопастным гребным винтом. Длина канала составляла порядка 4,5 диаметра. Решетки на входе и выходе из канала отсутствовали, сопряжение с бортом модели судна было выполнено под прямым углом в виде скругления радиусом окружности. Испытания проводились НПО «Винт» на швартовном режиме работы.

Второй тестовый пример представляет собой натурное ПУ, для которого НПО «Винт» были выполнены CFD-расчеты. Гребной винт имел 5 лопастей и дисковое отношение 0,75. Длина канала ПУ составляла порядка 3,5 диаметра. На входе и выходе располагались защитные решетки, вход в канал ПУ был выполнен со скруглением. Угол наклона борта составлял 42°.

Для этих примеров по разработанной методике определялись тяга ПУ и мощность, потребляемая гребным винтом на проектном режиме работы ПУ (см. [32]). На рис. 9 сопоставлены результаты, полученные по данной методике, и оценки НПО «Винт». Как видно, результаты прогнозирования характеристик ПУ по разработанной методике хорошо согласуются с результатами модельных испытаний и CFD-расчетов.

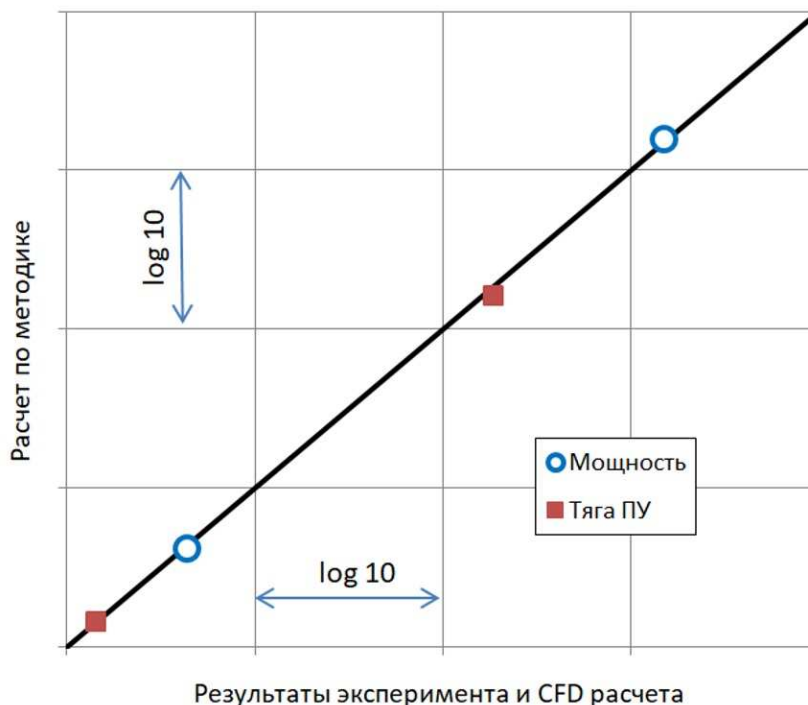


Рис. 9. Сопоставление результатов расчета по разработанной методике с результатами испытаний и CFD-моделирования, выполненных НПО «Винт»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая методика для проектирования и гидродинамического расчета характеристик ПУ тоннельного типа. В ходе создания методики развиты ее теоретические положения, решены задачи определения потерь напора на входе и выходе в канал ПУ, при обтекании гондолы и стоек редуктора, при течении через защитные решетки, также решена задача определения насосной характеристики и ее согласование с характеристикой канала ПУ. Планируется, что данная методика в дальнейшем придет на смену методике [4].

Разработанная методика включает в себя:

- алгоритмы проекторочного и поверочного расчета ПУ, основанные на решении задачи гидравлики о согласовании насосной и трубопроводной характеристик;
- диаграммы серии гребных винтов, построенные на основе CFD-расчетов, которые используются для построения насосной характеристики;
- аппроксимационные и графические зависимости для учета коэффициентов потерь напора на входе и выходе в канал ПУ, защитных решетках, гондole редуктора и держащих ее стойках. Трубопроводная характеристика определяется путем суммирования этих коэффициентов.

Эффективность методики и достоверность получаемых с ее помощью результатов подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными и результатами CFD-расчетов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на основании договора, заключенного между СПбГМТУ и Акционерным обществом «ЦС «Звездочка» (АО «ЦС «Звездочка»). Работы по теме в целом выполняются в рамках федерального проекта «Стимулирование спроса на отечественную продукцию судостроительной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Э.П. Тяговые характеристики ПУ в ходовом режиме / Э.П. Лебедев, И.Г. Шапошников // Тезисы докладов на Всесоюзной науч.-техн. конф. «Средства и методы улучшения ходкости мореходности судов» (Крыловские чтения 1981 г.). — Л.: Судостроение, 1981.
2. Слижевский Н.Б. Расчет тяговых характеристик подруливающего устройства при наличии скорости судна / Н.Б. Слижевский, М.Г. Соколик // Теория корабля и гидромеханика. — Николаев, 1980. — С. 63–67. — (Труды НКИ. Вып. 163).
3. Ачкинадзе А.Ш. Проектирование подруливающих устройств по диаграммам // Труды ЛКИ. — Л.: ЛКИ, 1981. — С. 17–26.
4. РД 5.076.031-82 Устройства подруливающие с гребными винтами фиксируемого и регулируемого шага. Методика гидродинамического расчета. 1982.
5. Мартиросов Г.Г. Проблемы и пути совершенствования судовых движителей и средств активного управления / Г.Г. Мартиросов // Сборник материалов 8-й Всесоюзной науч.-техн. конф. по судовым движителям и системам управления. — 1990. — С. 11–24.
6. Домнин А.В. Анализ методик расчета и использования подруливающих устройств / А.В. Домнин // Вестник ВГАВТ. — 2012. — Вып. 33. — С. 177–179.
7. Юдин Ю.И. Математическое моделирование работы подруливающего устройства / Ю.И. Юдин, А.Ю. Юдин, Г.И. Мартюк // Вестник МГТУ. — 2006. — Т. 9, № 2. — С. 220–223.
8. Рак А.Н. Эффективность подруливающих устройств при различных скоростях движения судна / А.Н. Рак // Вестник Морского государственного университета. — 2023. — Вып. 93. — С. 46–52.
9. Carlton J.S. Marine propellers and propulsion. 3rd ed. / J.S. Carlton. — Elsevier, 2012.
10. Development of low noise tunnel thrusters // Maritime Research Institute Netherlands. — [Электронный ресурс] URL: <http://www.marin.nl>.
11. Dang J., Ligtelijn D. Development of tunnel thruster series propellers for low noise and vibration / J. Dang, D. Ligtelijn // Sixth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'19), Rome, Italy. — May 1, 2019.
12. Шевцов С.П. Исследование гидродинамических характеристик подруливающего устройства типа «винт в трубе». Уточнение методики проектирования этих устройств, включая установки большой мощности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.П. Шевцов. — СПб., 2014.
13. Багринцев В.В. Оптимизация геометрии гребного винта подруливающего устройства для снижения периодических сил / В.В. Багринцев, А.А. Коваль, Н.В. Маринич // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — Специальный выпуск 2. — С. 67–72. — DOI 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-67-72.
14. Ермолаев А.А. Проблема вибрации подруливающих устройств и способы ее решения / А.А. Ермолаев, С.П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Специальный выпуск 1. — С. 67–74. DOI 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-67-74.
15. Guo J. Multiparameter collaborative optimization and analysis of the non-penetrating tunnel thruster / J. Guo, Y. Yang, C. Wang, Z. Hu et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Vol. 12, Issue 11. — P. 1960. — DOI 10.3390/jmse12111960.
16. Kinnas Sp.A. Performance prediction of a cavitating rim driven tunnel thruster / Sp.A. Kinnas, Sh.-H. Chang, L. He, J.T. Johannesse // First International Symposium on Marine Propulsors (SMP'09), Trondheim, Norway. — June 2009.
17. Яковлев А.Ю. Численное проектирование и экспериментальная проверка подруливающих устройств с кольцевым приводом / А.Ю. Яковлев, М.А. Соколов, Н.В. Маринич // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. — 2013. — № 73(357). — С. 17–32.
18. Lu P. Investigation of ventilation and current effect of tunnel thruster for DP applications / P. Lu, S. Wang // Proceedings of the ASME 2015, OMAE 2015, May 31 — June 2015. St. John's, Newfoundland, Canada. — Paper No. OMAE2015-42127.
19. Ермолаев А.А. Расчетная оценка влияния оформления входа в канал подруливающего устройства на величину силы, возникающей на борту / А.А. Ермолаев, Т.И. Сайфуллин, С.П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2015. — № 88(372). — С. 109–116.
20. Palmer Al. Experimental testing of an autonomous underwater vehicle with tunnel thrusters / Al. Palmer, Gr. E. Hearn, P. Stevenson // First International Symposium on Marine Propulsors (SMP'09), Trondheim, Norway. — June 2009.
21. Юрканский А.В. Исследование эффективности подруливающих устройств автономных необитаемых подводных аппаратов / А.В. Юрканский, И.И. Ремизов, С.А. Половко, Н.А. Щур // Робототехника и техническая кибернетика. — 2024. — № 4. — С. 305–314. — DOI 10.31776/RTSJ.12408.
22. Юрканский А.В. Об особенностях изменения тяги носовых подруливающих устройств подводных аппаратов / А.В. Юрканский, И.И. Ремизов // Морской вестник. — 2023. — № 4(88). С. 22–24.
23. Юрканский А.В. Особенности работы подруливающих устройств вблизи кормового конуса подводного аппарата / А.В. Юрканский, И.И. Ремизов, Н.А. Щур, С.А. Половко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2025. — № 3(413). — С. 69–75.
24. Афремов А.Ш. Средства активного управления судами / А.Ш. Афремов, Г.Г. Мартиросов, А.И. Немзер, А.А. Русецкий и др. СПб.: ФГУП КГНЦ, 2016.
25. Лобачев М.П. Проектирование и гидродинамический расчет водометных движителей / М.П. Лобачев, А.А. Русецкий, А.Ю. Яковлев. — СПб.: ФГУП КГНЦ, 2014.
26. Общие сведения о государственной программе. [Электронный ресурс] URL: <https://www.sudprom2030.ru/about> (дата обращения 26.03.2026).

27. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. — М.: Машиностроение, 1992.
28. Ким Ю.В. Исследование гидравлического сопротивления малогабаритных судовых обратных клапанов / Ю.В. Ким, А.Ю. Пономарева, А.В. Шайтанов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 87–92.
29. Подволоцкий Н.М. Регулирование подачи насосов объемного типа / Н.М. Подволоцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 80–88.
30. Подволоцкий Н.М. Сравнение эффективности регулирования подачи перепуском центробежного и винтового насосов / Н.М. Подволоцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 68/69. — С. 71–76.
31. Яковлев А.Ю. Метод расчета гидродинамических характеристик осевых рабочих колес / А.Ю. Яковлев // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — №3(45), т. 2. — С. 25–30.
32. Белая А.Б. Новая форма диаграмм и метод проектирования осевых рабочих колес, работающих в составе водометных движителей и подруливающих устройств / А.Б. Белая, А.Ю. Яковлев // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 4, ч. 1. 79–88. DOI 10.37220/MIT.2024.66.4.008.
33. The OpenFOAM Foundation. [Электронный ресурс] URL: <http://www.openfoam.org> (дата обращения 26.03.2026).
34. White Fank M. Fluid mechanics. 5th ed. McGraw Hill, 2011.
35. Ванифатьев А.В. Гидродинамические методы снижения вибронгруженности подруливающих устройств / А.В. Ванифатьев, А.С. Ионкин // Всероссийская молодежная конференция «Научно-технологическое развитие судостроения — 2019»: тезисы докладов. — СПб.: ФГУП КГНЦ, 2019. — С. 62–63.

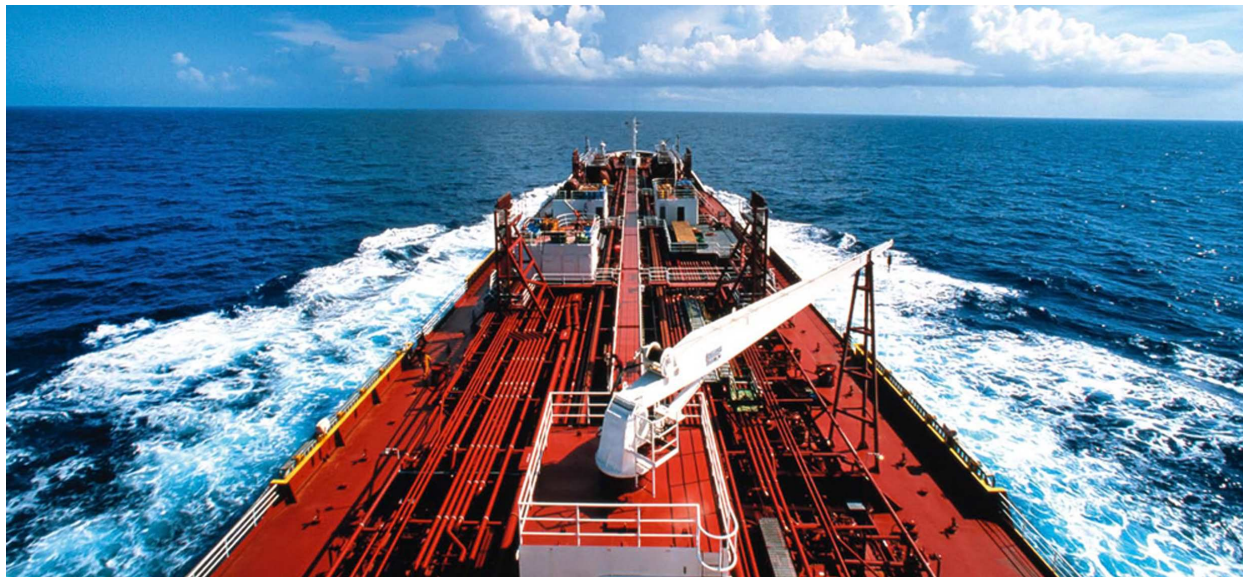
REFERENCES

1. Lebedev E.P., Shaposhnikov I.G. Tyagovye kharakteristiki PU v khodovom rezhime [Thrustor traction characteristics in running mode]. Tezisy dokladov na VNTK "Sredstva i metody uluchsheniya khodkosti morekhodnosti sudov" (Krylovskie chteniya 1981 g.) [Abstracts of reports at the All-Russian Scientific and Technical Conference "Means and Methods for Improving the Seaworthiness of Ships" (Krylov Readings 1981)]. Leningrad: Sudostroenie, 1981.
2. Slizhevskii N.B., Sokolik M.G. Raschet tyagovykh kharakteristik podrulivayushchego ustroystva pri nalichii skorosti sudna [Calculation of the thrust characteristics of the thruster given the vessel's speed]. *Teoriya korablya i gidromekhanika [Ship theory and hydromechanics]*. Nikolaev, 1980. P. 63–67. (Trudy NKI. Vyp. 163 [Transactions of the Nikolaev Shipbuilding Institute. Issue 163]).
3. Achkinadze A.Sh. Proektirovanie podrulivayushchikh ustroystv po diagrammam [Design of thrusters using diagrams]. *Trudy LKI [Transactions of the Leningrad Shipbuilding Institute]*. Leningrad: LKI, 1981. P. 17–26.
4. RD 5.076.031-82 Ustroystva podrulivayushchie s grebnymi vintami fiksiruemogo i reguliruemogo shaga. Metodika gidrodinamicheskogo rascheta [Thrusters with fixed-pitch and variable-pitch propellers. Hydrodynamic calculation method]. 1982.
5. Martirosov G.G. Problemy i puti sovershenstvovaniya sudovykh dvizhitelei i sredstv aktivnogo upravleniya [Problems and ways of improving ship propulsion systems and active control devices]. *Sbornik materialov 8-i Vsesoyuznoi nauch.-tekhn. konf. po sudovym dvizhityam i sistemam upravleniya [Proceedings of the 8th All-Union science and tech. conf on ship propulsion and control systems]*. 1990. P. 11–24.
6. Domnin A.V. Analysis methods of calculation and using thrusters. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2012. Issue 33. P. 177–179. (In Russ.)
7. Yudin Yu.I., Yudin A.Yu., Martyuk G.I. Mathematical modelling of maneuvering propulsion device operation. *Vestnik of MSTU*. 2006. Vol. 9, No. 2. P. 220–223. (In Russ.)
8. Rak A.N. Efficiency of thrusters at different speeds of the vessel. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the State Marine University]*. 2023. Issue. 93. P. 46–52. (In Russ.)
9. Carlton J.S. Marine propellers and propulsion. 3rd ed. Elsevier, 2012.
10. Development of low noise tunnel thrusters. *Maritime Research Institute Netherlands*. URL: <http://www.marin.nl>.
11. Dang J., Ligtelijn D. Development of tunnel thruster series propellers for low noise and vibration. *Sixth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'19)*, Rome, Italy. May 1, 2019.
12. Shevtsov S.P. Issledovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik podrulivayushchego ustroystva tipa «vint v trube». Utochnenie metodiki proektirovaniya etikh ustroystv vklyuchaya ustanovki bol'shoi moshchnosti [A study of the hydrodynamic characteristics of a propeller-in-a-pipe thruster. Refinement of the design methodology for these devices, including high-power units: abstract of PhD thesis]. St. Petersburg, 2014.
13. Bagrintsev V.V., Koval A.A., Marinich N.V. Optimization of thruster propeller geometry to mitigate periodical forces. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Special edition 2. P. 67–72. DOI 10.24937/2542-2324-2019-2-S-1-67-72. (In Russ.)
14. Ermolaev A., Shevtsov S. Thruster vibration problem and solutions. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Special issue 1. P. 67–74. DOI 10.24937/2542-2324-2018-1-S-1-67-74. (In Russ.)
15. Guo J., Yang Y., Wang C., Hu Z. et al. Multiparameter collaborative optimization and analysis of the non-penetrating tunnel thruster. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, Issue 11. P. 1960. DOI 10.3390/jmse12111960.
16. Kinnas Sp.A., Chang Sh.-H., He L., Johannesse J.T. Performance prediction of a cavitating rim driven tunnel thruster. *First International Symposium on Marine Propulsors (SMP'09)*, Trondheim, Norway, June 2009.
17. Yakovlev A.Yu., Sokolov M.A., Marinich N.V. Numerical design and experimental verification of thruster with circumferential drive. *Transactions of the Krylov Central Research Institute*. 2013. No. 73(357). P. 17–32. (In Russ.)
18. Lu P., Wang S. Investigation of ventilation and current effect of tunnel thruster for DP applications. *Proceedings of the ASME 2015, OMAE 2015*. May 31 — June 2015, St.John's, Newfoundland, Canada. Paper No. OMAE2015-42127.
19. Yermolaev A.A., Saifullin T.I., Shevtsov S.P. Effect of the thruster inlet configuration upon the force arising on the side. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2015. No. 88(372). P. 109–116. (In Russ.)
20. Palmer Al., Hearn Gr. E., Stevenson P. Experimental testing of an autonomous underwater vehicle with tunnel thrusters. *First International Symposium on Marine Propulsors (SMP'09)*, Trondheim, Norway. June 2009.
21. Yurkanskiy A.V., Remizov I.I., Polovko S.A., Tschur N.A. Investigation of the efficiency of side thrusters of autonomous unmanned underwater vehicles. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. No. 4. P. 305–314. DOI 10.31776/RTCJ.12408. (In Russ.)

22. Yurkansky A.V., Remizov I.I. On the peculiarities of changing the thrust of bow thrusters of underwater vehicles. *Morskoy Vestnik*. 2023. No. 4(88). P. 22–24.
23. Yurkanskiy A.V., Remizov I.I., Tschur N.A., Polovko S.A. Specifics of maneuvering thruster performance near aft cone of underwater vehicle. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2025. No. 3(413). P. 69–75. (In Russ.)
24. Afremov A.Sh., Martirosov G.G., Nemzer A.I., Rusetskii A.A. et al. *Sredstva aktivnogo upravleniya sudami* [Active ship control tools]. St. Petersburg: FGUP KGNTs, 2016.
25. Lobachev M.P., Rusetskii A.A., Yakovlev A.Yu. *Proektirovanie i gidrodinamicheskii raschet vodometnykh dvizhitelei* [Design and hydrodynamic calculation of water jet propulsion systems]. St. Petersburg: FGUP KGNTs, 2014.
26. *Obshchie svedeniya o gosudarstvennoi programme* [General information about the state program]. URL: <https://www.sudprom2030.ru/about> (accessed 26.03.2026).
27. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / pod red. M.O. Shteinberga* [Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistances: 3rd ed., rev. and. suppl. / Ed. by M.O. Steinberg]. Moscow: Mashinostroenie, 1992.
28. Kim Yu.V., Ponomareva A.Yu., Shaitanov A.V. Research of hydraulic resistance of small-size ship non-return valves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 87–92. (In Russ.)
29. Podvolotsky N.M. Capacity regulation of volume pumps. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 80–88. (In Russ.)
30. Podvolotsky N.M. Comparison of parameters in feed regulation of centrifugal and screw pumps. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2022. No. 68/69. P. 71–76. (In Russ.)
31. Yakovlev A.Yu. Method of calculating the hydrodynamic characteristics of axial-flow impellers. *Marine Intellectual Technologies*. 2019. No. 3(45), vol. 2. P. 25–30. (In Russ.)
32. Belaia A.B., Yakovlev A.Yu. A new form of diagrams and a method for designing axial impellers operating as part of waterjets and thrusters. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 4, part 1. P. 79–88. DOI 10.37220/MIT.2024.66.4.008. (In Russ.)
33. The OpenFOAM Foundation. URL: <http://www.openfoam.org> (accessed 26.03.2026).
34. White Fank M. *Fluid mechanics*. 5th ed. McGraw Hill, 2011.
35. Vanifat'ev A.V., Ionkin A.S. Gidrodinamicheskie metody snizheniya vibronagruzhennosti podrulivayushchikh ustroystv [Hydrodynamic methods for reducing vibration loading of thrusters]. *Vserossiiskaya molodezhnaya konferentsiya «Nauchno-tekhnologicheskoe razvitie sudostroeniya – 2019»* [All-Russian youth conf. "Scientific and technological development of shipbuilding — 2019": abstracts]. St. Petersburg: FGUP KGNTs. P. 62–63.

Статья поступила в редакцию 28.01.2026.

Принята к публикации 12.03.2026.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.011
EDN NYDUWG

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОБЩЕСТВ К ТОЛЩИНЕ БОРТОВОЙ ОБШИВКИ

Э.А. Кузнецов, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: eduard-kuz.555@mail.ru

В статье выполнен сравнительный анализ требований ведущих классификационных обществ, входящих в состав МАКО, к минимальной толщине бортовой обшивки в среднем районе судна. Исследование охватывает правила таких организаций, как Российский морской регистр судоходства (РС), DNV GL, Bureau Veritas, American Bureau of Shipping и других. На основе базы данных регистровой книги, насчитывающей более трех тысяч судов, произведены расчеты минимальной толщины бортовой обшивки в соответствии с нормативами каждого общества. Полученные результаты позволили не только сопоставить уровень требований различных классификационных обществ и выявить общемировые тренды в данной области, но и оценить конкурентоспособность и потенциальные резервы отечественного флота. Для приближения требований РС к требованиям иностранных классификационных обществ и для облегчения принятия судна под класс РС предложен вариант корректировки расчетной формулы для минимальных толщин бортовой обшивки.

Ключевые слова: бортовая обшивка, классификационное общество, требования правил, минимальные толщины.

Для цитирования: Кузнецов Э.А. Сравнительный анализ требований классификационных обществ к толщине бортовой обшивки / Э.А. Кузнецов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 124–132. — EDN NYDUWG.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CLASSIFICATION SOCIETIES' REQUIREMENTS FOR THICKNESS OF SIDE SHELL PLATING

E.A. Kuznecov, PhD student, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: eduard-kuz.555@mail.ru

This paper presents a comparative analysis of the requirements set by leading classification societies within IACS for the minimum thickness of side shell plating in the midship region. The study covers the rules of such organizations as the Russian Maritime Register of Shipping (RS), DNV GL, Bureau Veritas, American Bureau of Shipping, and others. Based on an extensive register book database comprising more than three thousand vessels, calculations of the minimum side shell plating thickness were performed in accordance with the standards of each society. The obtained results allowed not only for a comparison of the requirement levels of different classification societies and the identification of global trends in this area but also for an assessment of the competitiveness and potential reserves of the domestic fleet. To align the requirements of RS with those of foreign classification societies and to facilitate the process of assigning a ship to the RS class, a proposal for adjusting the calculation formula for minimum side shell plating thickness is put forward.

Key words: side shell plating, classification society, rules requirements, minimum thicknesses.

For citation: Kuznecov E.A. Comparative analysis of classification societies' requirements for thickness of side shell plating. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 124–132. EDN NYDUWG. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве ведущих судостроительных стран имеются классификационные общества (КО), которые являются независимыми неправительственными организациями, устанавливающими и поддерживающими технические стандарты для проектирования, постройки и эксплуатации судов и морских сооружений. Одними из наиболее известных КО, входящими в состав Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО), являются:

- Российский морской регистр судоходства (РС) — ранее входил в состав МАКО;
- American Bureau of Shipping (ABS);
- Lloyd's Register (LR);
- Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV GL);
- Bureau Veritas (BV);
- Korean Register of Shipping (KR);
- China Classification Society (CCS).

В состав МАКО также входят Croatian Register of Shipping (CRS), Indian Register of Shipping (IRS), Nippon Kaiji Kyokai (NK), Polish Register of Shipping (PRS) и Registro Italiano Navale (RINA), но общий тоннаж судов под классом данных КО значительно ниже, чем у вышперечисленных.

В каждом КО имеются определенные требования к конструктивным элементам корпуса судна. Соблюдение данных требований позволяет обеспечить базовый уровень прочности, при котором судно может безопасно эксплуатироваться в течение своего нормативного срока при условии, что действующие нагрузки не превышают проектных. Кроме расчетных значений геометрических характеристик элементов корпусных конструкций существуют минимальные требования, служащие ориентиром, ниже которого принимать размер той или иной связи запрещается. Зная уровень минимальных требований классификационных обществ, можно отследить общемировую тенденцию по уровню запаса прочности.

Ранее в работах [1, 2, 9] производилось сравнение требований РС, LR, DNV GL и CCS к бортовой обшивке промысловых судов на основе базы данных регистровой книги. Целью данной работы является анализ требований КО к минимальной толщине бортовой обшивки судов для определения среднего рекомендуемого уровня требований и оценки конкурентоспособности отечественного флота.

1. СРАВНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОБЩЕСТВ

Для возможности наглядного сравнения требований КО к толщине бортовой обшивки использована база данных регистровой книги РС с общим количеством около 3500 судов (рис. 1).

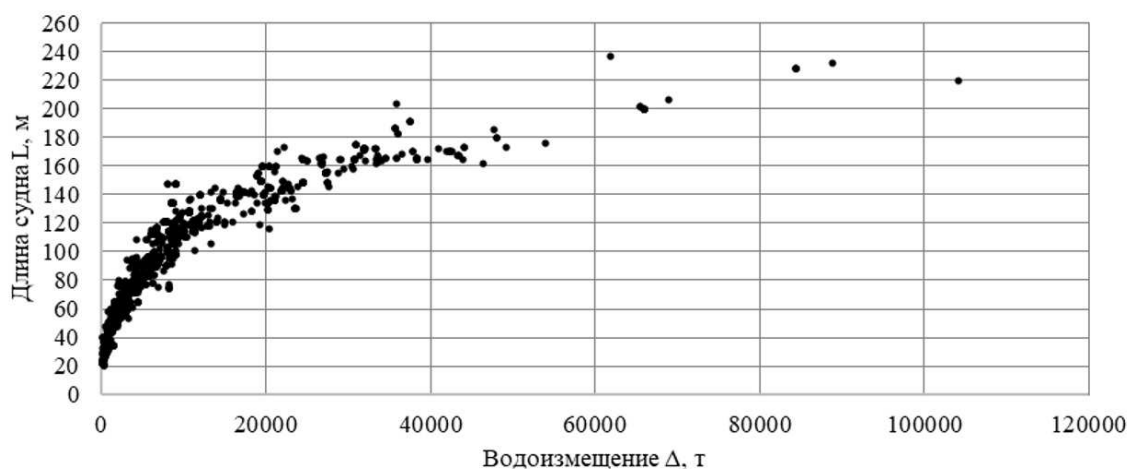


Рис. 1. База данных судов по регистровой книге

Ниже представлены требования крупнейших КО к минимальной толщине бортовой обшивки в среднем районе корпуса судна при поперечной системе набора [3–8]. В качестве материала принята судостроительная сталь с пределом текучести $R_{eH}=235$ МПа. Нормальная шпация, используемая в расчетах, принимается согласно требованиям соответствующего КО.

1.1. Российский морской регистр судоходства.

Требования РС к минимальной толщине наружной обшивки неоднократно изменялись. Постоянный поиск новых решений говорит о том, что Правила регулярно совершенствуются и стараются соответствовать общемировым трендам. В статье рассмотрены основные изменения в формуле минимальной толщины бортовой обшивки за последние 55 лет.

Формула РС 1970:

$$s_{\min} = \frac{a \cdot 24(L + 37)}{0,6 \cdot L + 240}, \quad (1.1)$$

где a — расстояние между балками (шпация), м; но не менее $0,9a_0$;
 $a_0 = 0,002L + 0,48$ — нормальная шпация;
 L — длина судна, м.

Формула РС 1977:

$$s_{\min} = 0,07L + 3,6 \text{ при } L < 80 \text{ м}, \quad (1.2-1)$$

$$s_{\min} = 0,04L + 6,0 \text{ при } L \geq 80 \text{ м}. \quad (1.2-2)$$

Формула РС 1981–1995:

$$s_{\min} = 0,04L + 6,0 \text{ при } L \geq 80 \text{ м}, \quad (1.3-1)$$

$$s_{\min} = 0,05L + 5,2 \text{ при } 30 \leq L < 80 \text{ м}, \quad (1.3-2)$$

$$s_{\min} = 0,12L + 3,1 \text{ при } L < 30 \text{ м}. \quad (1.3-3)$$

Формула РС 1999–2025:

$$s_{\min} = 3,1 + 0,12L \text{ при } L < 30 \text{ м}, \quad (1.4-1)$$

$$s_{\min} = (5,5 + 0,04L)\sqrt{\eta} \text{ при } L \geq 30 \text{ м}, \quad (1.4-2)$$

где η — коэффициент использования механических свойств стали.

При $L > 300$ м принимается $L = 300$ м.

На рис. 2 представлена сводная диаграмма с результатами расчета минимальной толщины бортовой обшивки по Правилам РС для представленных формул.

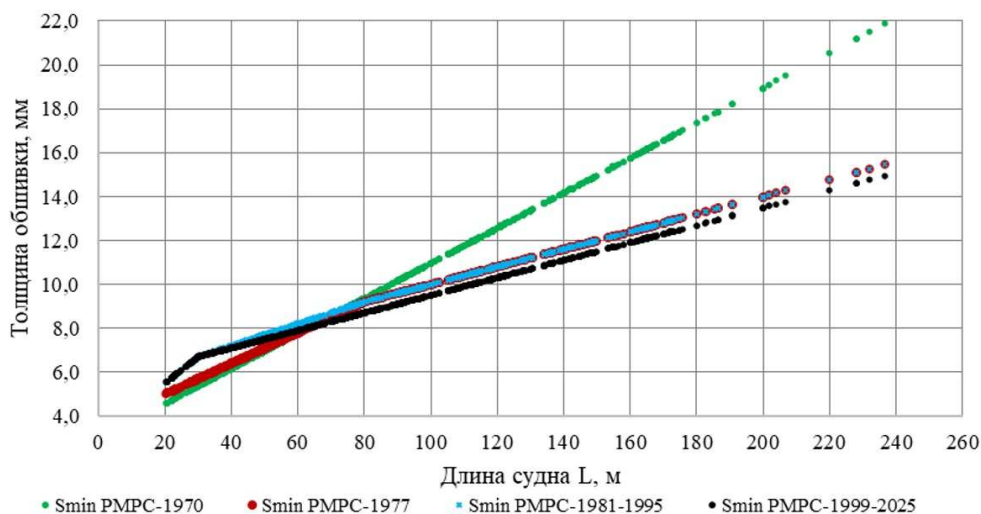


Рис. 2. Минимальная толщина бортовой обшивки по Правилам РС 1970–2025 гг.

По диаграмме видно, что в версии Правил 1970 г. требования для крупных судов были значительно завышены. Формула при этом распространялась на весь диапазон судов по длине и учитывала фактическую шпацию.

В 1977 г. были внесены изменения, в результате которых для крупных судов требования значительно снизились, а для малых и средних судов длиной 20–50 м несколько увеличились. Формула по-прежнему осталась линейной, но при этом была разбита на два интервала с границей на длине 80 м.

В период с 1981 по 1995 г. формула в очередной раз претерпела изменения. К двум интервалам добавился третий с границей на длине 30 м. Требования для малых судов существенно возросли. Так, для судов длиной 30 м минимальная толщина увеличилась на 1 мм, что составляет 17,5 %. Для судов длиной более 30 и менее 80 м увеличение получилось не столь значительным — в среднем около 6 %.

Последняя версия Правил, сохранившаяся с 1999 г., вновь указывает два интервала, но с границей на 30 м. Требования для судов менее 30 м остались без изменений относительно версии 1981–1995 гг. Для судов с длиной от 30 до 80 м требования плавно уменьшаются, достигая разницы в 0,5 мм, которая впоследствии распространяется и на более крупные суда.

1.2. American Bureau of Shipping (ABS).

В отличие от большинства остальных зарубежных коллег, Американское бюро судоходства при определении требуемой минимальной толщины бортовой обшивки использует в Правилах не только длину судна или шпацию, а также осадку и высоту борта.

Для судов длиной менее 90 м минимальная толщина бортовой обшивки, мм:

$$t = s\sqrt{h/268} + 2,5, \quad (1.5-1)$$

где s — шпация продольных или поперечных балок, мм;
 h — расчетная высота борта, м, но при этом не менее $0,1L$ или $1,18d_s$, в зависимости от того, что больше;
 L — длина судна, м;
 d_s — расчетная осадка или $0,066L$, смотря что больше.

Для судов длиной более 90 м, но менее 427 м минимальная толщина бортовой обшивки в пределах среднего района судна длиной $0,4L$:

$$t = (s/645)\sqrt{(L-15,2)(d_s/D_s)} + 2,5 \text{ мм, при } L < 305 \text{ м,} \quad (1.5-2)$$

$$t = (s/828)\sqrt{(L+175)(d_s/D_s)} + 2,5 \text{ мм, при } 305 < L \leq 427 \text{ м,} \quad (1.5-3)$$

где d_s — расчетная осадка, м;
 D_s — высота борта, м.

Результаты расчетов с использованием базы данных судов для ABS представлены на отдельной диаграмме (рис. 3). Для удобства сравнения с другими КО на сводной диаграмме представлена линейная аппроксимация со степенью достоверности 0,95.

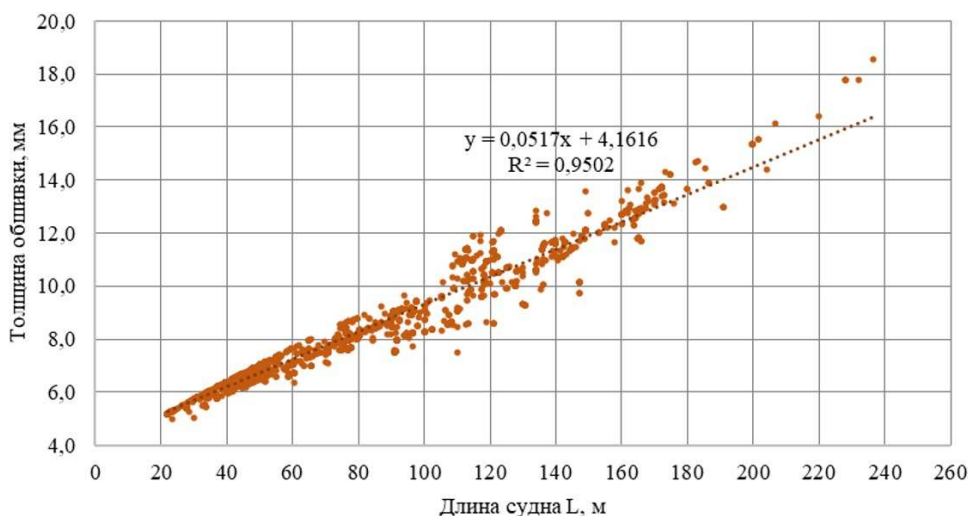


Рис. 3. Требуемые минимальные толщины по Правилам ABS

1.3. Lloyd's Register (LR).

Расчетная формула минимальной толщины бортовой обшивки в Правилах Регистра Ллойда имеет довольно много исходных данных и излишне перегружена дополнительными символами и перекрестными ссылками. В Правилах РС и других иностранных классификационных обществ (ИКО) данная формула выглядит значительно проще и позволяет оперативно рассчитать требуемую величину. Кроме того, формула LR разделена для различных районов по высоте — $D/2$, $D/4$ и промежуточные районы, требующие линейной интерполяции, — а также учитывает систему набора.

Для принятого в расчетах района в пределах $D/4$ от половины высоты борта формула имеет следующий вид:

$$t = 0,001s_1(0,059L_1 + 7)\sqrt{F_D/k_L}, \quad (1.6-1)$$

$$t = 0,0051s_1\sqrt{T1^k}, \quad (1.6-2)$$

где $s_1 = 470 + L/0,6$ — нормальная шпация, мм, но не менее 700 мм;
 $L_1 = L$ — длина судна, но не более 190 м;
 F_D — местный редуцированный коэффициент;
 $T1$ — расчетная осадка;
 k — коэффициент использования механических свойств стали.

На рис. 4 представлены результаты расчетов по формуле LR для рассматриваемой базы данных, а также представлена линейная линия тренда со степенью достоверности 0,98.

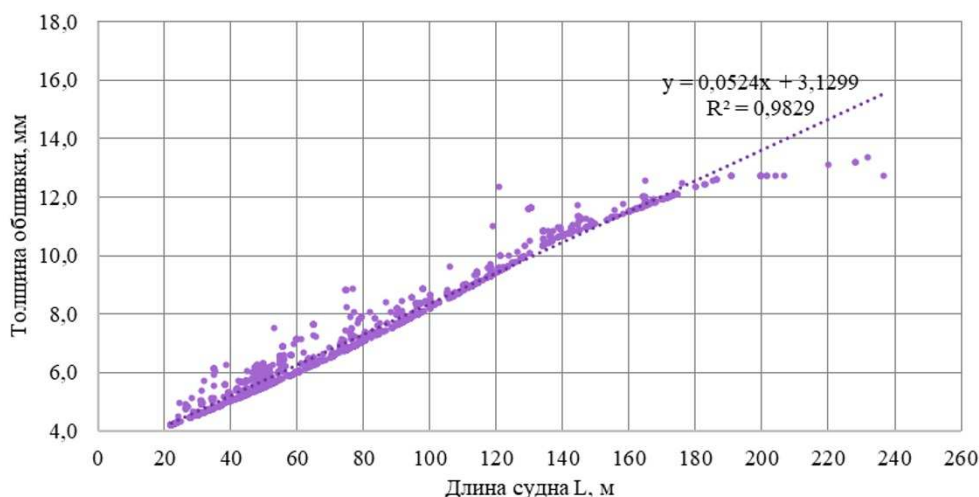


Рис. 4. Требуемые минимальные толщины по Правилам LR

1.4. Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV GL).

Правила классификации и постройки DNV GL в части корпуса разделены на два тома: суда длиной менее чем и более либо равной 100 м. По своему виду формула практически совпадает со второй частью современной формулы (1.4-2) Правил РС, за исключением того, что в российской версии слагаемое на 0,5 больше. Еще одной схожей частью формул DNV GL и РС является ограничение длины значением в 300 м и введением коэффициента использования механических свойств для более крупных судов.

Для судов длиной менее 100 м минимальная толщина бортовой обшивки, мм:

$$t = 5,0 + k \cdot L + t_k, \quad (1.7-1)$$

где $k = 0,04$ на высоте до 4,6 м выше летней грузовой ватерлинии. На каждые следующие 2,3 м выше этого уровня значение коэффициента k может быть уменьшено на 0,01 (минимальное значение $k = 0$);
 t_k — коррозионная надбавка, мм.

Для судов длиной 100 м и более минимальная толщина бортовой обшивки, мм:

$$t = 5,0 + k \cdot L_1 / \sqrt{f_1} + t_k, \quad (1.7-2)$$

где f_1 — коэффициент использования механических свойств стали;
 L_1 — длина судна L , но не более 300 м.

Основным отличием формулы DNV GL является дополнительное слагаемое в виде коррозионной надбавки t_k . В дальнейших расчетах для корректного сравнения коррозионная надбавка не учитывалась, поскольку в Правилах других КО в данной формуле она отсутствует.

1.5. Bureau Veritas (BV).

В требованиях Правил Bureau Veritas в общем разделе отсутствует привычная формула минимальной толщины обшивки. Вместо нее содержится следующий пункт: «суммарная толщина, в мм, всех конструктивных элементов, включая обшивку, стенку и полку (при ее наличии) профилей и книц, стенки и полки рамных балок, должна быть не менее 5,0 мм».

Формула минимальной толщины бортовой обшивки, подобная формулам остальных КО, содержится в разделе, посвященном носовой оконечности:

$$t = c_F(0,03L_3 + 5,5)k^{1/2} - c_E, \quad (1.8)$$

c_F — коэффициент, принимаемый равным 0,9 для бортов надстройки бака; 1,0 — в остальных случаях;

c_E — коэффициент, принимаемый:

при $L > 65$ м, $c_E = 1$;

при $65 < L < 90$ м, $c_E = 3 - L/32,5$;

при $L \geq 90$ м, $c_E = 0$;

L_3 — длина судна L , но не более 300 м;

k — коэффициент использования механических свойств стали.

Представленная формула также напоминает требования РС и DNV GL, только множитель перед длиной судна L , м, составляет 0,03 вместо 0,04. Соответственно, минимальные требования к толщине бортовой обшивки в BV ниже, чем у коллег.

1.6. Korean Register of Shipping (KR).

Требования к минимальной толщине наружной обшивки в Korean Register представлены в табличной форме (см. табл. 1) и разделены по длине судна на носовую и кормовую оконечности, машинное отделение и остальные части, то есть среднюю часть. При этом для бортовой обшивки и днищевого и скулового поясьев требования одинаковые.

Таблица 1

Требования KR к минимальной толщине наружной обшивки

Элемент	Пояс	Район по длине	Толщина обшивки
Наружная обшивка	Днище	Носовая часть	$5,5 + 0,03L_2\sqrt{k}$
	Бортовая обшивка	Машинное отделение Кормовая часть	$7,0 + 0,02L_2\sqrt{k}$
	Скула	В других местах	$4,5 + 0,02L_2\sqrt{k}$

где L_2 — длина судна L , но не более 300 м;
 k — коэффициент использования механических свойств стали.

Формулы KR имеют привычный вид и выглядят в целом как у других КО. Требования для среднего района заметно ниже, поскольку коэффициент перед длиной судна L , м, 0,02 вместо 0,04 и 0,03 у коллег. Второе слагаемое также меньше и равняется 4,5 мм.

Формула для носового района идентична требованиям Bureau Veritas, за исключением того, что в BV есть дополнительные поправочные коэффициенты, снижающие требования для малых и средних судов.

1.7. China Classification Society (CCS).

В правилах CCS требования к толщине бортовой обшивки по аналогии с LR разделены по высоте на районы 1/4D, 1/2D, 3/4D и промежуточные районы. Кроме того, требования различаются в зависимости от системы набора, продольной или поперечной.

Формула для толщины бортовой обшивки на высоте 1/2D от основной плоскости выглядит следующим образом:

$$t_1 = 0,06s(L + 110)\sqrt{F_m/K}, \quad (1.9-1)$$

$$t_2 = 5,1s\sqrt{(d + h_2)F_bK}, \quad (1.9-2)$$

где L — длина судна, но не более 190 м;

F_d, F_m — редуцированный коэффициент;

d — осадка судна;

h_2 — 0,5C, но не более 0,36d;

C — волновой коэффициент;

K — коэффициент использования механических свойств стали.

Кроме данной формулы имеется также отдельный пункт правил, регламентирующий минимальную толщину бортовой обшивки:

$$t = (0,035L + 6)\sqrt{K}. \quad (1.10)$$

Как видно по результатам расчета (рис. 5), минимальные требуемые значения, полученные по формуле (1.10) для малых и средних судов, значительно завышены. Минимальная толщина бортовой обшивки начинается от 6,5 мм, что довольно много для судов длиной около 20 м.

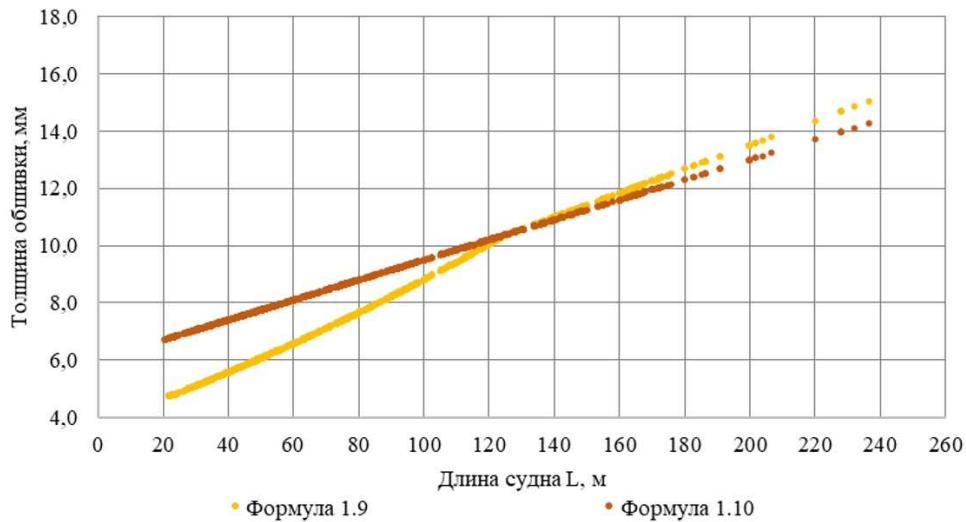


Рис. 5. Требуемые минимальные толщины по Правилам CCS

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для наглядного сравнения требований КО к минимальной толщине бортовой обшивки результаты расчетов объединены на сводной диаграмме (рис. 6).

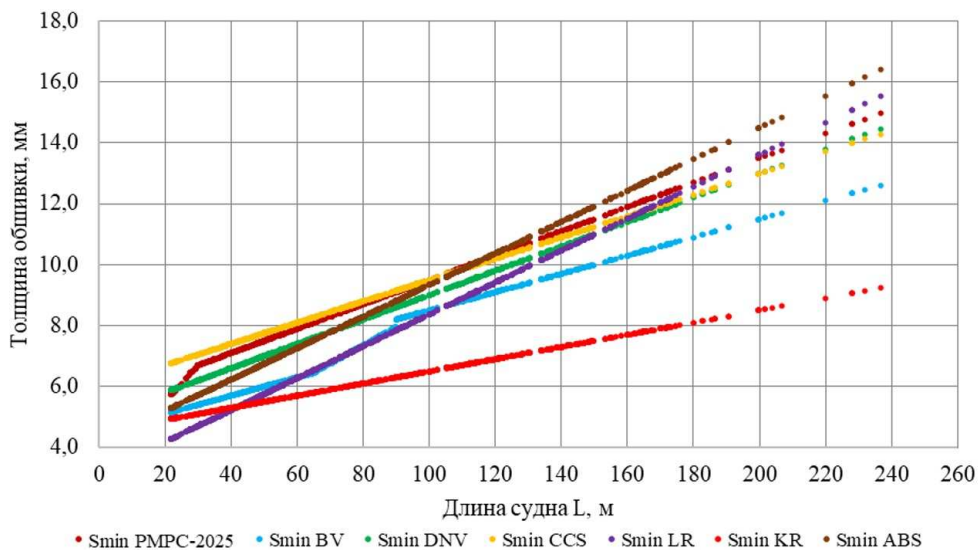


Рис. 6. Результаты расчетов минимальной толщины бортовой обшивки

Анализируя требования Правил КО и сводную диаграмму, можно сформулировать следующие выводы.

- Минимальные требования Korean Register of Shipping к бортовой обшивке в среднем районе судна существенно ниже остальных коллег. Однако требования для обшивки в оконечностях и в районе машинного отделения выше, чем для среднего района (см. табл. 1), но также несколько уступают другим ИКО.

- Требования Bureau Veritas для носового района находятся на нижней границе общемирового тренда. Для среднего же района требования к бортовой обшивке еще ниже и составляют $t_{const} = 5$ мм.

- Следующим классификационным обществом, «закрывающим» нижнюю границу тренда, является Lloyd's Register. Требования к малым и средним судам длиной 20–40 м заметно ниже, чем у коллег. Для судов длиной 100–190 м требуемая толщина обшивки близка к остальным ИКО с разницей порядка 0,5–1,0 мм. Если оценивать не линейную аппроксимацию, а результаты расчетов по формуле (1.6-1), видно, что значения для более крупных судов практически не увеличиваются (рис. 4). Это связано с ограничением L_1 не более 190 м, в то время как у большинства коллег ограничение составляет 300 м.

- Требования American Bureau of Shipping являются наиболее «гибкими», поскольку зависят не только от длины, как у большинства остальных КО, но и от осадки d_s , высоты борта D_s и шпации s . Линейная аппроксимация значений, полученных по Правилам ABS, практически параллельна требованиям Ллойда, но при этом выше в среднем на 1,0 мм. Минусом требований ABS является отсутствие коэффициента использования механических свойств стали.

- Для судов с расчетной длиной от 100 до 200 м требования к минимальной толщине бортовой обшивки у большинства КО практически одинаковы. Разница между требованиями PC, CCS, ABS и LR в этом диапазоне не превышает 1,0 мм.

- Для малых и средних судов длиной от 20 до 80 м требования PC и CCS в среднем выше, чем у остальных ИКО, на 0,5–1,5 мм. При этом в Правилах CCS имеется вторая формула (1.9), требования согласно которой ближе к кривой BV.

Оценивая возможность перехода судна из ИКО под наблюдение PC, можно заключить, что для большинства крупных судов, длиной 80 м и более, требования к минимальной толщине бортовой обшивки находятся примерно на одном уровне. Для малых и средних судов длиной от 20 до 80 м в большинстве случаев минимальные требования выше на 0,5–1,5 мм, чем у остальных КО. В связи с этим при принятии зарубежных судов в класс PC может потребоваться замена бортовой обшивки, что приведет к существенным затратам.

Для повышения конкурентоспособности и приближения требований PC к общемировым ниже рассмотрен возможный вариант изменения расчетной формулы (рис. 7):

$$s_{\min} = 3,6 + 0,07L \text{ при } L < 65 \text{ м,} \quad (1.11-1)$$

$$s_{\min} = (5,5 + 0,04L)\sqrt{\eta} \text{ при } L \geq 65 \text{ м.} \quad (1.11-2)$$

В результате первая часть формулы будет соответствовать требованиям образца 1977 г., а вторая — существующим Правилам PC.

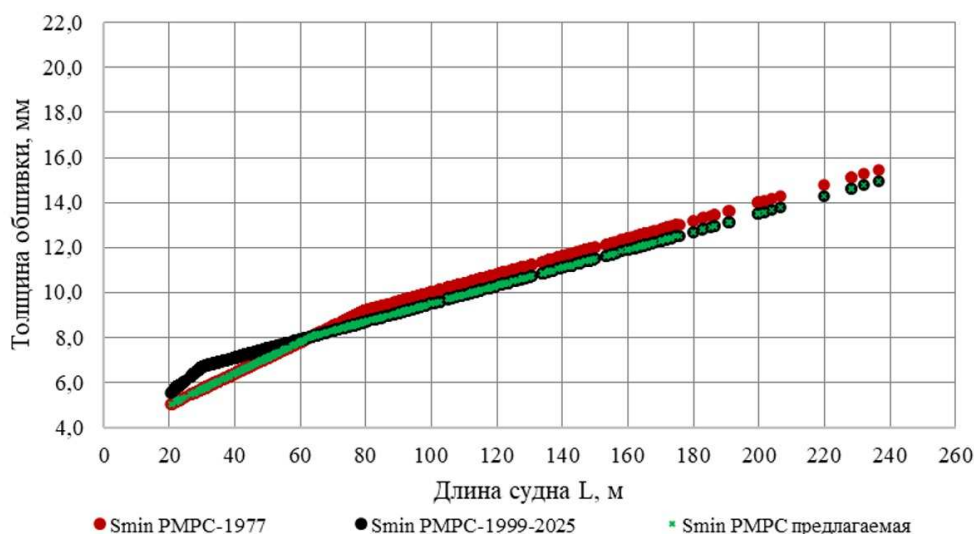


Рис. 7. Предлагаемая редакция требований к минимальной толщине бортовой обшивки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ требований ведущих классификационных обществ к минимальной толщине бортовой обшивки морских судов в среднем районе позволил отследить общемировые тренды.

Полученные результаты могут быть полезны как на ранних стадиях проектирования, так и при переходе судна из одного классификационного общества в другое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Э.А. Анализ требований к бортовому набору рыболовных судов / Э.А. Кузнецов, А.О. Котов // Наука, инновации и технологии: От идей к внедрению: м-лы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 г. — С. 280–283.
2. Кузнецов Э.А. Усиления корпусов судов, швартующихся в море / Э.А. Кузнецов, В.А. Кулеш // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2023. — № 4(57). — С. 56–62.
3. Правила классификации и постройки морских судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
4. Rules for Building and Classing — Marine Vessels / American Bureau of Shipping. — Houston, TX, 2025.
5. Rules for Classification of Ships / DNV GL AS. — Høvik, July 2017.
6. Rules for Construction of Sea-Going Steel Ships / China Classification Society. — Beijing, 2025.
7. Rules for the Classification of Steel Ships / Korean Register of Shipping. — Seongnam-si, 2025.
8. Rules for the Classification of Steel Ships / Bureau Veritas. — Paris, July 2025.
9. Kuznetsov E.A. Comparative analysis of design requirements for fishing vessels and offers for their development / E.A. Kuznetsov, V.A. Kulesh, G.A. Isaev, A.O. Kotov // The 35th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2022): Program and Proceedings. — Vladivostok: Publishing house of the Maritime State University named Admiral Nevelskoi, 2022. — P. 66–71.

REFERENCES

1. Kuznetsov E.A., Kotov A.O. Analysis of requirements for the side framing of fishing vessels. *Science, Innovations and Technologies: From Ideas to Implementation. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*, Komsomolsk-on-Amur, November 14–18, 2022. P. 280–283. (In Russ.)
2. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A. Hull reinforcements for vessels mooring at sea. *Vestnik Inzhenernoi Shkoly Dalnevostochnogo Federalnogo Universiteta [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]*. 2023. No. (4)57. P. 56–62. (In Russ.)
3. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
4. Rules for Building and Classing — Marine Vessels / American Bureau of Shipping. Houston, TX, 2025.
5. Rules for Classification of Ships / DNV GL AS. Høvik, July 2017.
6. Rules for Construction of Sea-Going Steel Ships / China Classification Society. Beijing, 2025.
7. Rules for the Classification of Steel Ships / Korean Register of Shipping. Seongnam-si, 2025.
8. Rules for the Classification of Steel Ships / Bureau Veritas. Paris, July 2025.
9. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Isaev G.A., Kotov A.O. Comparative analysis of design requirements for fishing vessels and offers for their development. *The 35th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2022): Program and Proceedings*. Vladivostok: Publishing house of the Maritime State University named Admiral Nevelskoi, 2022. P. 66–71.

Статья поступила в редакцию 16.11.2025.

Принята к публикации 10.03.2026.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 656.6:620.193; 656.6:620.197
EDN SQZJFY

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНДАРТНОГО И НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ПФ-115 В УСЛОВИЯХ МОРСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.В. Фатьянова, PhD, Азербайджанская государственная морская академия, AZ1000, г. Баку, ул. З. Алиева, 18, email: nice.natali92@mail.ru

Эксплуатация металлических конструкций судов и прибрежных сооружений в условиях морской атмосферы сопровождается интенсивным воздействием коррозионно-активных факторов, включая повышенную влажность, солесодержание воздуха, температурные перепады и ультрафиолетовое излучение. Указанные воздействия приводят к ускоренному разрушению защитных покрытий и снижению долговечности металлоконструкций. Одним из наиболее распространенных лакокрасочных материалов для антикоррозионной защиты является эмаль ПФ-115, однако ее эксплуатационная устойчивость в агрессивной морской среде ограничена, что обуславливает необходимость повышения защитной эффективности покрытия.

Целью работы является сравнительная оценка защитных свойств стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 при воздействии факторов, моделирующих морскую эксплуатацию. В задачи исследования входили анализ рецептурного состава покрытий, проведение ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана, климатических циклических испытаний с переменной влажностью и температурой, оценка адгезии и исследование микроструктуры покрытий. В качестве наномодификаторов использованы оксид цинка и диоксид титана с размером частиц 20–100 нм при суммарном содержании до 3 % от массы сухого вещества.

Установлено, что введение нанодисперсных добавок способствует снижению скорости коррозии, увеличению числа климатических циклов до появления признаков разрушения покрытия в 1,8–2 раза, сохранению адгезии на уровне 4,0–4,8 балла после 60 циклов испытаний и предотвращению образования локальной подпленочной коррозии.

Полученные результаты подтверждают повышение барьерных свойств и эксплуатационной надежности наномодифицированного покрытия ПФ-115 и свидетельствуют о целесообразности его применения для защиты судовых и прибрежных металлических конструкций в условиях морской среды.

Ключевые слова: ПФ-115, наномодификация, оксид цинка, диоксид титана, антикоррозионное покрытие, морская среда, барьерные свойства, адгезия.

Для цитирования: Фатьянова Н.В. Сравнительная оценка защитной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 в условиях морской эксплуатации / Н.В. Фатьянова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — Т. 56, № 1. — С. 133–143. — EDN SQZJFY.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE PROTECTIVE EFFECTIVENESS OF STANDARD AND NANOMODIFIED PF-115 COATINGS UNDER MARINE SERVICE CONDITIONS

N.V. Fatyanova, Senior Lecturer, Azerbaijan State Marine Academy, AZ1000, Baku, Z. Aliyev Street, 18, email: nice.natali92@mail.ru

The operation of metallic structures of ships and coastal facilities in marine atmospheric conditions is accompanied by intensive exposure to corrosion-active factors, including high humidity, salt-laden air, temperature fluctuations, and ultraviolet radiation. These effects lead to accelerated degradation of protective coatings and a reduction in the service life of metal structures. One of the most widely used paint and varnish materials for anticorrosion protection is PF-115 enamel; however, its operational stability in aggressive marine environments is limited, which necessitates improving its protective performance.

The aim of this study is a comparative assessment of the protective properties of standard and nanomodified PF-115 coatings under conditions simulating marine service. The research objectives included analysis of the coating formulations, accelerated corrosion testing in a salt spray chamber, cyclic climatic testing under variable humidity and temperature, adhesion evaluation, and microstructural analysis of the coatings. Zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles with particle sizes of 20–100 nm were used as nanomodifiers at a total content of up to 3 wt.% of the dry matter.

The results demonstrate that the incorporation of nanodispersed additives reduces the corrosion rate, increases the number of climatic cycles before the onset of coating degradation by 1.8–2 times, maintains adhesion at 4.0–4.8 points after 60 test cycles, and prevents the formation of localized underfilm corrosion.

The findings confirm the enhancement of barrier properties and operational reliability of the nanomodified PF-115 coating and indicate its suitability for protecting ship and coastal metal structures under marine environmental conditions.

Key words: PF-115, nanomodification, zinc oxide, titanium dioxide, anticorrosive coating, marine environment, barrier properties, adhesion.

For citation: Fatyanova N.V. Comparative assessment of the protective effectiveness of standard and nanomodified PF-115 coatings under marine service conditions. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 133–143. EDN SQZJFY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Лакокрасочные покрытия остаются одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных способов защиты металлических конструкций от коррозионного разрушения. Формирование долговечной защитной пленки определяется составом связующего, пигментно-наполнительной системой и технологией нанесения покрытия. Для судовых и прибрежных сооружений особое значение имеют антикоррозионные грунтовки и эмали, обеспечивающие барьерную защиту в условиях повышенной влажности и соледержания атмосферы.

Эмаль ПФ-115 относится к числу широко применяемых алкидных покрытий промышленного назначения и регламентируется нормативной документацией. Благодаря технологичности, доступности сырья и удовлетворительным эксплуатационным характеристикам данный материал активно используется для защиты металлических конструкций различного назначения. Однако в условиях морской атмосферы, характеризующейся воздействием хлоридсодержащего аэрозоля, ультрафиолетового излучения и циклических температурных колебаний, стандартные алкидные покрытия демонстрируют ограниченную долговечность. Повышенная проницаемость для влаги и ионов хлора способствует развитию подпленочной коррозии и снижению адгезионной прочности покрытия.

Анализ публикационной активности по тематике антикоррозионной защиты металлических конструкций в морской среде показал устойчивый рост интереса к проблеме повышения долговечности лакокрасочных покрытий. С использованием нейропоиска eLibrary.ru было выявлено более 400 научных публикаций, посвященных барьерным свойствам покрытий, механизмам деградации в соледержащей атмосфере и методам ускоренных испытаний.

В ряде работ отмечается, что традиционные алкидные системы характеризуются удовлетворительными технологическими свойствами, однако их долговечность в условиях морской эксплуатации ограничивается развитием микродефектов и подпленочной коррозии [1–3]. Исследования, опубликованные в Научно-техническом сборнике Российского морского регистра судоходства, подчеркивают необходимость адаптации лакокрасочных систем к реальным условиям эксплуатации судов и портовой инфраструктуры [4–6].

Значительное количество современных публикаций посвящено модификации органических покрытий нанодисперсными наполнителями. Показано, что введение оксидов металлов, углеродных наноструктур

и гибридных частиц способствует уплотнению полимерной матрицы и снижению проницаемости для агрессивных ионов [7–9]. При этом эффективность наномодификации определяется не только типом наполнителя, но и его дисперсностью, распределением в матрице и концентрацией [10, 11].

Отдельное направление исследований связано с разработкой методик ускоренных коррозионных и климатических испытаний, позволяющих прогнозировать долговечность покрытий в морской атмосфере [13–15]. Отмечается, что сочетание испытаний в камере соляного тумана с циклическими температурно-влажностными режимами обеспечивает более адекватное моделирование эксплуатационных условий [16–18].

Несмотря на значительный объем публикаций, анализ литературы показывает недостаточную изученность вопросов повышения эксплуатационной устойчивости традиционной эмали ПФ-115 при сохранении ее базовой рецептуры и технологической доступности. В большинстве работ рассматриваются либо полностью новые композиционные системы, либо высоконаполненные промышленные покрытия, что ограничивает возможность прямого внедрения результатов в существующую практику судостроения и судоремонта.

Таким образом, проведенный обзор научных источников подтверждает актуальность исследования, направленного на повышение защитной эффективности широко применяемого покрытия ПФ-115 путем введения ограниченного количества нанодисперсных модификаторов при сохранении технологической совместимости и нормативных требований.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка антикоррозионных и эксплуатационных характеристик стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 при воздействии факторов, моделирующих морскую эксплуатацию металлических конструкций.

В задачи исследования входил анализ рецептурного состава покрытий, проведение ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана, климатических циклических испытаний с переменной влажностью и температурой, оценка адгезии и исследование микроструктуры покрытий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения сравнительного анализа антикоррозионных и эксплуатационных свойств металлических конструкций в морской среде использовались два типа лакокрасочных покрытий ПФ-115: стандартное и наномодифицированное.

1. Стандартное покрытие ПФ-115

Стандартная эмаль ПФ-115 представляет собой промышленный лакокрасочный материал, широко применяемый для защиты металлических конструкций. Основными компонентами покрытия являются пентафталевая смола, растворители, пигменты и наполнители, обеспечивающие необходимые механические и защитные свойства покрытия [12]. Точный состав стандартного покрытия ПФ-115 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав стандартного покрытия ПФ-115

Компонент	Содержание, % мас.	Назначение
Пентафталевая смола (ПФ-115)	52	Основной связующий компонент, формирует пленку
Растворитель (ксилол + сольвент)	32	Обеспечивает рабочую вязкость и удобство нанесения
Тальк (наполнитель)	8	Уплотнение структуры пленки, повышение износостойкости
Мел (наполнитель)	2	Стабилизация структуры, уменьшение усадки
Пигменты (оксид железа, белила)	4	Цвет и защита от ультрафиолета
Отвердитель / пластификатор	2	Регулирует эластичность и прочность пленки

2. Наномодифицированное покрытие ПФ-115

Наномодифицированное покрытие ПФ-115 отличается от стандартного введения нанодисперсных минеральных добавок, что позволяет улучшить барьерные свойства пленки, повысить адгезию к металлической подложке и замедлить процессы коррозии. В качестве нанодобавок использовались:

- **оксид цинка (ZnO, наночастицы, размер 50–100 нм)** — повышает защиту от коррозии, улучшает адгезию и устойчивость к УФ-излучению;
- **диоксид титана (TiO₂, наночастицы, размер 20–50 нм)** — улучшает структурную плотность покрытия и увеличивает его стойкость к агрессивным средам.

Общее содержание нанодисперсных добавок не превышает 3 % от массы сухого вещества, что сохраняет технологичность нанесения и работоспособность покрытия. Точный состав наномодифицированного покрытия ПФ-115 приведен в табл. 2.

Таблица 2

Состав наномодифицированного покрытия ПФ-115

Компонент	Содержание, % мас.	Назначение
Пентафталевая смола (ПФ-115)	50	Основной связующий компонент
Растворитель (ксилол + сольвент)	30	Обеспечивает рабочую вязкость
Тальк (наполнитель)	7	Уплотнение структуры пленки
Мел (наполнитель)	2	Стабилизация структуры
Пигменты (оксид железа, белила)	3	Цвет и защита от УФ
Нанодисперсные добавки:		Повышение барьерных свойств и адгезии
– оксид цинка (ZnO)	2	Антикоррозионная и УФ-защита
– диоксид титана (TiO ₂)	1	Уплотнение структуры и химическая стойкость
Отвердитель / пластификатор	3	Регулирует прочность и эластичность

Металлические образцы из углеродистой стали, типичной для судовых конструкций, подготавливались в соответствии с требованиями стандартов: обезжиривание, механическая очистка и нанесение покрытия в два слоя.

Оценка защитных свойств покрытий проводилась с использованием следующих методов:

- **коррозионные испытания** в условиях соляного тумана, моделирующих морскую атмосферу;
- **климатические испытания**, включающие циклическое воздействие влажности и температуры;
- **адгезия покрытия** оценивалась методом решетчатых надрезов по ГОСТ 15140–78 (ISO 2409).

Испытания проводились в 2025 г. на базе Азербайджанской государственной морской академии (г. Баку), Сумгаитского института полимерных материалов (г. Сумгаит) и Института геологии и геофизики (г. Баку) с использованием лабораторного оборудования, предназначенного для проведения коррозионных и климатических испытаний лакокрасочных покрытий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Металлические образцы из углеродистой конструкционной стали (марка Ст3), применяемой при изготовлении судовых металлических конструкций, изготавливались размером 150 × 100 × 3 мм. Подготовка поверхности осуществлялась в соответствии с требованиями ГОСТ 9.402–2004 и включала механическую очистку до степени Sa 2½, обезжиривание органическим растворителем и сушку при температуре (20 ± 2) °С.

Покрытие наносилось в два слоя с межслойной сушкой в течение 24 часов при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности (65 ± 5) %. Толщина сухой пленки составляла 70 ± 5 мкм, контроль осуществлялся магнитным толщиномером.

Для оценки антикоррозионной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытий ПФ-115 были проведены коррозионные испытания в условиях соляного тумана, имитирующего морскую атмосферу. Коррозионные испытания в камере соляного тумана выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 9.308–85 (ISO 9227). Использовался 3,5%-ный водный раствор NaCl при температуре (35 ± 2) °С и pH 6,5–7,2. Продолжительность экспозиции составляла 60 суток. Контроль состояния образцов проводился каждые 5–10 суток. Испытания выполнялись в трех повторностях с последующей статистической обработкой результатов.

Таблица 3 содержит значения скорости коррозии металла под стандартным и модифицированным покрытием, что позволяет наглядно сравнить эффективность защиты судостроительной стали марки Ст3 и количественно определить преимущества наномодификации покрытия.

Таблица 3

Скорость коррозии судостроительной стали под покрытием ПФ-115

Время экспозиции, сут	ПФ-115 стандартная, мм/год	ПФ-115 модифицированная, мм/год
0	0,0	0,0
5	0,8	0,3
10	1,6	0,6
20	3,1	1,2
30	4,9	1,9
45	7,2	2,8
60	9,5	3,6

Данные табл. 3 подтверждают, что модифицированное покрытие ПФ-115 обеспечивает снижение скорости коррозии металла в 2,5–3 раза по сравнению со стандартным составом при длительном воздействии морской среды. Рисунок 1 иллюстрирует данное сравнение визуально.

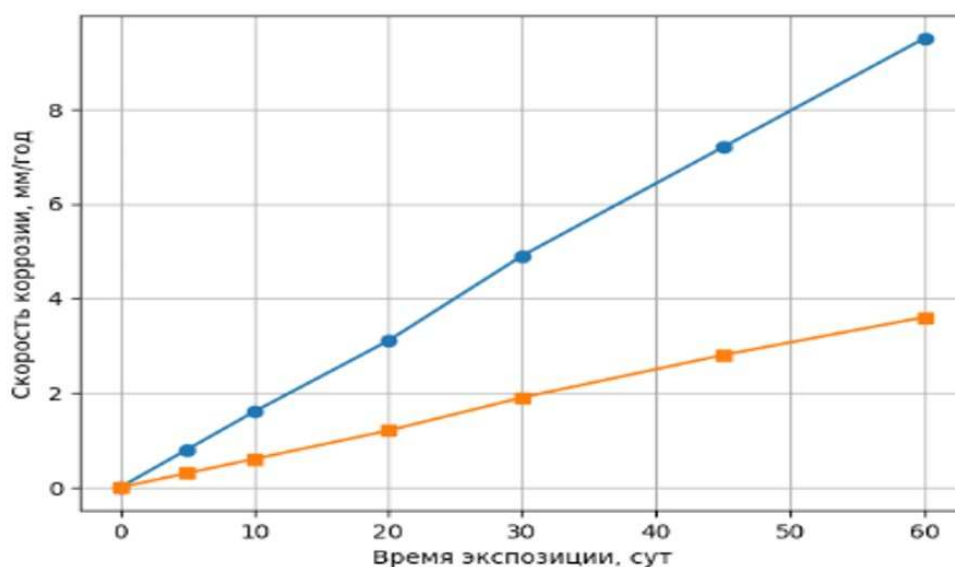


Рис. 1. Сравнение скорости коррозии стальных конструкций под покрытием ПФ-115 в условиях соляного тумана

На рис. 1 представлена зависимость скорости коррозии металлических образцов от времени экспозиции в условиях соляного тумана. Стандартное покрытие ПФ-115 характеризуется резким ростом скорости коррозии уже после 20–30 суток испытаний. В то же время модифицированное покрытие демонстрирует существенно более низкие значения скорости коррозии на всем протяжении эксперимента, что свидетельствует о повышенных барьерных свойствах и снижении проницаемости покрытия для агрессивных ионов морской среды.

Для оценки антикоррозионной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытий ПФ-115 были проведены коррозионные испытания в условиях соляного тумана, имитирующего морскую атмосферу. Измерения скорости коррозии металлических образцов проводились периодически в течение 60 суток [19–21].

Для количественной оценки влияния циклических климатических факторов на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий ПФ-115 были проведены испытания, моделирующие чередование влажности и температуры, характерное для прибрежной морской среды. Испытания включали последовательное воздействие повышенной влажности, сухих и теплых периодов, что позволило оценить стабильность покрытия в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Климатические испытания проводились по методике ускоренных циклических воздействий в соответствии с ГОСТ 9.401–91 и включали чередование фаз повышенной влажности (95 ± 3 %) при температуре (40 ± 2) °С и сухого нагрева при (20 ± 2) °С. Продолжительность одного цикла составляла 24 часа. Общее число циклов — 60.

Фиксировались следующие показатели: число циклов до появления видимых разрушений, сохранение адгезии к металлической подложке, образование трещин и развитие коррозии под пленкой [22].

1. Испытания на долговечность покрытия при циклических изменениях влажности и температуры

Методика.

Покрытия (стандартное и модифицированное) наносились на металлические образцы и подвергались циклическим климатическим испытаниям. Один цикл включал:

- выдержку при высокой влажности (95–100 % RH) и температуре 50 °С в течение 2 часов;
- последующее охлаждение до 5–10 °С при низкой влажности в течение 2 часов;
- переход к комнатной температуре для стабилизации.

Количество циклов фиксировалось до момента появления первых видимых признаков разрушения покрытия, таких как шелушение, отслаивание или образование трещин.

Результаты.

- Стандартное покрытие сохраняло целостность до 25–30 циклов.
- Модифицированное покрытие с наномелом и добавками Cu₂O/ZnO выдерживало 50–60 циклов.

Вывод.

Модифицированное покрытие демонстрирует двукратное увеличение долговечности, что указывает на улучшенную структурную стойкость и повышенную устойчивость к термомеханическим нагрузкам.

2. Испытания адгезии после климатических циклов

Методика.

Адгезия оценивалась с помощью метода сетчатого надреза и пятибалльной шкалы (по ISO 2409):

- 5 баллов — идеальная адгезия (нет отслаивания);
- 1 балл — значительное отслоение;
- 0 баллов — полное разрушение сцепления.

После прохождения полного цикла климатических испытаний проводился визуальный осмотр и измерение степени отслаивания.

Результаты.

- Стандартное покрытие снизило адгезию до 3 баллов, что указывает на частичное разрушение сцепления с металлической подложкой.
- Модифицированное покрытие сохраняло значения 4–5 баллов (отклонение 1–2 балла от идеальной адгезии).

Вывод.

Нанокomпоненты и оксидные добавки улучшают взаимодействие покрытия с подложкой, повышая устойчивость к отслаиванию и механическим воздействиям при циклических климатических нагрузках.

3. Анализ трещинообразования под действием климатических циклов

Методика.

Далее проводился анализ трещинообразования под действием климатических циклов (см. рис. 2). После испытаний поверхности покрытий исследовались с помощью оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии (SEM, JEOL JSM-6610LV). Оценивались:

- наличие микро- и макротрещин;
- плотность и длина трещин;
- распределение дефектов по поверхности.

Результаты.

- Стандартное покрытие демонстрировало формирование как микротрещин (до 20 мкм), так и макротрещин (свыше 100 мкм).
- Модифицированное покрытие не показывало видимых трещин, поверхность оставалась однородной и плотной.

Вывод.

Наномодификация улучшает микроструктурную однородность покрытия, предотвращает локальное напряжение и образование трещин, что повышает долговечность и барьерные свойства пленки.



Рис. 2. Сравнение микроструктуры стандартного и модифицированного покрытий после климатических циклов

4. Испытания коррозии под пленкой

Методика.

После климатических циклов образцы подвергались солевому распылению (по ASTM B117) в течение 500 ч для оценки коррозионной стойкости. Контролировались:

- появление коррозионных пятен под покрытием;
- скорость распространения коррозии в местах дефектов;
- целостность покрытия на металлической подложке.

Результаты.

- Стандартное покрытие демонстрировало локальную коррозию в местах трещин и дефектов.
- Модифицированное покрытие сохраняло металлическую поверхность целостной, препятствуя развитию коррозии даже при наличии мелких дефектов.

Вывод.

Добавление нанокomпонентов и оксидов металлов повышает защитные барьерные свойства покрытия, предотвращая проникновение агрессивных сред и развитие коррозии.

Сводные результаты испытаний представлены в табл. 4. Сравнительный анализ стандартного и наномодифицированного покрытия позволяет выявить влияние нанодисперсных добавок на долговечность, структурную целостность и барьерные свойства пленки. Данные таблицы являются основой для последующего количественного и качественного обсуждения защитной эффективности покрытий ПФ-115 в условиях морской эксплуатации.

Таблица 4

Сравнительные результаты климатических испытаний стандартного и наномодифицированного покрытий ПФ-115

Показатель	ПФ-115 стандартная	ПФ-115 модифицированная
Число циклов без разрушения	25–30	50–60
Адгезия после испытаний, балл	3	4–5
Появление трещин	Наблюдается	Не выявлено
Коррозия под пленкой	Локальная	Отсутствует

Анализ данных табл. 4 демонстрирует существенное превосходство наномодифицированного покрытия ПФ-115 по сравнению со стандартным при циклическом воздействии климатических факторов.

Сравнительный анализ климатических испытаний демонстрирует, что наномодифицированное покрытие ПФ-115 значительно превосходит стандартное по всем оценочным показателям: увеличена долговечность, сохранена высокая адгезия, отсутствуют трещины и локальная коррозия. Данные результаты подтверждают целесообразность применения наномодифицированных покрытий для защиты металлических конструкций в условиях морской эксплуатации.

Для оценки изменения защитных свойств покрытий ПФ-115 в процессе циклического воздействия влажности и температуры были проведены испытания по числу климатических циклов до значительного снижения адгезии покрытия. Адгезия оценивалась по пятибалльной шкале, отражающей степень сцепления покрытия с металлической подложкой. Таблица 5 и рис. 3 наглядно демонстрируют динамику изменения адгезии для стандартного и модифицированного покрытий. Полученные данные позволяют количественно оценить влияние нанодисперсных добавок на сохранение защитных свойств покрытия и его устойчивость к климатическим нагрузкам.

Данные табл. 5 подтверждают, что модифицированное покрытие ПФ-115 сохраняет защитные свойства и высокую адгезию значительно дольше, чем стандартное покрытие, что повышает срок службы морских металлических конструкций.

Таблица 5

Адгезия покрытий ПФ-115 при климатических циклах

Кол-во климатических циклов	ПФ-115 стандартная	ПФ-115 модифицированная
0	5,0	5,0
10	4,5	4,8
20	4,0	4,6
30	3,5	4,5
40	3,0	4,4
50	3,0	4,2
60	3,0	4,0

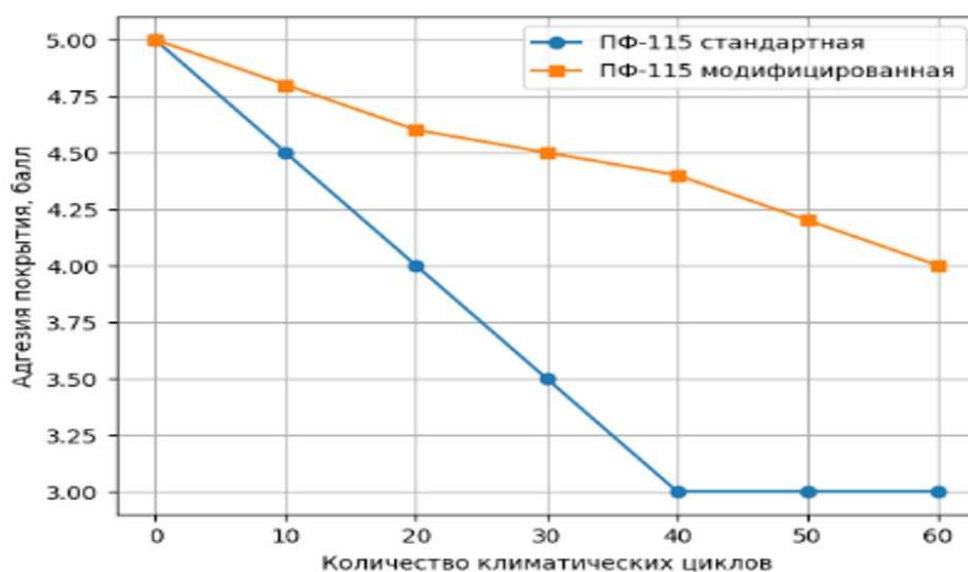


Рис. 3. Изменение защитных свойств покрытий ПФ-115 при климатических циклах

На рис. 3 показано изменение адгезионных и защитных свойств стандартного и модифицированного покрытий ПФ-115 при циклическом воздействии влажности и температуры. Для стандартного покрытия наблюдается снижение адгезии с 5 до 3 баллов после 40–50 циклов, тогда как модифицированное покрытие сохраняет высокую адгезию (4,0–4,8 балла) даже после 60 циклов. Это свидетельствует о повышенной устойчивости наномодифицированного покрытия к климатическим нагрузкам.

Данные таблицы и графика демонстрируют, что модифицированное покрытие сохраняет высокую адгезию (4,0–4,8 балла) даже после 60 циклов, в то время как стандартное покрытие снижается до 3 баллов после 40–50 циклов. Это свидетельствует о повышенной устойчивости наномодифицированного покрытия к климатическим нагрузкам и увеличении срока службы металлических конструкций.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают, что введение нанодисперсных оксидов цинка и титана оказывает комплексное влияние на структуру и защитные свойства покрытия ПФ-115. В отличие от стандартной эмали, наномодифицированная система демонстрирует более высокую устойчивость к воздействию соляного тумана, климатических циклов и механическим нагрузкам.

Снижение скорости коррозии и отсутствие выраженной подпленочной коррозии свидетельствуют о повышении барьерных свойств покрытия. Согласно современным представлениям о механизме антикоррозионной защиты, уплотнение полимерной матрицы и снижение ее проницаемости для воды и ионов хлора являются ключевыми факторами долговечности покрытия. Полученные данные согласуются с результатами исследований, в которых показано, что наночастицы оксидов металлов формируют более плотную структуру пленки и увеличивают диффузионное сопротивление системы.

Особое значение имеет динамика изменения адгезии в процессе климатических испытаний. Сохранение адгезионной прочности на уровне 4,0–4,8 балла после 60 циклов свидетельствует о стабильности межфазного взаимодействия «металл — покрытие». В стандартном варианте снижение адгезии сопровождается образованием микротрещин, что облегчает проникновение агрессивных компонентов среды и ускоряет развитие коррозии. Таким образом, наномодификация способствует не только улучшению барьерных характеристик, но и повышению структурной целостности покрытия.

Следует отметить, что большинство опубликованных работ посвящено эпоксидным и полиуретановым системам, тогда как алкидные эмали исследованы значительно меньше. В этом контексте полученные результаты представляют практический интерес, поскольку демонстрируют возможность повышения эксплуатационной надежности широко применяемого и экономически доступного покрытия без радикального изменения его базовой рецептуры.

Комплексный анализ коррозионных и климатических испытаний позволяет предположить, что механизм повышения защитной эффективности связан с равномерным распределением наночастиц в объеме полимерной матрицы, снижением количества микродефектов и формированием более стабильной структуры пленки. Это приводит к замедлению процессов диффузии влаги и солей, а также к уменьшению вероятности локального разрушения покрытия.

Таким образом, полученные результаты не только подтверждают эффективность выбранного направления модификации, но и расширяют представления о возможностях адаптации традиционных алкидных систем к условиям морской эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что стандартное покрытие ПФ-115 при воздействии факторов, моделирующих морскую среду, демонстрирует постепенное снижение адгезии, образование микродефектов и развитие локальной подпленочной коррозии, что ограничивает его долговечность в условиях повышенной влажности, соледержания и циклических температурных нагрузок.

Введение нанодисперсных оксидов цинка и титана в количестве до 3 % от массы сухого вещества способствует формированию более плотной и структурно стабильной полимерной матрицы. Это приводит к снижению скорости коррозии, увеличению числа климатических циклов до появления признаков разрушения покрытия в 1,8–2 раза и сохранению адгезии на уровне 4,0–4,8 балла после 60 циклов испытаний.

Комплексная оценка результатов коррозионных, климатических и адгезионных испытаний подтверждает повышение барьерных свойств и эксплуатационной надежности наномодифицированного покрытия по сравнению со стандартной эмалью. Полученные данные свидетельствуют о возможности повышения защитной эффективности традиционной алкидной системы без существенного изменения ее базовой рецептуры.

Таким образом, наномодификация ПФ-115 является перспективным направлением адаптации широко применяемых лакокрасочных материалов к условиям морской эксплуатации и может быть рекомендована для защиты судовых и прибрежных металлических конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырков А.Г. Методы и эффекты регулирования защитных свойств покрытий на поверхности стали с использованием наноматериалов / А.Г. Сырков, И.В. Плескунов, Е.Н. Кулешов, В.Н. Плескунов, А.А. Кибалко // Записки Горного института. — 2005. — Т. 165. — С. 184–187.
2. Погребняк А.Д. Структура и физико-химические свойства комбинированных нанокompозитных защитных покрытий / А.Д. Погребняк, М.М. Даниленок, Ф.Ф. Комаров, Н.К. Ердубаева и др. // Физическая инженерия поверхности. — 2007. — Т. 5. — № 3–4. — С.186–196.
3. Малинин А.В. Повышение защитной способности эпоксидного покрытия в водных средах при наполнении высокодисперсным модифицированным рутилом / А.В. Малинин, В.В. Кравцов // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2007. — № 9. — С.46–49.
4. Shi X. Effect of nanoparticles on corrosion resistance of coatings / X. Shi, T.A. Nguyen, Z. Suo, Y. Liu, R. Avci // Surface and Coatings Technology. — 2009. — Vol. 204. — P. 237–245.
5. Трухина М.В. Упрочняющее наномодифицирование лаковых покрытий / М.В. Трухина, М.В. Провоторов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2012. — № 2–6(292). — С.73–78.
6. Zheludkevich M.L. Smart coatings for active corrosion protection / M.L. Zheludkevich, J. Tedim, M.G.S. Ferreira // Electrochimica Acta. — 2012. — Vol. 82. — P. 314–323.
7. Евстифеев Е.Н. Сравнительные исследования антикоррозионных свойств защитных покрытий на основе высоконаполненных красок, содержащих микро- и наночастицы цинка / Е.Н. Евстифеев, А.С. Кужаров, Д.В. Полинец, В.А. Полинец, К.В. Собко // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии. — Ростов н/Д: ДГТУ, 2014. — С. 664–673.
8. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review / M.F. Montemor // Surface and Coatings Technology. — 2014. — Vol. 258. — P. 17–37.
9. Елагина О.Ю. Особенности применения протекторных металлизационных покрытий для коррозионной защиты металлоконструкций, работающих в морской среде / О.Ю. Елагина, А.В. Бурякин, В.В. Жук // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 11. — С. 70–75.
10. Цветников А.К. Нанодисперсный политетрафторэтилен FORUM™ и его влияние на физические свойства лакокрасочных покрытий / А.К. Цветников, Л.А. Матвеевко, А.В. Пузь, В.С. Егоркин и др. // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2016. — № 12. — С. 63–67.
11. Фатьянова Н.В. Анализ состава и свойств лакокрасочных материалов, изготавливаемых на заводе «Биби-Эйбат» ЗАО КМП / Н.В. Фатьянова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 94–100.
12. Shilova O.A. Environmentally friendly antifouling transparent coatings based on sol gel “epoxy/titanium tetrabutoxide” composition modified with detonation nanodiamond / O.A. Shilova, I.B. Glebova, V.I. Voshchikov, V.L. Ugolkov et al. // Journal of Advanced Materials and Technologies. — 2022. — Т. 7, № 3. — P. 201–218.
13. Ревин П.О. Исследование свойств антикоррозионных покрытий подводного нанесения для защиты портовых сооружений / П.О. Ревин, А.В. Макаренко, Р.А. Харисов, И.Р. Фархетдинов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 385–393.
14. Прокопчук Н.Р. Улучшение свойств покрытий по металлу наноналмазными частицами / Н.Р. Прокопчук, А.И. Глоба, И.О. Лаптик, А.Г. Сырков // Цветные металлы. — 2021. — № 6. — С. 50–54.
15. Пичельников А.В. Повышение долговечности защитных покрытий машин и оборудования АПК наномодифицированными лакокрасочными материалами / А.В. Пичельников, В.В. Коротких, А.П. Илясов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2021. — № 10(204). — С. 106–111.
16. Пласкеева Е.И. Атмосферостойкие системы покрытия для судостроительной верфи / Е.И. Пласкеева, Д.А. Полянская, В.И. Трусов, Р.С. Ходжаев, Г.В. Черкаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 1, ч. 2(51). — С. 75–78.
17. Пичугин А.П. Оценка эффективности использования нанодобавок в защитных покрытиях / А.П. Пичугин, А.В. Пчельников, В.Ф. Хританков, А.К. Туляганов // Строительные материалы. — 2023. — № 3. — С. 20–26.
18. Pchel'nikov A.V. Chemically resistant nanostructured protective coatings for metal surfaces / A.V. Pchel'nikov, A.P. Pichugin // Journal of Advanced Materials and Technologies. — 2025. — Т. 10, № 2. — С. 117–128.
19. Борчаковская И.Н. Натурные испытания перспективных противообрастающих покрытий контактного типа с антикоррозионными свойствами в Черном море / И.Н. Борчаковская, Н.А. Шкабара, А.Б. Фурсина, Н.Н. Петров, З.А. Темердашев // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29, № 10. — С. 23–29.
20. Габышева В.А. Оценка технологичности использования антикоррозионных покрытий для защиты деталей НТТС / В.А. Габышева // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. — 2019. — № 1(19). — С. 2.
21. Chukhlanov V.Y. Protective coating based on siloxane polymer nanopatterned by alkoxytitanate / V.Y. Chukhlanov, O.G. Selivanov, N.V. Chukhlanova // Materials Science Forum. — 2019. — Т. 945. — С. 718–723.
22. Пичугин А.П. Влияние нанорастворных добавок на адгезионную способность защитных полимерных покрытий / А.П. Пичугин, А.В. Пчельников, В.Ф. Хританков, В.В. Банул // Строительные материалы. — 2018. — № 12. — С. 39–44.

REFERENCES

1. Syrkov A.G., Pleskunov I.V., Kuleshov E.N., Pleskunov V.N., Kibalko A.A. Methods and effects of regulation of protective properties of coatings on steel surface using nanomaterials. *Journal of Mining Institute*. 2005. Vol. 165. P. 184–187. (In Russ.)
2. Pogrebnyak A.D., Danilenko M.M., Komarov F.F., Erdybaeva N.K. et al. Struktura i fiziko-khimicheskie svoystva kombinirovannykh nanokompozitnykh zashchitnykh pokrytiy [Structure and physico-chemical properties of combined nanocomposite protective coatings]. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti [Physical surface engineering]*. 2007. Vol. 5, No. 3–4. P. 186–196.
3. Malinin A.V., Kravtsov V.V. Povishenie zashchitnoi sposobnosti epoksidnogo pokrytiya v vodnykh sredakh pri napolnenii vysokodispersnym modifitsirovannym rutilem [Enhancement of protective ability of epoxy coating in aqueous media using high-dispersed modified rutile]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye [Paints and varnishes and their application]*. 2007. No. 9. P. 46–49.
4. Shi X., Nguyen T.A., Suo Z., Liu Y., Avci R. Effect of nanoparticles on corrosion resistance of coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204. P. 237–245.
5. Trukhina M.V., Provotorov M.V. Uprochnyayushchee nanomodifitsirovanie lakovykh pokrytiy [Strengthening nanomodification of varnish coatings]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]*. 2012. No. 2–6(292). P. 73–78.
6. Zheludkevich M.L., Tedim J., Ferreira M.G.S. Smart coatings for active corrosion protection. *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 82. P. 314–323.
7. Evstifeev E.N., Kuzharov A.S., Polinets D.V., Polinets V.A., Sobko K.V. Sravnitel'nye issledovaniya antikorroziionnykh svoystv zashchitnykh pokrytiy na osnove vysokonapolnennykh krasok, soderzhashchikh mikro- i nanogchastitsy tsinka [Comparative studies of anticorrosive properties of coatings based on highly filled paints containing micro- and nanoparticles of zinc]. *Innovatsii, ekologiya i resursoberegayushchie tekhnologii [Innovation, ecology and resource-saving technologies]*. Rostov-on-Don: DGTU, 2014. P. 664–673.
8. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review. *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 258. P. 17–37.
9. Elagina O.Yu., Buryakin A.V., Zhuk V.V. Osobennosti primeneniya protektornykh metallizatsionnykh pokrytiy dlya korrozionnoi zashchity metallokonstruktsiy, rabotayushchikh v morskoi srede [Features of protective metallization coatings for corrosion protection of marine structures]. *Territoriya Neftegaz*. 2016. No. 11. P. 70–75.
10. Tsvetnikov A.K., Matveenko L.A., Puz' A.V., Egorkin V.S., Golub A.V. et al. Nanodispersny politetrafluoroethilen FORUM™ i ego vliyanie na fizicheskie svoystva lakokrasochnykh pokrytiy [Nanodispersed polytetrafluoroethylene FORUM™ and its influence on physical properties of coatings]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye [Paints and varnishes and their application]*. 2016. No. 1–2. P. 63–67.
11. Fatyanova N.V. Analysis of composition and properties of varnish and paints produced at the Bibi-Eybat factory of CJSC "ASCO". *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56/57. P. 94–100. (In Russ.)
12. Shilova O.A., Glebova I.B., Voshchikov V.I., Ugolkov V.L., Dolmatov V.Yu. Environmentally friendly antifouling transparent coatings based on sol-gel "epoxy/titanium tetrabutoxide" composition modified with detonation nanodiamond. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2022. Vol. 7, No. 3. P. 201–218.
13. Revin P.O., Makarenko A.V., Kharisov R.A., Farkhetdinov I.R. Issledovanie svoystv antikorroziionnykh pokrytiy podvodnogo naneseniya dlya zashchity portovykh sooruzhenii [Study of underwater anticorrosive coatings for port structures]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov [Science and technology of pipeline transportation of oil and petroleum products]*. 2022. Vol. 12, No. 4. P. 385–393.
14. Prokopchuk N.R., Globa A.I., Laptik I.O., Syrkov A.G. Uluchshenie svoystv pokrytiy po metallu nanoalmaznymi chastitsami [Improvement of metal coatings with nanodiamond particles]. *Tsvetnye metally [Non-ferrous metals]*. 2021. No. 6. P. 50–54.
15. Pchel'nikov A.V., Korotkikh V.V., Ilyasov A.P. Increasing durability of protective coatings of farm machinery and equipment with nano-modified paintwork materials. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021. No. 10(204). P. 106–111. (In Russ.)
16. Plaskeeva E.I., Polyanskaya D.A., Trusov V.I., Khodzhaev R.S., Cherkaev G.V. Atmospheric resistant coating systems for shipbuilding yard. *Marine Intellectual Technologies*. 2021. No. 1, part 2(51). P. 75–78. (In Russ.)
17. Pichugin A.P., Pchel'nikov A.V., Khristankov V.F., Tulyaganov A.K. Evaluation of the effectiveness of the use of nano-additives in protective coatings. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials Russia)*. 2023. No. 3. P. 20–26. (In Russ.)
18. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P. Chemically resistant nanostructured protective coatings for metal surfaces. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 117–128.
19. Borchakovskaya I.N., Shkabara N.A., Fursina A.B., Petrov N.N., Temerdashev Z.A. Field tests in the Black Sea of promising contact-type antifouling coatings with anticorrosion properties. *Ecology and Industry of Russia*. 2025. Vol. 29, No. 10. P. 23–29. (In Russ.)
20. Gabysheva V.A. Otsenka tekhnologichnosti ispol'zovaniya antikorroziionnykh pokrytiy dlya zashchity detaley NTTS [Assessment of manufacturability of anticorrosive coatings for NTTS parts]. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*. 2019. No. 1(19). P. 2.
21. Chukhlanov V.Y., Selivanov O.G., Chukhlanova N.V. Protective coating based on siloxane polymer nanopatterned by alkoxytitanate. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 718–723.
22. Pichugin A.P., Pchel'nikov A.V., Khristankov V.F., Banul V.V. Influence of nano-dimensional additives on adhesion ability of protective polymer coatings. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials Russia)*. 2018. No. 1–2. P. 39–44.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026.

Принята к публикации 10.03.2026.

УДК 629.12
EDN PCFBYU

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СУДОСТРОЕНИИ

Т.В. Косырева (Князюк), канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: mail@crism.ru

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

А.В. Ильин, д-р техн. наук, доцент, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: mail@crism.ru

С.М. Кордонец, главный специалист-эксперт, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: kordonets.sm@rs-class.org

В представленной обзорной статье выполнен комплексный анализ современного состояния, технологических возможностей и перспектив внедрения аддитивного производства (АП) в судостроительной отрасли. Обзор включает систематизацию и сравнительный анализ мирового и российского опыта применения аддитивных технологий с акцентом на идентификацию наиболее востребованных материалов и технологических решений для производства и ремонта судовых компонентов. Особое внимание уделено металлургическим аспектам АП: детально исследованы особенности формирования структуры и комплекса свойств металлических материалов, синтезированных аддитивными методами. Рассмотрены характерные типы дефектов, присущие аддитивному производству, и предложены научно обоснованные пути их минимизации и управления качеством. В работе систематизированы ключевые технологические ограничения, экономические и нормативные барьеры, сдерживающие внедрение АП в судостроении, а также разработаны стратегические инициативы и направления для их преодоления, базирующиеся на развитии нормативной базы, материаловедения и технологий постобработки. Показано, что дальнейшая эволюция аддитивных технологий и сопутствующей материаловедческой базы способна трансформировать традиционные подходы к проектированию и изготовлению изделий судового машиностроения. Это создает предпосылки для существенного повышения эксплуатационной эффективности судов, сокращения сроков и стоимости производства, а также оптимизации логистики запасных частей на всех этапах жизненного цикла судостроительной продукции.

Ключевые слова: аддитивное производство, 3D-печать, судостроение, стали и сплавы, стандартизация.

Для цитирования: Косырева (Князюк) Т.В., Перспективы развития аддитивного производства в судостроении / Т.В. Косырева (Князюк), О.В. Фомина, А.В. Ильин, С.М. Кордонец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — Т. 56, № 1. — С. 144–158. — EDN PCFBYU.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ADDITIVE MANUFACTURING IN SHIPBUILDING

T.V. Kosyreva (Knyazyuk), PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: mail@crism.ru

O.V. Fomina, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: mail@crism.ru

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

S.M. Kordonets, Chief Specialist-Expert, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kordonets.sm@rs-class.org

This review article provides a comprehensive analysis of the current status, technological capabilities, and prospects for the implementation of additive manufacturing (AM) in the shipbuilding industry. It systematizes and compares global and Russian experience with additive technologies, focusing on identifying the most in-demand materials and technological solutions for the production and repair of ship components. Particular attention is paid to the metallurgical aspects of AM: the structural formation and properties of metallic materials synthesized using additive methods are examined in detail. The paper examines the typical defect types inherent in additive manufacturing and proposes scientifically based approaches to minimizing them and managing quality. The paper systematizes the key technological limitations, economic, and regulatory barriers hindering the implementation of additive manufacturing in shipbuilding, and develops strategic initiatives and approaches for overcoming them, based on the development of the regulatory framework, materials science, and post-processing technologies. It has been demonstrated that the further evolution of additive technologies and the associated materials science framework has the potential to transform traditional approaches to the design and manufacture of marine engineering products. This paves the way for significantly improving the operational efficiency of ships, reducing production time and costs, and optimizing spare parts logistics throughout all stages of the shipbuilding product lifecycle.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, shipbuilding, steels and alloys, standardization.

For citation: Kosyreva (Knyazyuk) T.V., Fomina O.V., Il'in A.V., Kordonets S.M. Prospects for the development of additive manufacturing in shipbuilding. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 144–158. EDN PCFBUY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивным производством (АП), «additive manufacturing», называют процессы 3D-печати изделий или заготовок согласно разработанной компьютерной модели. На сегодняшний день существует более 10 видов технологий АП, и они не перестают развиваться. Наибольший интерес к АП проявили такие области промышленности, как автомобилестроение и авиастроение, для которых снижение веса деталей приводит к экономии топлива и, соответственно, снижению углеродного следа [1, 2]. Активно развивается АП в атомной энергетике. Повышенный интерес к технологиям АП проявляют ученые из медицинских организаций, поскольку технологии 3D-печати позволяют изготавливать уникальные природоподобные материалы, протезы и ткани [3]. Аналитические сервисы прогнозируют увеличение рынка АП до 41,6 млрд долл. в мире и до 13 млрд руб. в 2026 г. в РФ.^{1, 2}

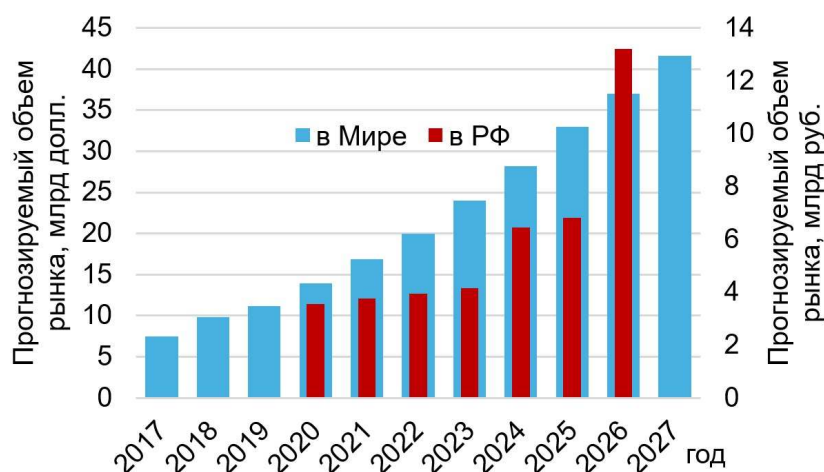


Рис. 1. Состояние и прогноз объема мирового и российского рынка АП

Как отмечают авторы [4], современное состояние российского судостроения характеризуется значительным отставанием от ведущих стран мира: удельная трудоемкость производства в отрасли в 3–5 раз выше, чем за рубежом, а продолжительность постройки судов в 2–3 раза дольше. Износ металлообрабатывающего оборудования достигает 70 %, а доля ручного труда остается высокой. В этих условиях особенно актуальным становится поиск путей технологической модернизации и повышения эффективности производства.

Однако преимущества АП, к которым главным образом относятся сокращение технологической цепочки изготовления деталей сложной формы (рис. 2) и увеличение коэффициента использования материала (КИМ), будут востребованы и в судостроении [4–8]. Технологии АП могут быть эффективны для изготовления и ремонта запасных частей деталей корабля (судна), в том числе топологически оптимизированных деталей, которые не могут быть изготовлены или изготавливаются с большим процентом брака традиционными методами литья или деформации; для создания прототипов и макетов кораблей или узлов; для оптимизации логистических цепочек материалов и полуфабрикатов. Следует отметить, что методы АП перспективны для производства изделий из биметаллов с градиентным переходом от одного материала к другому, что может повысить твердость и прочность отдельных фрагментов изделия [9, 10].

¹ Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство. — [Электронный ресурс] URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv> (дата обращения 25.02.2025).

² Ассоциация развития аддитивных технологий (АРАТ). — [Электронный ресурс] URL: <https://aatd.ru/> (дата обращения 25.02.2025).



Рис. 2. Сравнение технологических цепочек изготовления деталей традиционным и аддитивным методами

Внедрение АП в судостроение в перспективе позволит снизить затраты на производство некоторых деталей и сроки изготовления судов в целом, ускорить внедрение новых конструкторских решений. Конечно, следует отметить, что судостроение является металлоемкой отраслью, а условия эксплуатации требуют особых свойств материалов, поэтому должны быть разработаны соответствующие стандарты и правила для проведения испытаний новых материалов [4, 7]. АП в российском судостроении начало свой путь относительно недавно, реперной точкой в его истории можно назвать 2020 г., именно в это время была разработана первая редакция главы 11 «Продукты аддитивного производства» части XIII Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [11], устанавливающих требования к материалам и изделиям, изготовленным методами АП.

Цель данной статьи — выполнить обзор и анализ современного состояния, технологических возможностей, вызовов и перспектив внедрения аддитивного производства в отрасли судостроения. Для этого в работе рассмотрены основные технологии и материалы для 3D-печати с учетом их применимости в судостроении, затем рассмотрены особенности структуры и свойств металлических материалов, приведены примеры использования аддитивных технологий за рубежом и на территории Российской Федерации, в заключении предложены основные направления развития.

1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аддитивные технологии были опробованы в 1986 г. с созданием опытных образцов методом стереолитографии (SLA). Несмотря на относительную новизну, АП характеризуется интенсивным развитием и в настоящее время включает более 10 технологических модификаций (табл. 1). Современные методы АП стали неотъемлемым компонентом технологической платформы «Индустрия 4.0», находя практическое применение в различных отраслях промышленности [1, 2, 4, 12].

В судостроительной отрасли приоритет отдается аддитивным технологиям, ориентированным на работу с металлическими материалами, таким как селективное лазерное плавление (СЛС, SLM), прямое лазерное выращивание (ПЛВ, DMD) и проволоочно-дуговое аддитивное производство (WAAM) [7, 9, 10, 13]. Технологии на основе полимеров, в частности моделирование методом наплавления (FDM/FFF), представляют интерес в меньшей степени и применяются главным образом для изготовления вспомогательной оснастки, прототипирования и ненагруженных элементов [14, 15].

Основными формами исходного сырья для металлического АП являются металлопорошковые композиции (МПК) и в меньшей степени проволока и ленты. Производство МПК осуществляется преимущественно методами газового или плазменного распыления расплава [3, 8, 16]. Центробежное распыление и гидрораспыление применяются реже. Полученные порошки подвергаются фракционированию для обеспечения требуемой granulometрии.

Таблица 1

Основные технологии АП			
№	Название технологии	Краткое описание технологии	Материалы/вид сырья
Металлы			
1	PBF-LB (или SLM, Selective Laser Melting) — синтез на подложке лазерным лучом / селективное лазерное сплавление (СЛС)	Полное расплавление металлического порошка лазером	Металлические порошки (стали, титановые, алюминиевые сплавы)
2	PBF-EB — синтез на подложке электронным лучом / электронно-лучевая плавка	Полное расплавление металлического порошка электронным лучом в вакууме	Металлические порошки (стали, титановые, сплавы: алюминиевые, никелевые, кобальт-хромовые)
3	Directed Energy Deposition (DED) — прямая подвод энергии и материала. Имеет следующие разновидности:	Энергия (лазерный луч, электронный луч, плазменная или электрическая дуга) подается непосредственно в зону наплавки, куда одновременно подается материал в виде порошка или проволоки	Металлические порошки и проволока
3.1	DED-LB (или DMD, Direct Metal Deposition) — лазерная наплавка	Наплавление металлического порошка в пятне лазера	Металлические порошки и проволока
3.2	DED-EB (или EBM, Electron Beam Melting) — электронно-лучевая наплавка	Наплавка материала в вакууме электронным лучом	Металлические порошки
3.3	DED-PA — плазменная наплавка	Наплавка материала с использованием плазменной дуги высокой энергии	Проволока
3.4	DED-GTA — газовая вольфрамовая дуговая наплавка	Наплавка материала с использованием электрической дуги, возникающей между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием, в среде защитного газа (обычно аргона)	Проволока
3.5	DED-GMA (или WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing) — газовая металлическая дуговая наплавка	Наплавление металла сварочной дугой и проволочным электродом	Металлическая проволока (стали, алюминиевые сплавы)
Неметаллы			
1	FDM/FFF (Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication) — моделирование методом наплавления	Послойное наплавление термопластичной нити через экструдерную головку	Полимеры (ABS, PLA, нейлон, ПЭЭК)
2	SLS (Selective Laser Sintering) — селективное лазерное спекание	Послойное спекание порошка лазером без полного плавления ³	Полимерные порошки (нейлон, ПА)
3	SLA (Stereolithography) — стереолитография	Послойное отверждение жидкого фотополимера ультрафиолетовым лазером ⁴	Фотополимерные смолы
5	DLP (Digital Light Processing) — цифровая обработка светом	Отверждение фотополимера целого слоя проектором	Фотополимерные смолы
6	MJF (Multi Jet Fusion) — многоструйное спекание	Нанесение спекающего агента на порошок с последующим спеканием	Полимерные порошки (нейлон, ПА)
7	Binder Jetting — струйное нанесение связующего	Склеивание частиц порошка связующим с последующим спеканием	Порошки (гипс, песок, металлы, керамика)
8	Material Jetting — струйная печать материалом	Послойное нанесение капель фотополимера с УФ-отверждением ⁵	Фотополимерные смолы
9	LOM (Laminated Object Manufacturing) — производство ламинированных объектов	Послойное склеивание и вырезание контуров из листового материала	Листовые материалы (бумага, полимеры, фольга)
Металлы и неметаллы			
1	Binder Jetting — струйное нанесение связующего	Склеивание частиц порошка связующим с последующим спеканием	Порошки (гипс, песок, металлы, керамика)

³ Технология селективного лазерного спекания (SLS) в 3D-печати. — URL: <https://top3dshop.ru/blog/sls-3d-printing.html> (дата обращения 27.02.2025).

⁴ Стереолитография (SLA) в 3D-печати. — URL: <https://top3dshop.ru/blog/stereolitografiya-3d-pechati.html> (дата обращения 27.02.2025).

⁵ Технология струйного нанесения материала (Material Jetting). — URL: <https://industry3d.ru/handbook/tehnologii-3d-pechati/tehnologii-i-materialy-3d-pechati/struynoe-naneshenie-materiala-podacha-po-trebovaniyu-material-jetting-dod/tehnologiya-struynogonaneseniya-materiala> (дата обращения 27.02.2025).

К материалам, пригодным для АП, предъявляются специфические требования: высокая свариваемость, пониженная теплопроводность и ограниченная склонность к окислению. Этим критериям удовлетворяют нержавеющие и жаропрочные стали, а также титановые и алюминиевые сплавы [1, 16]. Использование бронзы и латуни в лазерной 3D-печати сопряжено с трудностями из-за их высокой отражательной способности и теплопроводности. Преодоление данного технологического барьера требует оптимизации химического состава сплавов и режимов энергетического воздействия. Наиболее перспективные для применения в судостроении материалы, их свойства и потенциальные области использования систематизированы в табл. 2.

Таблица 2

Наиболее перспективные материалы для АП лазерными и лучевыми методами

Материалы	Ключевые свойства и преимущества	Наиболее вероятные изделия в судостроении
Нержавеющие аустенитные стали (08X18H10T и аналоги)	Коррозионная стойкость, хорошая свариваемость	Сложные детали трубопроводов, штоки задвижек, корпуса насосов, фитинги
Азотсодержащие высокопрочные аустенитные стали (04X20H6Г11М2АФБ и аналоги)	Высокая прочность и вязкость, стойкость к кавитации	Гребные винты, элементы судовой арматуры, ответственные кронштейны
Нержавеющие мартенситные стали (08X14HДЛ, 06X15H4ДМЛ и аналоги)	Высокая твердость, прочность, износостойкость	Гребные винты, импеллеры насосов, валы, другие изнашиваемые детали
Титановые сплавы	Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость	Гребные винты, теплообменники, легкие корпусные конструкции, детали для агрессивных сред
Алюминиевые сплавы	Низкая плотность, хорошая обрабатываемость	Легкие конструкции, корпусные детали, элементы палубного оборудования, арматура
Бронзы	Антифрикционные свойства, коррозионная стойкость	Вкладыши подшипников, втулки, уплотнительные кольца, элементы гребных винтов
Высокопрочные полимеры (ПА, ПЭЭК, ППС и др.)	Низкая плотность, стойкость к химическому воздействию, диэлектрические свойства	Крыльчатки вентиляторов, корпуса приборов, воздуховоды, изоляторы, элементы интерьера, прототипирование оснастки

2. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

Стали и сплавы, синтезированные методами аддитивного производства, характеризуются формированием специфической структуры, существенно отличающейся от структуры материалов, полученных традиционными способами [1–3]. Указанные структурные отличия являются следствием термодинамических условий процессов АП, главным образом — экстремально высоких скоростей нагрева и охлаждения, действующих в зоне формирования расплава, а также определяются качественными характеристиками исходного сырья (МПК или проволоки) [16–18]. В табл. 3 систематизированы ключевые морфологические особенности структуры аддитивно произведенных сталей и сплавов, а также обусловленные ими характерные закономерности механического поведения [2, 3, 18]. На рис. 3 приведена структура нержавеющей стали марки 08X18H10T, полученной методом ПЛВ, при разных увеличениях [18].

Таблица 3

Особенности структуры и свойств металлических материалов, полученных методами АП

Особенности микроструктуры и состояния	Причины формирования	Влияние на свойства материала
Дендритно-ячеистая структура	Экстремально высокая скорость кристаллизации (10^3 – 10^6 К/с) и значительный тепловой градиент	Повышение предела прочности и предела текучести за счет дисперсной структуры
Междендритная сегрегация легирующих элементов	Неравновесность процессов кристаллизации, характерная для дендритно-ячеистого строения	Неоднородность свойств: возможное снижение ударной вязкости и коррозионной стойкости в обогащенных примесями зонах
Повышенная плотность дислокаций	Высокие скорости охлаждения «замораживают» неравновесные дефекты кристаллической решетки	Дисперсионное упрочнение; высокие остаточные термические напряжения, способствующие деформации и короблению, высокая прочность
Высокая плотность наноразмерных неметаллических включений (оксиды, нитриды)	Взаимодействие расплава с остаточными газами (O_2 , N_2) в камере построения или примесями в исходном сырье	Дисперсионное упрочнение, повышение прочности; возможное снижение пластичности и усталостной прочности
Мелкозернистая структура	Высокие скорости охлаждения расплава и закристаллизовавшегося металла, действующие как ограничитель роста зерна	Совместное повышение прочностных характеристик, пластичности и ударной вязкости (в соответствии с законом Холла — Петча)
Анизотропия структуры	Направленный характер теплоотвода (эпитаксиальный рост), слоистость построения, ориентация дендритов и дефектов вдоль направления сканирования	Анизотропия механических свойств
Наличие технологических дефектов (поры, непровары, горячие микротрещины)	Неоптимальные режимы энергетического воздействия (мощность, скорость), некачественное сырье, загрязнение порошка или среды камеры построения	Снижение статической и циклической прочности, вязкости, пластичности и коррозионной стойкости

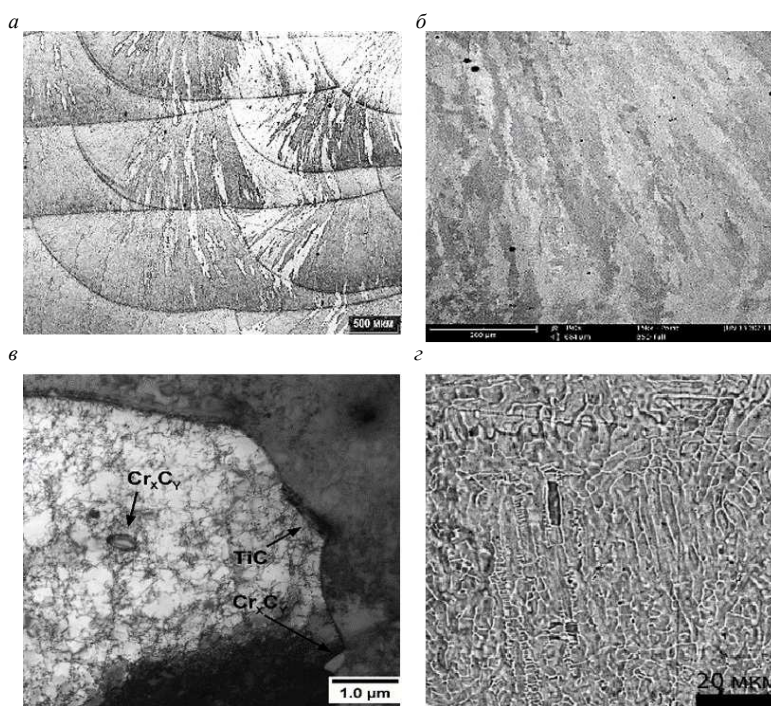


Рис. 3. Микроструктура нержавеющей стали марки 08X18H10T, изготовленной аддитивным методом ПЛВ:
 а — $\times 50$; б — $\times 200$; в — $\times 5000$; з — $\times 20\,000$

Стали и сплавы, синтезированные аддитивными методами, характеризуются комплексом структурных особенностей, определяющих их эксплуатационные характеристики. Для данных материалов характерно повышение статической прочности, в то время как уровень пластичности может варьироваться в широких пределах — как уступая показателям аналогов, полученных традиционными способами, так и превосходя их [17, 18]. Ключевой особенностью является анизотропия структуры, обусловленная слоистым характером построения и направленным тепловым воздействием. Основными механизмами упрочнения выступают формирование дисперсных дендритно-ячеистых структур и дисперсионное упрочнение наноразмерными неметаллическими включениями [1, 16, 18]. Наряду с этим, такие критически важные свойства, как ударная вязкость, пластичность, циклическая долговечность и коррозионная стойкость, в значительной степени лимитируются наличием макро- и микродефектов (поры, непровары, трещины) [2, 3, 17]. Минимизация дефектообразования представляет собой одну из приоритетных задач современных научных исследований в области аддитивных технологий. К основным стратегиям управления структурой и снижения дефектности относятся:

1) оптимизация параметров энергетического воздействия. Целенаправленный подбор режимов сканирования (мощность лазера/электронного луча, скорость, шаг, стратегия) и толщины слоя позволяет управлять термическими циклами и минимизировать термические напряжения, тем самым снижая вероятность возникновения дефектов;

2) повышение качества исходного сырья. Использование металлопорошковых композиций (МПК) и проволоки с высокой химической чистотой, однородной гранулометрией (для МПК) и стабильным геометрическим сечением (для проволоки) является необходимым условием для получения плотных и бездефектных материалов;

3) строгий контроль атмосферы процесса. Поддержание регламентированного состава защитной атмосферы (например, содержание кислорода < 100 ppm) и стабильных температурных условий в камере построения позволяет эффективно подавлять процессы окисления и минимизировать пористость.

Отдельной задачей является устранение анизотропии структуры и свойств, которая может оказывать негативное влияние на работоспособность изделий, испытывающих сложнапряженное состояние. Для ее снижения применяются методы последующей постобработки. Термическая обработка, включая отжиг для рекристаллизации и снятия остаточных напряжений, а также режимы закалки и отпуска для сталей мартенситного класса, является обязательным этапом для достижения требуемого комплекса свойств [17, 18]. Горячее изостатическое прессование (ГИП) эффективно устраняет внутреннюю микропористость, обеспечивая практически 100%-ную плотность материала за счет диффузионного «залечивания» пор под совместным воздействием высокого давления и температуры [2, 3, 16].

Следовательно, материалы, полученные методами АП, обладают уникальным сочетанием преимуществ и недостатков, обусловленных спецификой их синтеза. Анизотропия и наличие дефектов могут быть успешно нивелированы за счет комплексного подхода, включающего оптимизацию параметров построения и последующей обработки.

3. ТЕКУЩИЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИРОВОМ СУДОСТРОЕНИИ

Мировой опыт внедрения аддитивных технологий (АТ) в судостроение демонстрирует их растущую значимость для оптимизации производственных процессов, создания инновационных конструкций и сокращения логистических издержек [4, 7, 9, 10]. К настоящему моменту сформировались несколько направлений применения АТ, подтвержденных успешными примерами ведущих отраслевых компаний и поддержанных развитием нормативной базы со стороны классификационных обществ.

3.1. Производство функциональных компонентов

Наиболее распространенным применением АТ является изготовление сложнофункциональных и уникальных деталей, производство которых традиционными методами нерентабельно или технологически затруднено [4, 5, 7, 9, 10].

Элементы движителей. Одним из наиболее распространенных применений 3D-печати в мировом судостроении является производство сложных и уникальных компонентов. Например, компания Damen Shipyards Group использует 3D-печать для создания металлических винтов, что позволяет значительно

сократить время и затраты на производство⁶. Технология проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM) успешно применяется для производства гребных винтов. Компания Naval Group (Франция) изготовила и сертифицировала у Bureau Veritas крупнейший в мире 5-лопастной гребной винт диаметром 2,5 м, установленный на тральщике типа «Tripartite» (рис. 4а⁷). Аналогичный проект по созданию 2-метрового винта по технологии WAAM был реализован южнокорейской SY Metal при сертификации DNV⁸. Ключевыми преимуществами WAAM в данном случае являются двукратное увеличение скорости производства по сравнению с литьем и формирование более однородной микроструктуры, что потенциально повышает прочностные характеристики и ремонтопригодность.

Биметаллические изделия для агрессивных сред. Совместный проект корейских компаний во главе с InssTek позволил создать первый в отрасли биметаллический криогенный клапан (рис. 4б). Метод прямого подвода энергии с 5-осевой синхронизацией позволил нанести 3-миллиметровый слой коррозионностойкого сплава Inconel 625 на внутреннюю поверхность корпуса из нержавеющей стали SUS316L, что обеспечило значительную экономию дорогостоящего материала⁹.

Компоненты двигателей и систем. Ряд компаний, включая Siemens, MAN Diesel & Turbo и Rolls-Royce, используют технологии селективного лазерного плавления (SLM/PBF) для производства сегментов направляющих лопаток турбин, деталей двигателей и литейной оснастки. Компания Huntington Ingalls Industries изготовила аддитивный трубопровод для авианосца «Гарри С. Трумэн». В 2018 г. командованием военно-морских систем США (NAVSEA) была одобрена первая металлическая деталь — прототип сливного сетчатого отверстия (DSO), — установленная на авианосце «Гарри С. Трумэн» (CVN 75) для проведения годичных эксплуатационных испытаний¹⁰ (рис. 4в). Wärtsilä (Финляндия) наладила производство специализированного инструмента для сервисного обслуживания двигателей [7].



Рис. 4. Изделия судового машиностроения, полученные методами АП за рубежом:

а — гребной винт нового поколения (Naval Group, Франция); б — биметаллический криогенный клапан (InssTek, Южная Корея); в — прототип дренажного сетчатого фильтра паропровода (NAVSEA, США)

Классификационное общество DNV также выдало сертификат соответствия для панамского клюза неклассического типа, изготовленного по технологии WAAM, который показал способность выдерживать нагрузки на 20 % выше проектных при двукратном превышении предела текучести по сравнению с традиционным литьем¹¹.

⁶ Damen unveils world's 1st class approved 3D printed propeller // Offshore Energy. — 2017. — URL: <https://www.offshore-energy.biz/damen-unveils-worlds-1st-class-approved-3d-printed-propeller/> (дата обращения 20.02.2025).

⁷ Largest metal 3D printed propeller certified by Bureau Veritas // The Maritime Executive. — URL: <https://www.maritime-executive.com/article/largest-metal-3d-printed-propeller-certified-by-bureau-veritas> (дата обращения 20.02.2025).

⁸ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

⁹ Ibid.

¹⁰ NAVSEA approves first metal part for shipboard use via additive manufacturing // VoxelMatters. — URL: <https://www.voxelmatters.com/navsea-first-metal-part-shipboard/> (дата обращения 15.07.2024).

¹¹ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

3.2. Крупногабаритное строительство и изготовление оснастки

АТ активно используются для создания крупногабаритных объектов и технологической оснастки, где ключевыми факторами являются скорость изготовления и снижение материалоемкости.

Производство судовых корпусов и конструкций. Компания Al Seer Marine с использованием роботизированной системы Flexbot (зона построения 4 × 36 м) осуществила 3D-печать надводного судна, установив мировой рекорд по величине напечатанной лодки (рис. 5¹²). Данный проект демонстрирует потенциал модульных роботизированных комплексов для крупноформатного аддитивного строительства. Предприятия типа OCore (Италия) используют полимерные аддитивные технологии для изготовления гоночных яхт класса Proto, применяя методы топологической оптимизации для снижения массы без потери прочности [7].



Рис. 5. Hydra — беспилотное надводное судно (БНС), напечатанное на 3D-принтере (Al Seer Marine, ОАЭ)

Изготовление прототипов и мастер-моделей. Такие компании, как Thyssenkrupp Marine Systems и Portsmouth/Puget Sound, применяют АТ для быстрого прототипирования узлов подводных лодок и макетирования при модернизации кораблей ВМС, что значительно ускоряет цикл проектирования и внедрения новых решений¹³.

3.3. Ремонт и восстановление деталей

Одним из наиболее экономически эффективных применений АТ является оперативный ремонт и восстановление геометрии изношенных или поврежденных компонентов, что особенно критично в условиях ограниченного доступа к запасным частям. Современное судно представляет собой сложный механизм, месяцами находящийся в открытом море без доступа к ремонтным докам и складам запасных частей. Традиционная организация ремонта требует сложной логистики: при поломке детали экипаж сообщает на берег, служба снабжения ищет деталь на складе или заказывает ее изготовление, после чего деталь отправляют в ближайший порт следования. Этот процесс занимает много времени и требует значительных затрат [19].

Использование 3D-принтера на борту позволяет принципиально изменить эту ситуацию. При поломке детали достаточно найти ее 3D-модель в базе данных или создать ее методом 3D-сканирования, после чего STL файл отправляется на 3D-принтер, и изготовление детали занимает считанные часы. Авторы подчеркивают, что такой подход позволяет сократить сроки судоремонта до 70 % по сравнению с традиционными методами, исключает необходимость складирования большого количества запасных частей и повышает точность изготовления благодаря высокому разрешению печати [19].

¹² Al Seer Marine and Abu Dhabi Maritime unveil the world's first 3D printed water taxi // Al Seer Marine. — 2024. — URL: <https://alseermarine.com/2024/04/22/eget-magna-dignissim-viverra-henderit-viverra-tristique-fermentum-mauris/> (дата обращения 21.02.2025).

¹³ Thyssenkrupp Marine Systems uses 3D printing to create prototypes // Thyssenkrupp Marine Systems. — URL: <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/newsroom/press-releases/press-detail-page/thyssenkrupp-marine-systems-uses-3d-printing-to-create-prototypes-12345> (дата обращения 21.02.2025).

ВМС США проводят эксперименты по размещению 3D-принтеров на борту кораблей для оперативного изготовления запасных частей в ходе длительных морских походов, что позволяет минимизировать простои и сократить логистическую цепочку¹⁴. Технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ, DMD) и WAAM эффективно применяются для восстановления посадочных поверхностей, ремонта лопаток гребных винтов и других ответственных узлов, подверженных износу в процессе эксплуатации.

3.4. Развитие нормативной базы и сертификация

Активное внедрение АТ в судостроение стимулировало классификационные общества к разработке специализированных нормативных документов и процедур сертификации.

Классификационное общество DNV в 2016 г. инициировало программу по изучению потенциала АТ для судостроения, результатом которой стало создание системы правил и рекомендаций, легших в основу квалификационных и сертификационных процедур. В 2018 г. DNV выдало компании Thyssenkrupp Marine Systems первый сертификат на АП, признав ее TechCenter Additive Manufacturing утвержденным поставщиком для морской отрасли¹⁵.

DNV осуществляет сертификацию не только готовых изделий, но и исходных материалов, как в случае с проволокой для WAAM производства Voestalpine Böhler Welding, а также одобряет конкретные технологические процессы, такие как запатентованный метод компании AML3D. На основе проектов, подобных созданию титановых лопастей гребного винта с сотовой структурой (Kongsberg Maritime и SLM Solutions), DNV готовит обновления для стандарта DNV B203, что свидетельствует о динамичном развитии нормативной базы¹⁶.

Проведенный анализ международного опыта подтверждает, что аддитивное производство перешло из стадии экспериментальной технологии в стадию практической реализации в судостроении, охватывая весь жизненный цикл судовой техники — от проектирования и производства до ремонта и логистики запасных частей. Дальнейшее развитие отрасли напрямую связано с совершенствованием нормативной базы и накоплением статистики надежности аддитивно произведенных компонентов.

В 2025 г. Международная ассоциация классификационных обществ (МАКО) выпустила Рекомендацию 186 «Металлические детали, изготовленные методом аддитивного производства, для применения на морских судах и стационарных платформах» (Recommendation No. 186 (Mar 2025) Additively Manufactured Metallic Parts for Marine and Offshore Applications) [20]. Документом устанавливаются единые требования к обеспечению качества процессов металлического АП, применяемого в качестве альтернативы традиционным процессам производства материалов, таким как прокатка, литье, ковка и сварка в строительстве. Рекомендация распространяется на изделия/детали узлов и механизмов и не распространяется на корпусные конструкции.

4. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АП В РОССИЙСКОМ СУДОСТРОЕНИИ

Развитие аддитивного производства в российском судостроении характеризуется значительным научно-техническим потенциалом, однако его практическая реализация сталкивается с рядом системных вызовов [4, 21]. На начальном этапе темпы внедрения АП сдерживались консервативными подходами, характерными для металлоемкой отрасли с устоявшимися технологическими цепочками. Однако в последние годы под влиянием факторов импортозамещения, необходимости сокращения сроков строительства и ремонта судов, а также оптимизации логистики запчастей (ЗИП) наметилась устойчивая положительная динамика [5, 22, 23].

¹⁴ Navy explores 3D printing for shipboard repairs // U.S. Navy. — URL: <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/2234567/navy-explores-3d-printing-for-shipboard-repairs/> (дата обращения 21.02.2025).

¹⁵ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

¹⁶ Additive Manufacturing enters the maritime mainstream // DNV. — URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream> (дата обращения 20.02.2025).

4.1. Формирование нормативной базы и научный задел

Фундаментальную роль в легитимизации АП в отрасли сыграло утверждение главы 11 «Продукты аддитивного производства» части XIII Правил Регистра в 2020 г. [11, 21, 24]. Этот документ установил первоначальные требования к металлическим полуфабрикатам и изделиям, полученным методами аддитивного синтеза, и разрешил их применение для элементов корпуса, механизмов и устройств, находящихся под надзором Регистра.

Разработку правил предваряли и сопровождают комплексные научно-исследовательские работы (НИР). В 2019 г. Регистром совместно с Институтом лазерных и сварочных технологий (ИЛИСТ) СПбГМТУ и НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» были исследованы свойства низкоуглеродистой высокопрочной стали, ряда мартенситных нержавеющей сталей и титанового сплава. В 2020 г. АО «ОСК» завершила НИР по изготовлению топологически оптимизированного колеса для гидравлического привода роликового механизма устройства, вытравливающего трос, из титанового сплава [22]. В 2022–2024 гг. в рамках проекта НОЦ «Российская Арктика» проведены успешные исследования мартенситных сталей марок 06X14НДЛ и 08X15Н4ДМЛ для элементов движителей, показавшие, что их свойства после печати и последующей термической обработки соответствуют требованиям к литым заготовкам¹⁷. С 2022 г. инициирован проект, поддержанный АО «ОСК», направленный на разработку технологий АП для кораблестроения. На рис. 6 приведены некоторые изделия, полученные аддитивными методами в рамках НИР.



Рис. 6. Примеры изделий для судостроения, полученные аддитивными методами в результате НИР:
а — гребной винт (ТЛВ, ИЛИСТ); *б* — колесо для гидравлического привода (СЛС, АО «ОСК»);
в — деталь «корпус» (ТЛВ, ИЛИСТ)

Помимо Правил Регистра, в России сформирована и продолжает активно развиваться комплексная национальная нормативная база в области аддитивных технологий. По состоянию на 2025 г. разработано и действует свыше 50 национальных стандартов (ГОСТ Р) и предварительных стандартов (ПНСТ), охватывающих все ключевые аспекты АП. Эта система документов включает:

- фундаментальные и основополагающие стандарты (серия ГОСТ Р 57558-2017 и др.), устанавливающие терминологию, базовые принципы и общие требования к процессам, данным и материалам;
- стандарты на исходные материалы, регламентирующие требования к металлопорошковым композициям (например, ГОСТ Р 59035-2020, ГОСТ Р 70907-2023), их контроль и методы испытаний (ГОСТ Р 57556-2017);
- стандарты на оборудование (ГОСТ Р 57588-2017, ГОСТ Р 59184-2020) и процедуры его квалификации;
- стандарты на конкретные технологические процессы и изделия, в том числе для селективного лазерного сплавления сталей и титановых сплавов (ГОСТ Р 59183-2020, ГОСТ Р 59185-2020, ГОСТ Р 58419-2019), прямого подвода энергии (ГОСТ Р 70242-2022) и других методов;
- стандарты на методы контроля, включая обширный блок по неразрушающему контролю (серия ГОСТ Р 58598-2019 и др.) и измерению остаточных напряжений (ГОСТ Р 71316-2024);
- стандарты, интегрирующие АП в существующие системы конструкторской (ГОСТ 2.310-2022) и технологической (ГОСТ 3.1408-2022) документации.

Развитие нормативной базы не прекращается: на 2026 г. запланирована разработка и актуализация ряда новых национальных стандартов. В фокусе внимания находятся стандарты для проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM), которые критически важны для крупногабаритного судостроения, а также более детальные технические условия на широкую номенклатуру судовых деталей (корпусной арматуры, элементов движительно-рулевых комплексов), изготовленных методами АП. Эта работа направлена на закрытие существующих нормативных пробелов и создание исчерпывающих регламентов для серийного применения аддитивных технологий в отрасли.

¹⁷ Арктика — понятие наукоёмкое // ЦНИИ КМ «Прометей». — URL: <https://crism-prometey.ru/news/novosti/arktika-ponyatie-naukoemkoe/> (дата обращения 22.02.2025).

4.2. Анализ практического внедрения методов АП на предприятиях

Опыт российских судостроительных предприятий демонстрирует разноуровневый подход к внедрению АП [25–27], который можно разделить на несколько направлений:

АП ответственных металлических деталей. Наиболее значимые проекты связаны с технологиями прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и селективного лазерного плавления. Так, АО «ЦС «Звездочка» с 2021 г. проводит экспериментальные работы по изготовлению методом ПЛВ деталей узла уплотнения винторулевых колонок. Эти работы находятся на стадии опытно-конструкторских разработок и направлены на создание функциональных компонентов с высокими требованиями к механическим свойствам.

Производство оснастки, запчастей и ремонт с использованием полимерных технологий. Наиболее массовое и быстро окупаемое направление. Предприятия, такие как АО «ПО «Севмаш», Прибалтийский СЗ «Янтарь», СПО «Арктика» и Амурский судостроительный завод, активно используют технологию FDM для 3D-печати оснастки, корпусов оборудования (например, головки дробеструйного аппарата на «Севмаше») и оперативного ремонта сломанных деталей^{18, 19}. Это позволяет значительно сократить сроки и затраты на технологическое обеспечение производства.

Крупногабаритное прототипирование. В 2024 г. Крыловский государственный научный центр совместно с заводом «Вымпел» создал первую в России модель яхты с использованием аддитивных технологий. Подобные проекты служат важной цели отработки технологий и визуализации новых возможностей для проектирования.

Таким образом, российское судостроение преодолело стадию первоначального ознакомления с АП и перешло к фазе точечного внедрения и накопления практического опыта. Сформированы основы нормативной базы, запущены перспективные НИР и реализуются практические проекты различного уровня сложности, в ходе которых профильные специалисты предприятий и научных центров приобретают критически важные компетенции. Дальнейшее ускорение этого процесса зависит от консолидированных усилий государства, научно-исследовательских центров и промышленных предприятий, направленных на решение проблем в области стандартизации, обеспечения материалами, подготовки кадров и снижения экономических барьеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подтверждает, что аддитивное производство обладает потенциалом для трансформации технологических процессов в судостроении. Мировой опыт демонстрирует успешные примеры внедрения АП на всех этапах жизненного цикла судна — от прототипирования и производства функциональных компонентов (гребные винты, биметаллические клапаны) до ремонта и оперативного изготовления запчастей. В России развитие АП находится на начальной, но активной стадии: сформирована основа нормативной базы (гл. 11 ч. XIII Правил Регистра, более 50 ГОСТ), ведутся НИР и запускаются пилотные проекты на предприятиях.

Однако для перехода от точечных успехов к широкомасштабному внедрению необходимо системное решение следующих задач.

1. Развитие и гармонизация нормативной базы. Основной задачей остается разработка единых детализированных стандартов и процедур сертификации, признаваемых на международном уровне. Это включает в себя как создание новых стандартов (в частности, для технологий WAAM и серийного производства конкретных судовых деталей), так и углубление международного сотрудничества между классификационными обществами и организациями по стандартизации.

2. Комплексные исследования и оптимизация технологий. Требуется изучение свойств аддитивных материалов в реальных эксплуатационных условиях: коррозионная стойкость, усталостная прочность, трещиностойкость, свариваемость. Параллельно необходима оптимизация параметров печати и режимов последующей термической и механической обработки для гарантированного получения заданных свойств и минимизации анизотропии.

¹⁸ «Севмаш» внедряет аддитивные технологии // ОСК «Севмаш». — URL: <https://sevmash.ru/rus/news/3098-2021-05-19-05-46-42.html> (дата обращения 21.02.2025).

¹⁹ В СПО «Арктика» развиваются новые направления промышленной автоматизации и аддитивных технологий // Медиапалуба. — URL: <https://paluba.media/news/70236> (дата обращения 22.02.2025).

3. Преодоление технологической зависимости и развитие инфраструктуры АП. Критически важно наладить отечественное производство высококачественных металлопорошковых композиций и специализированной проволоки, а также продолжить локализацию производства оборудования для АП. Это снизит риски и затраты для судостроительных предприятий.

4. Подготовка кадров и формирование компетенций. Для внедрения АП необходима целенаправленная подготовка нового поколения инженеров, технологов и операторов, владеющих знаниями на стыке материаловедения, цифрового проектирования и аддитивных технологий.

Реализация этих стратегических инициатив позволит раскрыть потенциал аддитивного производства, что в перспективе приведет к созданию принципиально новых, топологически оптимизированных конструкций, значительному сокращению сроков строительства и ремонта судов и укреплению технологического суверенитета судостроительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DebRoy T. Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee et al. // *Progress in Materials Science*. — 2018. — Vol. 92. — P. 112–224.
2. Herzog D. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Materialia*. — 2016. — Vol. 117. — P. 371–392.
3. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review / W.E. Frazier // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2014. — Vol. 23, No. 6. — P. 1917–1928.
4. Александров М.В. Основные направления модернизации и развития предприятий судостроения / М.В. Александров, Н.Н. Солнцев, А.В. Вебер, Ю.М. Зубарев, В.А. Барсуков // *Судостроение*. — 2021. — № 5(858). — С. 39–42.
5. Савченко О.В. Современное состояние, проблемы и перспективы развития отечественного гражданского судостроения / О.В. Савченко, В.Н. Половинкин // *Судостроение*. — 2022. — № 3(862). — С. 3–10.
6. Sözen A. A critical systematic scoping review on the applications of additive manufacturing (AM) in the marine industry / A. Sözen, G. Neşer // *Polymers*. — 2025. — Vol. 17(1). — P. 4.
7. Котов В.С. Опыт применения аддитивных технологий в мировом судостроении // *Судостроение*. — 2020. — № 6(853). — С. 34–37.
8. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития / А.В. Дектярев, В.Н. Морозов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2017. — № 4(38), т. 2. — С. 76–82.
9. Armanfar A. Embedding lattice structures into ship hulls for structural optimization and additive manufacturing / A. Armanfar, A. Taşmektepligil, R.T. Kiliç, S. Demiret et al. // *Ocean Engineering*. — 2024. — Vol. 301. — P. 117601.
10. Scattareggia Marchese S. G. Feasibility study on additive-manufactured honeycomb sandwich structural solutions for a Fast Patrol Vessel / S. Scattareggia Marchese, G. Epasto, V. Crupi, Y. Garbatov // *Composite Structures*. — 2025. — Vol. 351. — P. 118601.
11. Правила классификации и постройки морских судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
12. Котов В.С. Использование полимерных материалов в системе оперативного ремонта судового оборудования / В.С. Котов, Р.К. Резникова, А.А. Коростелев, В.В. Барсков // *Судостроение*. — 2022. — № 5(864). — С. 50–53.
13. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроении: тенденции и правовое регулирование / А.В. Дектярев, В.Н. Морозов, А.Я. Яфасов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 4(46), т. 4. — С. 38–49.
14. Гринадеров В.Ю. Аддитивные технологии для изготовления судовой арматуры / В.Ю. Гринадеров // *Судостроение*. — 2023. — № 4(869). — С. 54–57.
15. Дектярев А.В. Технология изготовления корпуса маломерного судна методами аддитивного производства / А.В. Дектярев, П.Г. Зобов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова*. — 2022. — Т. 14, № 4. — С. 571–582.
16. Войнов П.С. Возможности применения аддитивных технологий при конструировании и производстве вооружения, военной и специальной техники / П.С. Войнов, В.Я. Беленький, Д.С. Белинин, С.В. Варушкин // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. — 2021. — Т. 23, № 2. — С. 70–78.
17. Бобырь В.В. Исследование влияния параметров прямого лазерного выращивания на структуру и свойства высокопрочной нержавеющей стали марки 08X14NDJ / В.В. Бобырь, Т.В. Князюк, Л.В. Мухамедзянова, М.В. Старицын, П.А. Кузнецов // *Вопросы материаловедения*. — 2024. — № 4(120). — С. 63–72.
18. Князюк Т.В. Исследование влияния аустенизации на структуру и свойства аддитивной нержавеющей стали марки 08X18H10T / Т.В. Князюк, И.В. Шакиров, Л.В. Мухамедзянова, М.С. Михайлов // *Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2024): материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф.* — Пермь, 2024. — С. 107–112.
19. Иванов А.В. Особенности организации судового ремонта с помощью аддитивных технологий / А.В. Иванов, В.В. Ваганов, Н.А. Билецкий // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2020. — № 1(47), т. 1. — С. 118–124.
20. Recommendation No. 186 (Mar 2025) Additively Manufactured Metallic Parts for Marine and Offshore Applications. — [Электронный ресурс] URL: <https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations>.
21. Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении / А.Е. Киселева // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2017. — № 48/49. — С. 84–88.
22. Бурмистров М. AddSol — давно не стартап / М. Бурмистров // *Аддитивные технологии*. — 2022. — № 3. — С. 15.
23. Спиридонов А.Ю. Практический опыт применения аддитивных технологий в отечественном судостроении / А.Ю. Спиридонов, С.М. Ляшенко, А.А. Прохода, П.Г. Зобов // *Морской вестник*. — 2020. — № S1 (14). — С. 90–93.

24. Кордонец С.М. Расширение компетенций Российского морского регистра судоходства. Введение требований к инновационным материалам и технологиям / С.М. Кордонец, М.А. Кутейников, А.В. Кучапов, М.Е. Юрков // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — Специальный выпуск 1. — С. 28–32.
25. Зобов П.Г. Опыт применения аддитивных технологий на судостроительном предприятии / П.Г. Зобов // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сборник материалов II Всерос. науч.-практ. конф. — Архангельск, 2021. — С. 96–105.
26. Халилов Н.А. Инновационные 3D-технологии в судостроении и судоремонте. Обзор текущего состояния / Н.А. Халилов, Д.В. Огурцов, О.П. Коперчак // Эксплуатация морского транспорта. — 2020. — № 4(97). — С. 116–121.
27. Костылев А.А. Опыт применения аддитивных технологий в судостроении на примере использования установки прямого лазерного выращивания / А.А. Костылев // Новые технологии в судостроении: сборник трудов отраслевой науч.-техн. конф. СПб., 2022. С. 81–84.

REFERENCES

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T. et al. Additive manufacturing of metallic components — Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 92. P. 112–224.
2. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 371–392.
3. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014. Vol. 23, No. 6. P. 1917–1928.
4. Aleksandrov M.V., Solntsev N.N., Veber A.V., Zubarev Yu.M., Barskov V.A. General modernization and development trends of shipbuilding enterprises. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2021. No. 5(858). P. 39–42. (In Russ.)
5. Savchenko O.V., Polovinkin V.N. Current state, problems and prospects for development of domestic shipbuilding industry. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2022. No. 3(862). P. 3–10. (In Russ.)
6. Sözen A., Neşer G. A critical systematic scoping review on the applications of additive manufacturing (AM) in the marine industry. *Polymers*. 2025. Vol. 17(1). P. 4.
7. Kotov V.S. Additive technologies in world shipbuilding industry: application experience. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2020. No. 6(853). P. 34–37. (In Russ.)
8. Dektyarev A.V., Morozov V.N. Additive technologies in the shipbuilding industry and prospects for their development. *Marine Intellectual Technologies*. 2017. No. 4(38), vol. 2. P. 76–82. (In Russ.)
9. Armanfar A., Taşmektepligil A., Kiliç R.T., Demiret S. et al. Embedding lattice structures into ship hulls for structural optimization and additive manufacturing. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 301. P. 117601.
10. Scattareggia Marchese S., Epasto G., Crupi V., Garbatov Y. Feasibility study on additive-manufactured honeycomb sandwich structural solutions for a Fast Patrol Vessel. *Composite Structures*. 2025. Vol. 351. P. 118601.
11. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
12. Kotov V.S., Reznikova R.K., Korostelev A.A., Barskov V.V. Use of polymeric materials for rapid repair of shipboard equipment. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2022. No. 5(864). P. 50–53. (In Russ.)
13. Dektyarev A.V., Morozov V.N., Yafasov A.Ya. Additive technologies in shipbuilding: trends and legal regulation. *Marine Intellectual Technologies*. 2019. No. 4(46), part 4. P. 38–49. (In Russ.)
14. Grinaderov V.Yu. Additive technologies for production of ship valves and fittings. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2023. No. 4 (869). P. 54–57. (In Russ.)
15. Dektyarev A.V., Zobov P.G. Technology for producing the small vessel hull by the additive manufacturing methods. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 571–582. (In Russ.)
16. Voynov P.S., Belen'kiy V.Ya., Belinin D.S., Varushkin S.V. Possibilities of additive technologies application in designing and manufacturing of weapons of military equipment]. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2021. Vol. 23, No. 2. P. 70–78.
17. Bobyr' V.V., Knyazyuk T.V., Mukhamedzyanova L.V., Staritsyn M.V., Kuznetsov P.A. Study of the influence of direct laser deposition parameters on the structure and properties of high-strength 08Kh14NDL stainless steel. *Voprosy materialovedeniya [Problems of Materials Science]*. 2024. No. 4 (120). P. 63–72. (In Russ.)
18. Knyazyuk T.V., Shakirov I.V., Mukhamedzyanova L.V., Mikhaylov M.S. Issledovanie vliyaniya austenitizatsii na strukturu i svoystva additivnoy nerzhaveyushchey stali marki 08Kh18N10T [Study of the effect of austenitization on the structure and properties of additive stainless steel grade 08Kh18N10T]. Innovatsionnye tekhnologii v materialovedenii i mashinostroenii (ITMM-2024): materialy VIII Vseros. nauch.-prakt. konf. [Innovative technologies in materials science and mechanical engineering: Proceedings of the All-Russian science and pract. conf.]. Perm', 2024. P. 107–112.
19. Ivanov A.V., Vaganov V.V., Biletskiy N.A. Features of organization of ship repair using additive technologies. *Marine Intellectual Technologies*. 2020. No. 1(47), part 1. P. 118–124. (In Russ.)
20. Recommendation No. 186 (Mar 2025) Additively Manufactured Metallic Parts for Marine and Offshore Applications. International Association of Classification Societies (IACS). 2025. URL: <https://iacs.org.uk/resolutions/recommendations> (accessed: 20.02.2025).
21. Kiseleva A.E. Application of additive technologies in solving shipbuilding design problems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017. No. 48/49. P. 84–88. (In Russ.)
22. Burmistrov M. AddSol — davno ne startup [AddSol — not a startup for a long time]. *Additivnye tekhnologii [Additive Technologies]*. 2022. No. 3. P. 15.
23. Spiridonov A.Yu., Lyashenko S.M., Prokhoda A.A., Zobov P.G. Prakticheskiy opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy v otechestvennom sudostroenii [Practical experience in the application of additive technologies in domestic shipbuilding]. *Morskoy vestnik [Marine Bulletin]*. 2020. No. S1 (14). P. 90–93.
24. Kordonets S.M., Kuteynikov M.A., Kuchapov A.V., Yurkov M.E. Rasshirenie kompetentsiy Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. Vvedenie trebovaniy k innovatsionnym materialam i tekhnologiyam [Expansion of competencies of the Russian Maritime Register of Shipping. Introduction of requirements for innovative materials and technologies]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Transactions of the Krylov State Research Centre]*. 2022. No. S1. P. 28–32.

25. Zobov P.G. Opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy na sudostroitel'nom predpriyatii [Experience in the application of additive technologies at a shipbuilding enterprise]. *Aktual'nye voprosy innovatsionnogo razvitiya Arkticheskogo regiona RF: sbornik materialov II Vseros. nauch.-prakt. konf. [Current issues of the innovative development of the Arctic region: Proceedings of the 2nd All-Russian science and pract. conf.]* Arkhangel'sk, 2021. P. 96–105.
26. Khalilov N.A., Ogurtsov D.V., Koperchak O.P. Innovatsionnye 3D-tekhnologii v sudostroenii i sudoremonte. Obzor tekushchego sostoyaniya [3-D technologies in shipbuilding and ship repair. Overview of the current state]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Operation of maritime transport]*. 2020. No. 4 (97). P. 116–121.
27. Kostylev A.A. Opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy v sudostroenii na primere ispol'zovaniya ustanovki pryamogo lazernogo vyrashchivaniya [Experience in the application of additive technologies in shipbuilding on the example of using a direct laser growing installation]. *Novye tekhnologii v sudostroenii : sbornik trudov otraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [New technologies in shipbuilding: Collection of papers of the industry scientific and technical conference]*. St. Petersburg, 2022. P. 81–84.

Статья поступила в редакцию 17.12.2025.

Принята к публикации 02.03.2026.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.5 + 62-62
EDN VTTGНU

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С.В. Бессонов, инженер-инспектор, Российский морской регистр судоходства, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., д. 10, корп. 6, лит. А, e-mail: bessonov.sv@rs-class.org

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

Поиск альтернатив углеводородным топливам нефтяного происхождения для судовых энергетических установок обусловлен главным образом экологическими факторами. В статье сформулированы требования, которым должны удовлетворять альтернативные топлива, определены наиболее перспективные из них: водород, аммиак, метанол. Проанализирован имеющийся опыт использования данных видов топлива в судовой энергетике, выявленные проблемы и необходимые модернизации судовых двигателей. Описаны существующие способы получения водорода, аммиака и метанола с указанием их достоинств и недостатков. Отмечено, что большинство существующих технологий получения альтернативных топлив требуют значительных энергетических затрат и сопровождаются вредными выбросами в атмосферу. В связи с этим при оценке энергоэффективности использования альтернативных топлив необходимо учитывать энергетические и экологические факторы как в сфере использования, так и в сфере производства топлива. Намечены направления дальнейших научных исследований в области альтернативных топлив для судовых энергетических установок. Целью исследований является формирование подхода, обеспечивающего объективную оценку экологического эффекта в результате перехода на альтернативные топлива. Сделаны выводы, что использование водорода, аммиака и метанола в судовых установках перспективно для снижения углеродного следа морских перевозок, хотя может увеличивать выбросы NO_x . Реальный экологический эффект следует оценивать по всему жизненному циклу топлива — от добычи сырья до сжигания. Современные технологии производства этих топлив слишком энергоемки и экономически невыгодны, а судовые двигатели требуют серьезной модернизации. Расширение их применения возможно только при дальнейшем совершенствовании технологий получения топлив и рабочих процессов ДВС.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, двигатели внутреннего сгорания, снижение выбросов углекислого газа, альтернативные виды топлива, водород, аммиак, метанол, производство альтернативных видов топлива.

Для цитирования: Бессонов С.В. Экологические аспекты использования и производства альтернативных топлив для судовых энергетических установок / С.В. Бессонов, В.А. Жуков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 159–170. — EDN VTTGНU.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE USE AND PRODUCTION OF ALTERNATIVE FUELS FOR MARINE POWER PLANTS

S.V. Bessonov, Engineer Surveyor, Russian Maritime Register of Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul., 10, Building 6, Lit. A, e-mail: bessonov.sv@rs-class.org

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

The search for alternatives to petroleum-based hydrocarbon fuels for marine propulsion systems is driven primarily by environmental factors. This article formulates the requirements that alternative fuels must meet and identifies the most promising: hydrogen, ammonia, and methanol. The article analyzes the existing experience of using these fuels in marine propulsion systems, identifying the problems and necessary upgrades to marine engines. The article describes existing methods for producing hydrogen, ammonia, and methanol, outlining their advantages and disadvantages. It is noted that most existing technologies for producing alternative fuels require significant energy inputs and are accompanied by harmful emissions into the atmosphere. Therefore, when assessing the energy efficiency of using alternative fuels, it is necessary to consider energy and environmental factors in both the use and production of fuel. Directions for further scientific research in the field of alternative fuels for marine propulsion systems are outlined. The goal of this research is to develop an approach that ensures an objective assessment of the environmental impact of switching to alternative fuels. The study concluded that the use of hydrogen, ammonia, and methanol in marine propulsion systems offers potential for reducing the carbon footprint of maritime transport, although it may increase NO_x emissions. The actual environmental impact should be assessed across the entire fuel life cycle—from raw material extraction to combustion. Current production technologies for these fuels are too energy-intensive and economically unviable, and marine engines require significant modernization. Expanding their use is only possible with further improvements in fuel production technologies and internal combustion engine operating processes.

Keywords: *marine power plants, internal combustion engines, reduction of carbon dioxide emissions, alternative fuels, hydrogen, ammonia, methanol, production of alternative fuels.*

For citation: Bessonov S.V., Zhukov V.A. Environmental aspects of the use and production of alternative fuels for marine power plants. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 159–170. EDN VTTGHU. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития человеческой цивилизации характеризуется стремлением к переходу к так называемой зеленой энергетике. Основным критерием оценки успехов на этом пути является снижение выбросов в атмосферу. Сокращение выбросов с отработавшими газами судовых двигателей является ключевым фактором для уменьшения воздействия на окружающую среду, вызванного использованием углеводородного топлива судовыми энергетическими установками. Ожидается, что значительный вклад в это внесет замена традиционного судового топлива альтернативными видами топлива, характеризующимися минимальными вредными выбросами в атмосферу, как при производстве, так и при использовании на судне. Поиски альтернативных топлив, способных заменить жидкие углеводородные топлива нефтяного происхождения, начались достаточно давно.

Цель данной работы заключается в рассмотрении перспективных видов топлива, использование которого в традиционных или разрабатываемых двигателях водного транспорта позволяет решить энергетические и экологические проблемы. С учетом специфики транспорта можно рассмотреть четыре основных условия перспективности новых (альтернативных) видов топлива:

- 1) наличие достаточных сырьевых ресурсов и возможность производства топлива в требуемых количествах;
- 2) технологическая и энергетическая совместимость топлива с существующими или перспективными энергетическими установками;
- 3) приемлемые экономические и экологические показатели использования топлива;
- 4) безопасность в процессе хранения и эксплуатации.

В 70–80 гг. XX в. к альтернативному топливу судовой энергетики относили сжиженный природный газ. Успехи, достигнутые в разработке технологий хранения и использования сжиженного газа, а также его расширяющееся применение на флоте [1–3] позволяют в настоящее время считать природный газ одним из видов судового топлива, исключив его из перечня альтернативных топлив. В настоящее время использование альтернативных топлив в судовой энергетике остается перспективным направлением развития отрасли, прежде всего с точки зрения замещения углеводородных топлив нефтяного происхождения и решения экологических проблем [4, 5].

Перспективы развития морского транспорта также ориентированы на «зеленые» перевозки, характеризующиеся высокой энергетической эффективностью: минимальными затратами топлива в сочетании с минимальными отрицательными последствиями для здоровья людей и окружающей среды. Для достижения этой цели потребуются совместные усилия со стороны научных работников, судовладельцев, регулирующих органов, портовых властей. Международная морская организация (ИМО), которая регулирует международное судоходство, постепенно принимает меры. С 1980-х гг. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ) ограничивает выбросы в океаны масел, вредных жидкостей, опасных веществ, сточных вод и мусора после череды аварий с нефтяными танкерами [6]. Особое внимание при этом уделяется выбросам вредных веществ с отработавшими газами судовых энергетических установок в атмосферу. В 2012 г. доля судоходства в суммарных мировых выбросах оксидов азота (NO_x) и оксидов серы (SO_x) составила 15 % и 13 % соответственно. Оба загрязняющих вещества оказывают огромное влияние на экологический след судоходства. Чтобы уменьшить количество этих загрязняющих веществ и их воздействие, ИМО разработала ряд ограничений в рамках Приложения VI (Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов) к Конвенции МАРПОЛ 73/78 и ввела зоны контроля выбросов. Для снижения выбросов углекислого газа (CO_2) ИМО ввела правила, включая систему управления энергоэффективностью судов (SEEMP), проектный индекс энергоэффективности (EEDI) и эксплуатационный показатель энергоэффективности (EEOI) для вновь построенных судов, а также индекс энергоэффективности (EECI) и индекс углеродоемкости (CII) для существующих судов [7]. Развернутый анализ стратегического планирования ИМО в области сокращения парниковых газов, а также международных и отечественных нормативных документов, касающихся сокращения выбросов в атмосферу, представлен в работе [8].

Наиболее подходящими решениями для сокращения выбросов парниковых газов с судов считаются водород, аммиак и метанол. Кроме того, необходимость сравнительной оценки дизельного и альтернативного топлив подчеркивает важность изучения эксплуатационных характеристик судовых двигателей для возможности эффективного использования альтернативных видов топлив в качестве топлива для судовых двигателей внутреннего сгорания. Также использование комбинаций альтернативных и дизельных видов топлива рассматривается как направление декарбонизации морского сектора, что увеличивает потребность в исследованиях по оптимизации конструкции и эксплуатации судовых двигателей.

Необходимо отметить, что традиционные подходы к оценке экологического эффекта перехода на альтернативные виды топлива, в том числе предлагаемые ИМО, опираются на оценку экологических последствий при использовании различных видов топлива. Для более корректной оценки экологических последствий использования того или иного вида топлива целесообразно использовать комплексный подход, учитывающий воздействие на окружающую среду не только продуктов сгорания топлива, но и выбросы в атмосферу, сопровождающие процесс производства топлива.

1. ВОДОРОД КАК ТОПЛИВО ДЛЯ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Опыт использования водорода в качестве топлива энергетических установок речных и морских судов достаточно подробно рассмотрен в публикациях [9, 10].

Использование водорода в качестве топлива для судовых энергетических установок возможно и как единственного энергетического источника, и совместно с дизельным топливом в двигателях, работающих на двух видах топлива. В двухтопливных двигателях дизельное топливо подается в цилиндры как «запальная доза» незадолго до прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ). Численное исследование параметров рабочего процесса водородно-дизельного двигателя с воспламенением от сжатия, работающего на двух видах топлива, проведено Ревазом Кавтарадзе, Тамазом Натриашвили и Сергеем Гладышевым с помощью вычислительной гидродинамики (CFD). Исследование проводилось для одноцилиндрового водородно-дизельного двигателя MAN ($S/D=300/240$ мм/мм), концентрация оксидов азота в продуктах сгорания составила 920 частей на миллион, среднее эффективное давление $p_e=9,0$ бар, а индикаторный КПД водородно-дизельного двигателя $\eta_i=0,48$ [11].

Двигатели с искровым зажиганием могут предложить более простую технологию использования водорода, но в процессе работы могут возникнуть такие трудности, как воспламенение водорода в процессе впрыска. Данная проблема может привести к повреждению систем впуска двигателя и подачи топлива, а также к нестабильности сгорания топлива. Также в случае судовых двигателей требуются высокие уровни крутящего момента при низких оборотах, а двигатели с искровым зажиганием не могут обеспечить нужных параметров [11].

Водород — это топливо, которое характеризуется высокой воспламеняемостью. Утечки могут привести к образованию взрывоопасной атмосферы или пожару, особенно в замкнутых пространствах машинного отделения. Чтобы это предотвратить, необходимо принять соответствующие меры безопасности, в том числе обеспечить надлежащее обращение с газом, надлежащую вентиляцию, обнаружение утечки водорода, обнаружение пожара и систему сигнализации. Жидкий водород, который сжижается при давлении 300–400 бар или температуре $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12, 13], требует специального оборудования для криогенного хранения и соответствующих мер по контролю рисков. В частности, для предотвращения повышения давления необходимы предохранительные клапаны. Кроме того, для хранения при низких температурах требуются толстые изоляционные слои или вакуумная изоляция. При хранении и транспортировке водорода следует тщательно выбирать материалы. Водород из-за своего небольшого молекулярного размера может легко проникать в различные материалы, и некоторые материалы подвержены водородному охрупчиванию (потеря пластичности и/или вязкости). Кодекс IGF устанавливает стандарты для судов, использующих топливо с низкой температурой вспышки, удовлетворяющие функциональным требованиям ИМО. В частности, стандарты касаются расположения, установки, контроля и мониторинга, а также безопасности компонентов и систем, связанных с использованием топлива с низкой температурой вспышки.

Производство водорода

Производство водорода в соответствии с рекомендациями Мирового энергетического совета (World Energy Council, WEC) принято классифицировать цветовой маркировкой в зависимости от наносимого экологического ущерба (рис. 1).

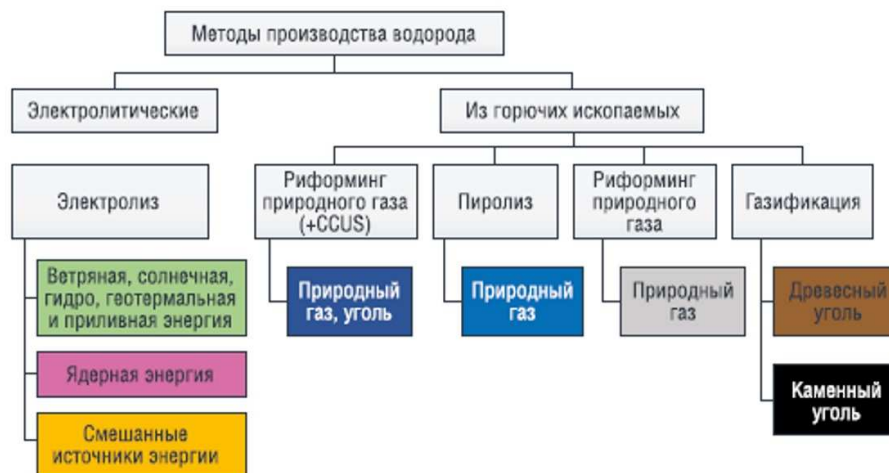


Рис. 1. Классификация способов получения водорода

Наиболее экологически чистым методом производства водорода является электролиз воды. В данном процессе происходит разделение молекул воды (H_2O) на водород и кислород под воздействием электрического тока, который протекает в электролизере, состоящем из разделительной мембраны, анода и катода. На рис. 2 представлена возможная схема реализации процесса электролиза воды прямым контактом с расплавом свинца-висмута.

Экологическая чистота — это одно из важных преимуществ электролиза воды, а минусом является энергоёмкость, так как для производства 1 кг H_2 требуется затратить около 50–60 кВт·ч электроэнергии, что делает метод получения водорода с помощью электролиза экономически невыгодным при использовании невозобновляемой энергии [15]. В зависимости от используемой для электролиза энергии различают «зеленый», «красный» и «желтый» водород. «Зеленый» водород — это водород, который производят с использованием возобновляемых источников электрической энергии (солнечная, ветровая, гидро- и геотермальная). В настоящее время мощность таких источников энергии является недостаточной для производства существенного количества водорода. «Красный» и «желтый» водород производятся за счет электроэнергии, вырабатываемой АЭС и ТЭС. «Серый», «синий» и «голубой» водород получают в результате переработки природного газа. «Серый» водород производится как побочный продукт промышленных процессов в результате парового риформинга метана. При производстве «серого» водорода в атмосферу выбрасываются вредные вещества (CO_2 и CO). «Синий» водород также производится в процессах, в ходе

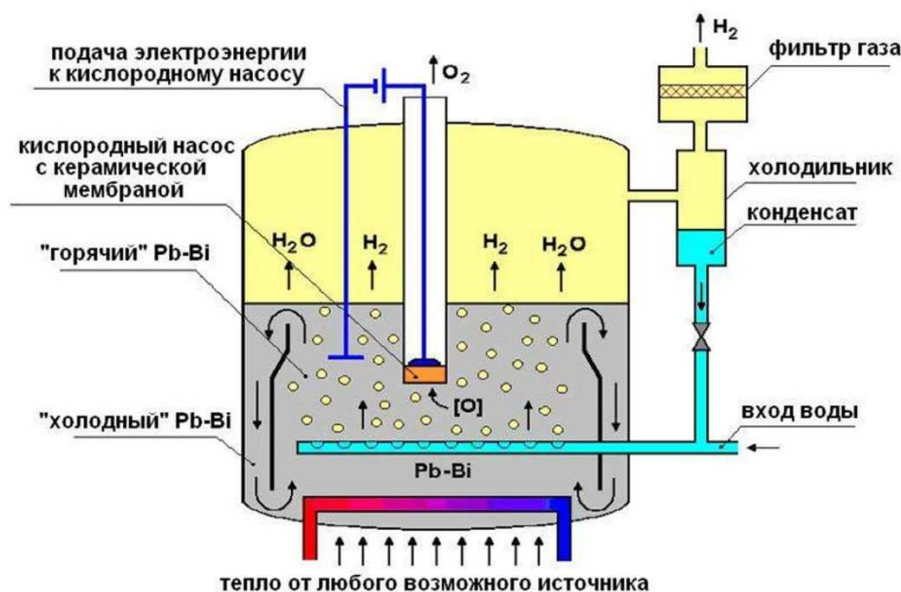


Рис. 2. Производство водорода при электролизе воды прямым контактом с расплавом свинца-висмута [14]

которых образуется CO_2 , однако с использованием технологий CCUS (carbon capture, use, and storage — улавливание, использование и хранение углерода) для получения низкоуглеродного водорода, обеспечивающих снижение выбросов углекислого газа в атмосферу, что важно для достижения углеродной нейтральности. «Голубой» водород производят из природного газа с применением сложных технологических процессов риформинга, сопровождающихся выбросами в атмосферу парниковых газов [16].

Одним из используемых в настоящее время методов является получение водорода из природного газа с помощью паровой конверсии метана. Данный способ более распространенный и экономически рациональный для производства водорода, он включает в себя процесс реакции природного газа и водяного пара при высоких температурах ($700\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$) в присутствии катализатора. В результате этого процесса образуются водород и монооксид углерода (CO), который подвергается реакции с водой, образуя дополнительный водород и углекислый газ [15].

«Черный» и «коричневый» водород производят из угля путем газификации — многоступенчатого процесса реакции угля с кислородом и паром при высоких температурах для получения смеси газов, одним из которых является водород. Добыча угля и его последующая газификация сопровождается образованием большого количества оксидов углерода, что существенно снижает экологические преимущества полученного водорода.

Кроме электролиза и паровой конверсии метана, существуют другие способы получения водорода:

- биологические. Производство H_2 с помощью микроорганизмов — водорослей, бактерий. Эти методы экологически чистые, но у них низкая производительность;
- термическое разложение. При температуре свыше $2000\text{ }^\circ\text{C}$ молекулы воды разлагаются на H_2 и O_2 . Для реализации этой технологии применяют концентрированную солнечную энергию или термоядерный синтез. Но высокая температура не позволяет гарантировать стабильность процесса;
- пиролиз метана. Альтернатива паровой конверсии. При пиролизе метан разлагается на водород и твердый углерод. Этот метод гарантирует нулевой выброс CO_2 ;
- переработка биомассы, пластика с помощью газификации, термохимических процессов. Технология одновременно решает и проблему утилизации отходов, и задачу производства горючего.

Указанные методы получения водорода для широкого использования требуют дальнейших исследований и совершенствований, обеспечивающих, прежде всего, снижение энергетических затрат на осуществление технологических процессов.

2. АММИАК КАК ТОПЛИВО ДЛЯ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основной проблемой аммиака как топлива является сравнительно низкая скорость распространения фронта пламени, что не позволяет добиться полного сгорания топлива в судовых двигателях внутреннего сгорания. Исследования скорости горения аммиачно-воздушной смеси позволили установить, что скорость распространения пламени в ней составляет 6–8 см/с, что значительно ниже скорости горения метано-воздушной смеси (35 см/с). Изменение давления на впуске незначительно влияет на скорость распространения пламени, в то время как изменение температуры имеет различное влияние в различных диапазонах коэффициента избытка воздуха. Перспективным способом повышения скорости горения аммиака является обогащение горючей смеси кислородом. При использовании аммиака в двигателях с воспламенением от сжатия возникают те же проблемы, что и при использовании водорода, связанные с чрезвычайно высокой температурой самовоспламенения. Считается, что оптимальная степень сжатия для сгорания аммиачного топлива находится в диапазоне от 35 до 100, что значительно выше степеней сжатия существующих судовых дизелей. В результате этого исследований, посвященных работе судовых двигателей исключительно на аммиаке, проводится достаточно мало. Однако при работе на двух видах топлива отсутствие углерода в аммиаке обеспечивает значительные экологические преимущества. Рекомендуется производить модернизацию двигателя, чтобы степень сжатия при работе на дизель-аммиачной топливной смеси составляла не более 15, при этом полное сгорание достигается при впрыске аммиака не позднее чем за 40 градусов до конца впрыска дизельного топлива. Результаты испытаний различных пропорций аммиачно-дизельного топлива в двухтопливном двигателе позволили установить, что оптимальный диапазон содержания аммиака в смеси (компромисс между эффективностью сгорания и выбросами вредных веществ с отработавшими газами) составляет 40–80 %. Содержание NO_x в отработавших газах по сравнению с дизельными двигателями снижается на 60 %. Известны результаты исследований двигателей с воспламенением от сжатия, работающих на водородно-аммиачном топливе, со степенью сжатия 22. Были исследованы различные топливные смеси с содержанием аммиака от 0 до 94 % при коэффициентах избытка воздуха от 0,1 до 0,6 и температурой газовой смеси на впуске от 50 до 240 °С. При использовании смесей с высоким содержанием аммиака выбросы NO_x увеличивались, а при температуре сгорания ниже 1400 К наблюдалось нежелательное образование N_2O . Эффективность сгорания оставалась практически неизменной, в то время как среднее эффективное давление (IMEP) увеличилось примерно на 50 % при максимальной концентрации аммиака в смеси.

По сравнению с водородом аммиак имеет более узкий диапазон воспламеняемости, однако он обладает чрезвычайно высокой способностью вступать в химические реакции. Его следует хранить вдали от потенциальных источников возгорания и некоторых химических веществ. Он вступает в бурную реакцию с галогенами, межгалогенными соединениями и окислителями, что приводит к взрывам. Потенциальная утечка аммиака может привести к ситуации, когда он будет обладать высокой токсичностью и коррозионной активностью, что повысит вероятность взрыва. Тем не менее риск возгорания считается ниже, чем для других видов топлива. У аммиака высокая температура самовоспламенения, что может привести к нестабильному сгоранию или даже выбросам несгоревшего аммиака при низкой нагрузке на двигатель и высоких оборотах, что потенциально может негативно сказаться на работе двигателя. Одним из основных недостатков аммиака является то, что он токсичен для человека и может привести к серьезным осложнениям со здоровьем. Кроме того, в кодексе IGC есть строгие правила в отношении материалов, которые можно использовать для аммиака [17]. Жидкий аммиак хранят при атмосферном давлении и температуре 240 К в емкостях или в сосудах под давлением 1,8 МПа из углеродисто-марганцевой стали или стали, легированной никелем [26]. Для снижения рисков, связанных с аммиаком, необходимы соответствующие системы пожаротушения, средства индивидуальной защиты, независимая вентиляция для помещений с аммиаком, аварийная вытяжная вентиляция и закрытые топливные системы с двухслойной линией подачи.

С 2020 по 2024 г. реализовывался проект модернизации судна снабжения Viking Energy для работы на безэмиссионном топливе с топливными элементами на аммиаке [19]. В рамках проекта на судне установлен аммиачный топливный элемент мощностью 2 МВт. В рамках испытаний судно должно было использовать аммиак в пути между портом и морскими установками, а также использовать аммиак для питания судна у причала. Цель проекта состояла в том, чтобы от 60 до 70 % потребляемой энергии приходилось на аммиак. Viking Energy по-прежнему могло использовать СПГ в качестве топлива, дополнительная цель проекта — продемонстрировать, что использование аммиака может обеспечить до 90 % всей потребности в электроэнергии судна. Планировалось, что в качестве топлива компания Yara будет поставлять «зеленый» аммиак, производимый из чистого водорода, получаемого электролизом (с использованием возобновляемых источников энергии), и доставляемый Viking Energy в контейнерах для обеспечения легкой и безопасной заправки.

Безуглеродное топливо предполагалось производить на заводе в Порсгунне (Норвегия), где Yara и производитель электролизеров Nel объявили о начале пилотного проекта производства «зеленого» аммиака к 2022 г. [20].

Буксир с двигателем, работающим на аммиаке, разработали японская судоходная и логистическая компания NYK Lines и IHI Power Systems. В ближайшие 10–20 лет страна намерена перевести значительную часть морского транспорта на это чистое топливо. В отрасли делают ставку на использование аммиака, посчитав его более перспективным и удобным в использовании, чем водород [21].

Производство аммиака

Аммиак привлекает внимание в качестве судового топлива из-за отсутствия выбросов CO_2 при его сжигании в двигателях внутреннего сгорания. Также важно подчеркнуть, что необходимо учитывать и выбросы в производственном цикле, которые используются для производства аммиака, поскольку в противном случае учет связанных с ним выбросов CO_2 просто приходится на его производство, что в полном цикле не делает его экологически чистым.

Основные альтернативы промышленности по производству аммиака подразделяются, как правило, по «цвету» водорода, используемого в синтезе Габера — Боша: «зеленый» водород из возобновляемых источников энергии позволяет получать «зеленый» аммиак, а «голубому» водороду из ископаемых источников в сочетании с технологиями улавливания, использования и хранения углерода (CCUS) соответствует «голубой» аммиак. При использовании в процессе производства «голубого» водорода таких технологий, как CCUS, повышение нефтеотдачи (EOR) и/или производство синтетических углеводов (например, синтез метанола), позволяющих получать другие продукты с добавленной стоимостью, получаемый из этого водорода «голубой» аммиак не будет действительно углеродно-нейтральным. Если желательным продуктом является безуглеродный аммиак, то в производстве необходимо использовать «зеленый» водород (в соответствии с концепцией Power-to-X, представленной на рис. 3).

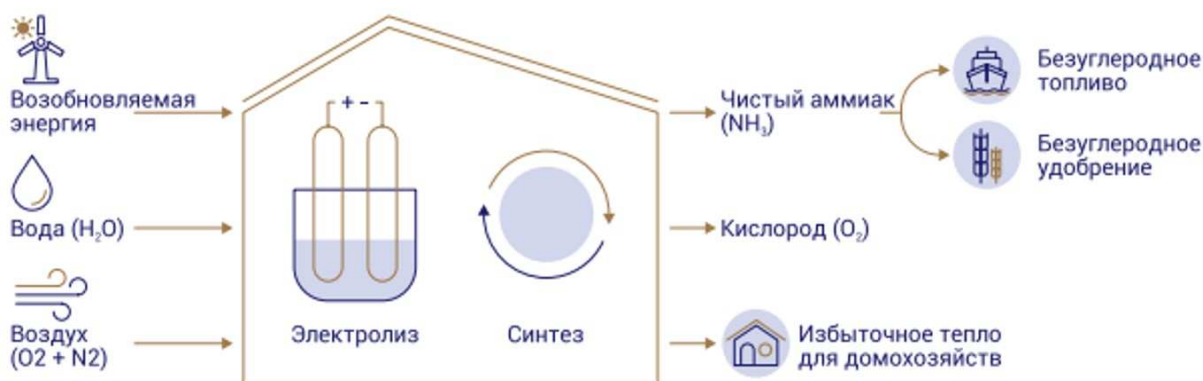


Рис. 3. Производство зеленого аммиака (концепция Power-to-X) [18]

Основным препятствием для широкого распространения «зеленого» водорода является отсутствие экономических технологий его производства.

3. МЕТАНОЛ КАК ТОПЛИВО ДЛЯ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Использование метанола как единственного топлива в двигателях с воспламенением от сжатия затруднительно из-за его низкой способности вступать в реакции окисления. Изучение процессов сгорания смесей дизельного топлива и метанола производилось на четырехтактном дизельном двигателе с прямым впрыском. Доля метанола в смеси достигала 15 %. Было зафиксировано увеличение выбросов NO_x при высоких нагрузках (60 % и более) и снижение выбросов твердых частиц и CO_2 из-за низкого содержания углерода в метаноле, при этом удельный расход топлива также увеличился. Содержание 10 % метанола в смеси метанола и дизельного топлива было признано наиболее рациональным, так как дальнейшее повышение эффективности сгорания могло быть достигнуто только за счет увеличения цетанового числа топлива [11].

В целом использование метанола представляется менее проблематичным с точки зрения безопасности по сравнению с водородом или аммиаком.

Метанол хранится в обычных топливных цистернах, но из-за того, что он имеет низкую температуру вспышки, отделен от машинного помещения коффердамом, а также трубопроводы метанола должны быть заключены в герметичные наружные трубы или каналы [25].

В 2015 г. на верфи Remontova Shipyard (г. Гданьск, Польша) компанией Wärtsilä совместно с компанией Stena Teknik была переоборудована для работы на метаноле энергетическая установка грузопассажирского парома Stena Germanica. Установленное топливное оборудование позволило использовать четыре среднеоборотных двигателя Wärtsilä-Sulzer модели 8ZAL40S в двухтопливном режиме. По результатам замеров при работе главных двигателей судна Stena Germanica на метаноле выбросы оксида серы (SO_x) уменьшились на 99 %, оксида азота (NO_x) — на 60 %, двуоксида углерода (CO_2) — на 25 % и твердых частиц — на 95 % [22].

Производство метанола

Метанол (CH_3OH) — один из ключевых продуктов органической химии, широко применяемый в различных отраслях промышленности. Его получают из метана (CH_4) — основного компонента природного газа, используя различные технологии конверсии. Основными являются три метода.

1. Паровая риформинг-конверсия метана (SMR, steam methane reforming) (рис. 4).

Этот метод является основным промышленным способом получения метанола. Он включает следующие этапы:

1) риформинг: метан взаимодействует с водяным паром при высокой температуре (700–1000 °С) и давлении (20–30 бар) в присутствии никелевого катализатора. Образующийся синтез-газ (смесь CO и H_2) направляется в следующий процесс;

2) конверсия окиси углерода (CO shift reaction): часть монооксида углерода превращается в диоксид углерода. Это увеличивает выход водорода, необходимого для синтеза метанола;

3) синтез метанола: полученный синтез-газ подвергается каталитическому превращению при 50–100 барах и 200–300 °С в присутствии медно-цинкового катализатора.

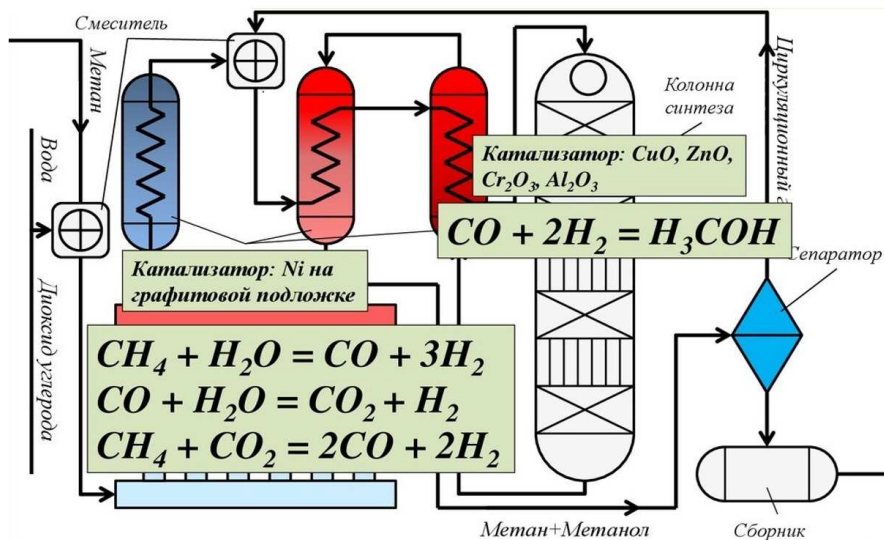


Рис. 4. Производство метанола [23]

2. Прямое окисление метана.

Этот метод находится на стадии научных исследований и опытно-промышленных испытаний. Он включает каталитическое окисление метана кислородом. Главное преимущество метода — сокращение количества промежуточных стадий, но процесс пока менее эффективен по сравнению с традиционной технологией SMR.

3. Биотехнологический метод, основанный на том, что некоторые микроорганизмы (например, метанотрофные бактерии) способны окислять метан в метанол с высокой селективностью. Это перспективное направление для экологически чистого производства, но пока оно требует масштабируемых решений [24].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ альтернативных видов топлива позволил выделить ключевые особенности производства топлив и дальнейшего их использования в чистом виде или в составе смесей с дизельным топливом в двигателях с воспламенением от сжатия с целью замены топлив нефтяного происхождения. Важнейшие теплофизические характеристики альтернативных топлив и результаты проведенного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение основных эксплуатационных характеристик альтернативных видов топлив

Параметр	Альтернативное судовое топливо		
	Водород	Аммиак	Метанол
Содержание углерода (масс. %)	0	0	37,5
Температура кипения при 101,3 кПа (°C)	-253	-33	64,5
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	142	23	20
Объемная плотность энергии (МДж/м ³)	13 (0,1 МПа; 273 К) 5600 (70 МПа; 273 К) 10 000 (сжиженный 20 К)	15 600 (сжиженный 240 К)	16 000 (0,1 МПа; 273 К)
Производство	1. Электролиз воды 2. Получение из природного газа 3. Газификация угля	1. Получение «зеленого» аммиака с использованием возобновляемых источников энергии (концепция Power-to-X). 2. Получение «голубого» аммиака с использованием ископаемых источников энергии	1. Паровая риформинг-конверсия метана 2. Прямое окисление метана 3. Биотехнологический метод
Хранение на судне	В сжатом виде в баллонах при давлении 30–40 МПа или в сжиженном виде при температуре 20 К требует специального оборудования для криогенного хранения и соответствующих мер по контролю рисков	Хранение жидкого аммиака при атмосферном давлении и температуре 240 К в емкостях или в сосудах под давлением 1,8 МПа из углеродисто-марганцевой стали или стали, легированной никелем	Метанол хранится в обычных топливных цистернах, отделенных от машинного помещения коффердамом
Возможность использования существующими судовыми энергетическими установками	Может использоваться ДВС с искровым зажиганием или двухтопливными двигателями с запальным дизельным топливом, требует использования компрессоров и криогенного хранилища	Может использоваться ДВС с искровым зажиганием в сочетании с водородом или двухтопливными двигателями с запальным дизельным топливом	Может использоваться модернизированными ДВС

При сжигании водорода и аммиака в двигателях с воспламенением от сжатия основными проблемами являются высокая температура самовоспламенения и низкая скорость горения, которые приводят к снижению эффективности рабочего процесса. Эти проблемы могут быть решены путем оптимизации параметров впрыска и использования многофазного впрыска. Использование метанола как единственного топлива в двигателях с воспламенением от сжатия затруднительно вследствие его низкой реакционной способности. Наиболее перспективным является использование метанола в качестве компонента смеси с углеводородным топливом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленной информации можно сделать следующие выводы:

1) использование альтернативных видов топлива, таких как водород, аммиак и метанол, в судовых энергетических установках является перспективным направлением снижения углеродного следа морских перевозок, при этом в ряде исследований отмечалось увеличение эмиссии оксидов азота;

2) реальный экологический эффект от перехода на альтернативные виды топлива необходимо оценивать с учетом выбросов в атмосферу вредных веществ не только на этапе использования топлива на судах, но и в процессе добычи сырья для производства топлива и его получения;

3) существующие в настоящее время технологии получения альтернативных топлив требуют значительных энергетических затрат, что исключает экономическую привлекательность их использования;

4) существующие судовые энергетические установки для использования альтернативного топлива требуют модернизации, глубина которой зависит от вида топлива, планируемого к применению;

5) расширение перспектив применения альтернативных топлив возможно за счет продолжения научных исследований, направленных как на совершенствование технологических процессов получения топлив, так и на совершенствование рабочих процессов ДВС, использующих такие топлива, определение оптимальных регулировок систем топливоподачи и наилучших составов топливных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинков А.Н. Анализ способов применения газового топлива в судовых энергетических установках / А.Н. Блинков, А.А. Власов, В.К. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 177–197. — EDN OKELKP.
2. Безюков О.К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О.К. Безюков, В.А. Жуков, О.И. Ященко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 6(28). — С. 31–39. — EDN TDOCEH.
3. Zhukov V.A. Prospects of use gas engines on sea and river vessels / V.A. Zhukov, I.I. Kostylev, A.A. Ivanchenko, O.K. Bezyukov // Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2018, St. Petersburg, 24–28.09.2018. — St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. — P. 287–289. — DOI 10.1109/ITMQIS.2018.8525103. — EDN RVPMBQ.
4. Шурпяк В.К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В.К. Шурпяк, М.С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 29–36. — EDN QYFSKP.
5. Шурпяк В.К. Анализ применения альтернативных видов топлива на судах с классом Регистра / В.К. Шурпяк, М.С. Богданов // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 17–18 февраля 2022 года. — СПб.: СПбГМТУ, 2022. — С. 92–95. — DOI 10.52899/9785883036322_92_95. — EDN TYRFMT.
6. Загрязнение окружающей среды: Три шага к экологичному судоходству. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.nature.com/articles/530275a> (дата обращения 01.10.2025).
7. The International Maritime Organization's initial greenhouse gas strategy. — [Электронный ресурс] URL: https://theicct.org/sites/default/files/publications/IMO_GHG_Strategy_FInal_Policy_Update0_42318.pdf (дата обращения 02.10.2025).
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. Шурпяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 23–34. — EDN WZWOPO.
9. Ерофеев В.Л. Опыт применения и перспективы водородной энергетики на водном транспорте / В.Л. Ерофеев, В.А. Жуков // Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород–Новосибирск–Владивосток–Самара, 23–26 апреля 2024 года. — Н. Новгород: ВГУВТ, 2024. — С. 28. — EDN GGKLIQ.
10. Ерофеев В.Л. Перспективы водородной энергетики в судостроении / В.Л. Ерофеев, Е.В. Ерофеева, В.А. Жуков, В.В. Гаврилов // Судостроение. — 2023. — № 6(871). — С. 33–40. — EDN FPEGRY.
11. Recent advances in sustainable and safe marine engine operation with alternative fuels. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.frontiersin.org/journals/mechanicalengineering/articles/10.3389/fmech.2022.994942/full> (дата обращения 27.03.2026).
12. Белобородов С. С. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества / С.С. Белобородов, Е.Г. Гашо, А.В. Ненашев. — СПб.: Научное издание, 2021. — 151 с.
13. Корнилов С.В. Перспективы развития водородной энергетики и рынка транспортных средств на водородном топливе / С.В. Корнилов, Э.Р. Зверева, А.А. Федорова, И.Ф. Гумеров и др. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — 2022. — Т. 14, № 4(56). — С. 3–18. — EDN SAJDAV.
14. Процессы производства водорода — [Электронный ресурс] URL: <https://lifegaming.ru/photo/protsessiiy-proizvodstva-vodoroda/> (дата обращения 21.11.2025).
15. Водородное топливо: что это такое и как работает. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.petroplus.ru/article/vodorodnoe-toplivo/> (дата обращения 20.11.2025).
16. Водород как топливо и особенности способов его получения. — [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodorod-kak-toplivo-i-osobennosti-sposobov-ego-polucheniya> (дата обращения 20.11.2025).

17. Золотых А.И. Аммиак как альтернативный тип топлива / А.И. Золотых, Д.Н. Гусев, А.И. Епихин, М.Р. Нейжмак // Эксплуатация водного транспорта. — 2022. — № 1. — С. 140–147. — [Электронный ресурс] URL: <https://aumsu.editorum.ru/ru/nauka/article/53904/view> (дата обращения 09.11.2025).
18. Гриффите С. Низкоуглеродное судовое аммиачное топливо / С. Гриффитс, Дж. Уратани. — [Электронный ресурс] URL: <https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2022/4/Stiven-Griffits%2C-Dzhoao-Uratani.pdf?ysclid=m8mp88xueb943794160> (дата обращения 20.10.2025).
19. Viking Energy to be retrofit for ammonia fuel in 2024 // Ammonia Energy Association. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/viking-energy-to-be-retrofit-for-ammonia-fuel-in-2024/> (дата обращения 20.10.2025).
20. Yara and Nel collaborate to reduce electrolyzer costs; announce green ammonia pilot in Norway by 2022 // Ammonia Energy Association. — [Электронный ресурс] URL: www.ammoniaenergy.org/articles/yara-and-nel-collaborate-to-reduce-electrolyzer-costs-announce-green-ammonia-pilot-in-norway-by-2022/ (дата обращения 20.10.2025).
21. В Японии разрабатывают первый в мире буксир с двигателем, работающим на аммиаке // Корабел.ру. — [Электронный ресурс] URL: https://www.korabel.ru/news/comments/v_yaponii_razrabatyvayut_pervuyu_v_mire_buksir_s_dvigatelem_rabotayuschim_na_ammiake.html (дата обращения 20.10.2025).
22. Буянов А.С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А.С. Буянов, О.Н. Леонова, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 91–97.
23. Синтез метилов. — [Электронный ресурс] URL: <https://immunocar.ru/photo/sintez-metilov/35> (дата обращения 21.11.2025).
24. От метана к метанолу: промышленное производство и возможности использования. — [Электронный ресурс] URL: <https://rosstip.ru/news/5145-ot-metana-k-metanolu-promyshlennoe-proizvodstvo-i-vozmozhnosti-ispolzovaniya> (дата обращения 20.11.2025).
25. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2026.
26. Правила классификации и постройки морских судов для перевозки сжиженных газов наливом. Ч. X. Специальные требования / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023.

REFERENCES

1. Blinkov A.N., Vlasov A.A., Shurpyak V.K. Review of gas fuel application for marine propulsion plants. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2011. Issue 34. P. 177–197. EDN OKELKP. (In Russ.)
2. Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Yashchenko O.I. Gas motor fuel in water transport. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S.O. Makarova*. 2014. No. 6(28). P. 31–39. EDN TDOCEH. (In Russ.)
3. Zhukov V.A., Kostylev I.I., Ivanchenko A.A., Bezyukov O.K. Prospects of use gas engines on sea and river vessels. *Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2018, St. Petersburg, 24–28.09.2018*. St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 287–289. DOI 10.1109/ITMQIS.2018.8525103. EDN RVPMBQ.
4. 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.)
5. Shurpyak V.K., Bogdanov M.S. Analysis of the use of alternative fuels on ships with the Register class. *Actual problems of marine energy: Proceedings of the Eleventh international scientific and technical conference*. St. Petersburg, February 17–18, 2022. St. Petersburg: SPbGMTU, 2022. P. 92–95. DOI 10.52899/9785883036322_92_95. EDN TYRFMT.
6. Environmental pollution: Three steps to greener shipping. URL: <https://www.nature.com/articles/530275a> (accessed 01.10.2025) (In Russ.).
7. The International Maritime Organization's initial greenhouse gas strategy. URL: https://theicct.org/sites/default/files/publications/IMO_GHG_Strategy_Final_Policy_Update0_42318.pdf (accessed 02.10.2025).
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. Erofeev V.L., Zhukov V.A. Experience in the application and prospects of hydrogen energy in water transport. *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. 28. EDN GGKLIQ. (In Russ.)
10. Erofeev V.L., Erofeeva E.V., Zhukov V.A., Gavrilov V.V. Prospects of hydrogen energy in shipbuilding. *[Sudostroenie] Shipbuilding*. 2023. No. 6(871). P. 33–40. EDN FPEGRY. (In Russ.)
11. Recent advances in sustainable and safe marine engine operation with alternative fuels. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/mechanicalengineering/articles/10.3389/fmech.2022.994942/full> (accessed 27.03.2026).
12. Beloborodov S.S., Gasho E.G., Nenashev A.V. Renewable energy sources and hydrogen in the energy system: problems and advantages. St. Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii, 2021. 151 p.
13. Kornilov S.V., Zvereva E.R., Fedorova A.A., Gumerov I.F. et al. Prospects for the development of hydrogen energy and the market of hydrogen-fueled vehicles. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2022. Vol. 14, No. 4(56). P. 3–18. EDN SAJDAV. (In Russ.)
14. Protsessy proizvodstva vodoroda [Hydrogen production processes]. URL: <https://lifegaming.ru/photo/protsessiy-proizvodstva-vodoroda/> (accessed 21.11.2025).
15. Vodorodnoe toplivo: chto eto takoe i kak rabotaet [Hydrogen fuel: what it is and how it works]. URL: <https://www.petrolplus.ru/article/vodorodnoe-toplivo/> (accessed 20.11.2025). (In Russ.)
16. Hydrogen as fuel and features of its production methods. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodorod-kak-toplivo-i-osobennosti-sposobov-ego-polucheniya> (accessed 20.11.2025). (In Russ.)
17. Zolotykh A.I., Gusev D.N., Epikhin A.I., Neizhmk M.R. Ammonia as alternative fuel. *Operation of Maritime Transport*. 2022. No. 1. P. 140–147. URL: <https://aumsu.editorum.ru/ru/nauka/article/53904/view> (accessed 09.11.2025).
18. Griffiths S., Uratani J. Zero and low-carbon ammonia shipping fuel. URL: <https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2022/4/Steven-Griffiths%2C-Joao-Uratani.pdf> (accessed 09.11.2025).
19. Viking Energy to be retrofit for ammonia fuel in 2024. *Ammonia Energy Association*. URL: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/viking-energy-to-be-retrofit-for-ammonia-fuel-in-2024/> (accessed 20.10.2025).

20. Yara and Nel collaborate to reduce electrolyzer costs; announce green ammonia pilot in Norway by 2022. *Ammonia Energy Association*. URL: www.ammoniaenergy.org/articles/yara-and-nel-collaborate-to-reduce-electrolyzer-costs-announce-green-ammonia-pilot-in-norway-by-2022/ (accessed 20.10.2025).
21. V Yaponii razrabatyvayut pervyi v mire buksir s dvigatelem, rabotayushchim na ammiake [Japan is developing the world's first tugboat with an engine running on ammonia]. *Korabel.ru*. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/v_yaponii_razrabatyvayut_pervyy_v_mire_buksir_s_dvigatелем_rabotayushchim_na_ammiake.html (accessed 20.10.2025).
22. Buyanov A.S., Leonova O.N., Reutsky A.S. Methanol and ethanol as ship fuel: analysis of application experience. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 91–97. (In Russ.)
23. Sintez metilov [Synthesis of methyls]. URL: <https://immunocap.ru/photo/sintez-metilov/35> (accessed 11.21.2025).
24. Ot metana k metanolu: promyshlennoe proizvodstvo i vozmozhnosti ispol'zovaniya [From methane to methanol: industrial production and utilization possibilities]. URL: <https://rosstip.ru/news/5145-ot-metana-k-metanolu-promyshlennoe-proizvodstvo-i-vozmozhnosti-ispolzovaniya> (accessed 20.11.2025).
25. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVII: Distinguishing marks and descriptive notations in the class notation specifying structural and operation particulars of ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2026.
26. Rules for the Classification and Construction of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. Part X: Special requirements / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026.

Принята к публикации 16.02.2026.

УДК 621.74:624.012
EDN WTUWUF

К РАСЧЕТУ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ РУЛЕЙ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ НАГРУЗОК

А.П. Аносов, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

В.О. Бессонова, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Приморский край, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: bessonchik99@gmail.com

Предложена методика приближенного определения необходимых для расчета прочности судового руля нагрузок, действующих на элементы составного руля изменяемого профиля, оборудованного, пользуясь авиационной терминологией, механизацией — предкрылком и закрылком. По литературным данным выполнен анализ влияния различных вариантов механизации на основные гидродинамические характеристики руля. Показано, что наиболее эффективным является трехзвенный руль, оборудованный предкрылком и закрылком. Методика предполагает расчет нагрузок на конструктивные элементы трехзвенного руля на основе результатов продувки руля, оборудованного только закрылком. Представлены формулы для определения сил и соответствующих им гидродинамических коэффициентов.

Ключевые слова: рули изменяемого профиля, гидродинамические силы, расчет прочности рулей.

Для цитирования: Аносов А.П. К расчету прочности элементов рулей изменяемого профиля. Определение расчетных нагрузок / А.П. Аносов, В.О. Бессонова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 171–178. — EDN WTUWUF.

TO CALCULATE THE STRENGTH OF THE STEERING ELEMENTS OF A VARIABLE PROFILE. DETERMINATION OF DESIGN

A.P. Anosov, DSc, Professor, Far Eastern Federal University, 690922, Russia, Vladivostok, Russkii Island, Ajax Bay, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

V.O. Bessonova, PhD student, Far Eastern Federal University, 690922, Russia, Vladivostok, Russkii Island, Ajax Bay, 10, e-mail: bessonchik99@gmail.com

A method is proposed for the approximate determination of the loads necessary to calculate the strength of a ship's rudder acting on the elements of a composite variable-profile rudder equipped, using aviation terminology, with a slat and flap. According to the literature data, the influence of various mechanization options on the main hydrodynamic characteristics of the steering wheel is analyzed. It is shown that a three-link steering wheel equipped with a slat and flap is the most effective. The technique involves calculating the loads on the structural elements of a three-link rudder based on the results of purging a rudder equipped only with a flap. Formulas for determining forces and their corresponding hydrodynamic coefficients are presented.

Keywords: variable profile rudders, hydrodynamic forces, calculation of rudder strength.

For citation: Anosov A.P., Bessonova V.O. To calculate the strength of the steering elements of a variable profile. Determination of design. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 171–178. EDN WTUWUF. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Рули изменяемого профиля, то есть снабженные, пользуясь авиационной терминологией, «механизацией», а именно управляемыми закрылками, находят все более широкое применение благодаря их высокой эффективности. Закрылками могут быть снабжены не только рули, но и насадки. Некоторые из них, взятые из интернет-ресурсов, показаны на рис. 1.

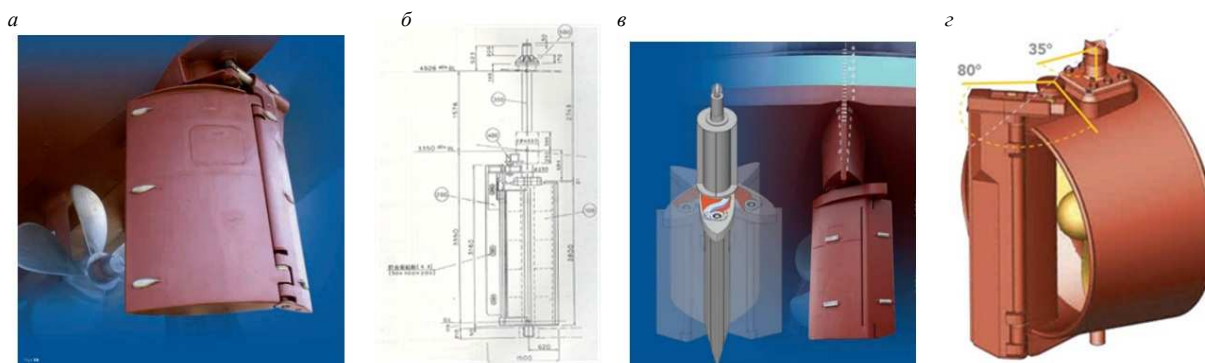


Рис. 1. Рули и насадка с управляемым закрылком:

а — руль Becker; б — руль японской раболовной шхуны; в — руль Hercules; з — поворотная насадка

Эти и другие рисунки, а также приводимые в ряде публикаций графики, касающиеся гидродинамических характеристик, носят чисто иллюстративный характер и не могут быть использованы при конструировании таких устройств. Таким образом, информации, пригодной к практическому использованию при проектировании судовых рулей изменяемого профиля, в доступных публикациях нет. Исключение составляют работы [1, 2], в которых в числе прочего рассматриваются бортовые рули с управляемыми закрылками, используемые в качестве успокоителей качки.

В то же время российская компания «Индеко Марин» по производству и поставке судового оборудования наладила производство рулей системы Becker для обеспечения судостроительных отраслей РФ и стран СНГ.

В Департаменте морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ в период 2014–2024 гг. разработано несколько конструкций рулей изменяемого профиля, защищенных патентами на изобретения и полезные модели, например [3–5], часть из которых, кроме отклоняемого закрылка, включает отклоняемый предкрылок (в авиационной терминологии «отклоняемый носок»), что дополнительно повышает эффективность руля.

В качестве устройств для осуществления синхронного поворота предкрылка и закрылка на углы, оптимальные при любом угле перекладки руля, используются, главным образом, различные конструктивные варианты зубчатых передач (рис. 2б) [4] и рычажных механизмов (рис. 2з) [5]. Во всех представленных вариантах конструкций рулей дополнительные, кроме рулевой машины, приводы поворота предкрылка и закрылка не требуются.

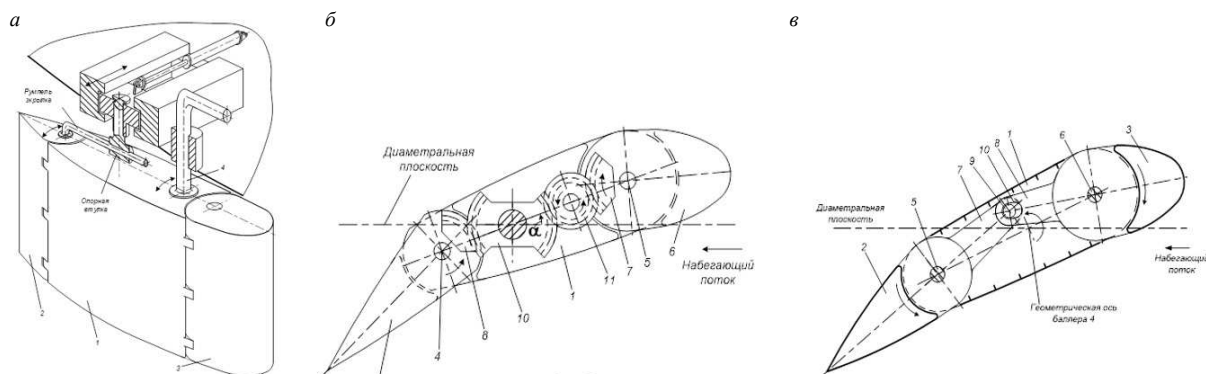


Рис. 2. Руль с предкрылком и закрылком: общий вид (а) [3]; зубчатый (б) [4] и рычажный (в) [5] приводы синхронного поворота предкрылка и закрылка

Из имеющихся публикаций следует упомянуть техническое решение для пера руля с закрылками, защищенное патентом на изобретение [6]. Вопросы проектирования рулевых устройств, выбора геометрических характеристик рулей и управляемости судов рассматриваются в многочисленных работах, например [7–9].

Рули изменяемого профиля судов ледового плавания и их конструктивная противоледовая защита рассмотрены в работах [10, 11].

Несколько новых конструктивных решений, касающихся механизма синхронного поворота элементов составного трехзвенного руля — основной части, предкрылка и закрылка, приведены в работе [12].

В правилах Российского морского регистра судоходства [13], в главе, посвященной рулевым устройствам, отсутствуют требования, регламентирующие конструкцию и прочность элементов рулей изменяемого профиля, при очевидной необходимости таких требований. Они должны стать дополнением к существующим правилам расчета рулей неизменяемой геометрии и включать требования по определению расчетных нагрузок, методику расчета элементов составного руля и приводных механизмов. Сложившаяся ситуация свидетельствует об актуальности исследований и технических разработок в области рулей изменяемого профиля.

Целью данной работы является рассмотрение некоторых аспектов определения расчетных нагрузок, действующих на конструктивные элементы составного руля изменяемого профиля.

АЭРО- И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РУЛИ И КРЫЛЬЯ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ

Источником наиболее адекватных сведений об аэро- и гидродинамических характеристиках крыльев и рулей является физический эксперимент — продувка моделей или натуральных объектов в аэродинамических трубах. Однако необходимым для подобных экспериментов дорогостоящим оборудованием обладают единицы научных центров. Альтернативным источником такого рода информации являются численные методы расчета [14].

Подавляющее большинство опубликованных результатов исследований в этой области относится к авиационным крыльям и рулям (например, [15]). Заметим, что основные коэффициенты, определяющие силовые характеристики крыльев и рулей, не зависят от обтекающей их среды, а связаны лишь с геометрическими параметрами профилей. Таким образом, гидродинамические коэффициенты судовых рулей могут быть получены по результатам их продувки в аэродинамических трубах. При этом существуют определенные ограничения. При высоких скоростях воздуха начинает сказываться его сжимаемость, то есть меняется плотность среды, и проявляются термодинамические эффекты. Результаты таких экспериментов неприменимы к судовым рулям. В свою очередь, в аэродинамических трубах нельзя оценить эффекты, возникающие при кавитации судовых рулей. Такие испытания проводятся в кавитационных трубах в жидкой среде.

На рис. 3 представлены графики, которые дают качественное представление об эффективности различных вариантов конфигурации крыльев, снабженных механизацией — закрылками и предкрылками.

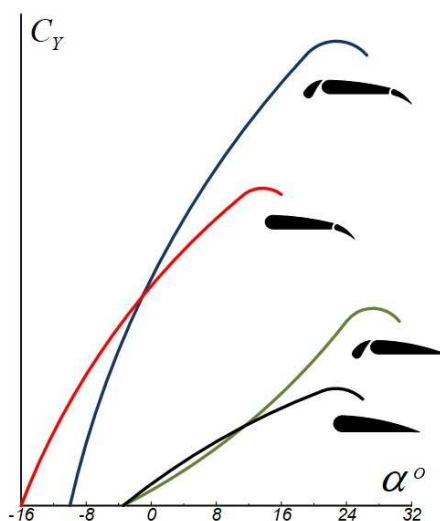


Рис. 3. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки при выпуске механизации крыла

Если расположить рули в последовательности, соответствующей возрастанию подъемной силы, то получится следующий ряд: крыло без механизации, крыло с предкрылком, крыло с закрылком, крыло с закрылком и предкрылком. При этом крыло только с предкрылком обладает наибольшим критическим углом атаки, а у крыла только с закрылком он наименьший. У крыла с полной механизацией (закрылок + предкрылок) критический угол атаки несколько меньше максимального. У крыла с полной механизацией коэффициент подъемной силы приблизительно в 1,5 раза больше, чем у крыла с закрылком, и в 2–3 раза больше, чем у немеханизированного крыла. Из сказанного следует, что наиболее эффективным является крыло, оборудованное предкрылком и закрылком. Точные данные по аэродинамическим коэффициентам, полученные в результате продувок, опубликованы в специальных атласах.

Для более точной количественной оценки влияния закрылков и предкрылков на аэродинамические характеристики крыла были использованы после соответствующей обработки результаты продувки моделей авиационных крыльев в ЦАГИ [15]. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены аэродинамические коэффициенты для крыла с закрылком и предкрылком.

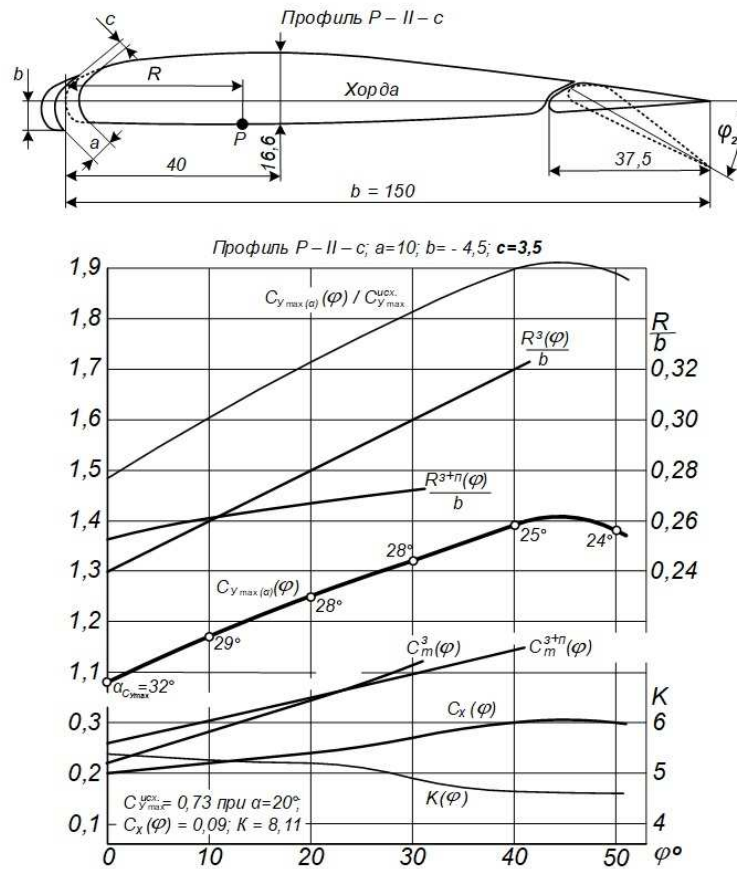


Рис. 4. Основные аэродинамические характеристики профиля P-II-c с закрылком и предкрылком щелевого типа, соответствующие максимальным значениям $C_{y_{max}(\alpha)}(\varphi)$ (критические углы атаки показаны в градусах), в зависимости от угла отклонения закрылка φ_2 [15]

Для более точной количественной оценки влияния закрылков и предкрылков на аэродинамические характеристики крыла были после соответствующей обработки использованы результаты продувки моделей авиационных крыльев в ЦАГИ [15]. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены аэродинамические коэффициенты для крыла с закрылком и предкрылком.

Однако автоматически перенести результаты продувки авиационных крыльев на судовые рули нельзя по ряду причин.

1. Крылья, в отличие от рулей, имеют асимметричные относительно хорды профили.
2. У крыльев существенно большие, чем у рулей, удлинения.
3. Результаты продувки относятся к крыльям, оборудованным выдвижными щелевыми предкрылками, применение которых на судовых рулях представляется проблематичным.

Дело в том, что авиационное крыло и его механизация, а также крыльевая система судна на подводных крыльях должны создавать подъемную силу в одном направлении и поэтому предполагают наиболее эффективную для этого геометрическую асимметрию. А руль управления должен быть одинаково эффективен в обоих направлениях. Кроме того, трудно обеспечить прочность щелевого предкрылка и его привода, которыми оборудовано крыло самолета, в условиях, в которых работают судовые рули.

В связи с этим судовой руль следует оборудовать предкрылком поворотного типа («отклоняемый носок»), обладающим необходимой прочностью при столкновениях с плавающими посторонними предметами и льдом и имеющим надежное шарнирное соединение с основной частью руля и достаточно прочный механизм привода. Результаты продувки судовых рулей такого профиля нами не найдено.

В монографии [1], посвященной динамическим успокоителям качки — бортовым рулям, наряду с цельными рассматриваются рули с подвижными закрылками. Приведены результаты продувки таких рулей профиля $NACA-0021$ при удлинениях, характерных для судовых рулей, $\lambda = 1,2; 1,6; 2$. Получены основные гидродинамические коэффициенты C_Y , C_X и C_M не только для руля в целом, но и отдельно для закрылка. Коэффициент момента для закрылка определен относительно шарнира, соединяющего его с основной частью руля. На рис. 5 приведены зависимости основных аэродинамических характеристик от угла отклонения закрылка φ при максимальных значениях коэффициента подъемной силы, соответствующих критическим углам атаки α , и трех различных удлинениях λ . Для сравнения представлены перечисленные зависимости для авиационного крыла профиля Р-11-а по данным ЦАГИ [15].

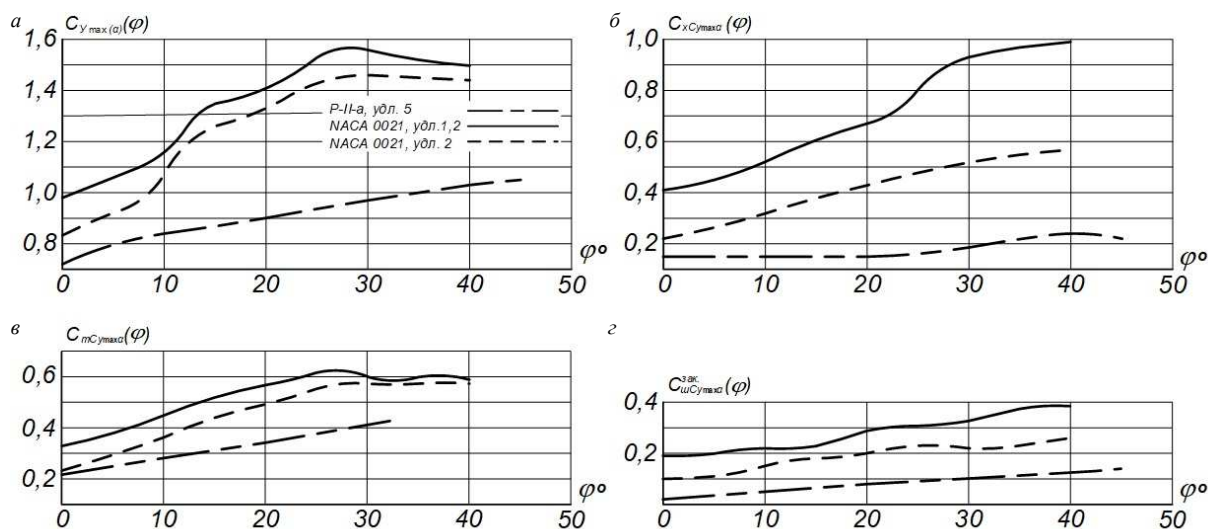


Рис. 5. Коэффициенты подъемной силы (а), лобового сопротивления (б) и момента (в) для руля в целом и коэффициент момента относительно шарнира (г) для закрылка [1, 15]

Для получения представленных зависимостей была выполнена дополнительная обработка экспериментальных данных в контексте данной работы. Конечной целью исследования является определение расчетных нагрузок, в качестве которых при расчетах прочности принимаются их максимальные значения, возникающие в процессе эксплуатации. Поскольку наибольшей из составляющих суммарной нагрузки P является подъемная сила P_Y , в качестве расчетного коэффициента подъемной силы принято его максимальное в зависимости от угла атаки руля и угла отклонения закрылка значение, а именно $C_{Y_{max}} = f(\alpha_{кр}, \varphi_{кр})$, и соответствующие значения коэффициентов C_X и C_M .

Например, для руля с закрылком рекомендуемой в литературе относительной шириной $b_2/(b=0,25)$ и удлинием $\lambda=2$ критический угол атаки составил $\alpha_{кр} = 30^\circ$ при критическом угле отклонения закрылка $\varphi_{2кр} = 25^\circ$.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭЛЕМЕНТЫ РУЛЯ С ЗАКРЫЛКОМ И ПРЕДКРЫЛКОМ ПОВОРОТНОГО ТИПА

Для расчета прочности руля в целом и связанных с ним механизмов необходимы, в конечном итоге, суммарная сила P и момент на баллере M , а также точка приложения силы P (центр давления), положение которой определяется ее удалением от передней кромки руля R . Эти параметры могут быть легко вычислены, если известны подъемная сила P_Y , лобовое сопротивление P_X и момент сил M относительно передней кромки руля, которые измеряют при продувке руля.

Для расчетов прочности подвижных элементов составного руля — закрылка и предкрылка, а также их приводов — необходимы суммарные гидродинамические силы P_i и гидродинамические моменты M_i , которые действуют на каждый из них в отдельности, и положение соответствующих центров давления. В отличие от руля в целом, моменты M_i определяются относительно шарниров, которые соединяют закрылок и предкрылок с основной частью руля.

В виду отсутствия экспериментальных данных по нагрузкам, действующим на поворотный предкрылок, применим используемый в [1, 2] приближенный, но достаточно точный для инженерных расчетов характер распределения суммарной для всего руля нормальной силы между его составными частями. В этой же работе приведен атлас результатов продувки судовых рулей профиля NACA 0021 с закрылком, которыми можно воспользоваться для решения поставленной задачи. Приняты следующие допущения.

1. По ширине каждого элемента составного руля давление воды распределено по закону треугольника, следовательно, центр давления расположен на расстоянии одной трети ширины элемента от его передней кромки (рис. 6, справа).

2. Сила трения мала, то есть тангенциальные силы пренебрежимо малы по сравнению с нормальными силами и потому в расчетах приняты равными нулю.

3. Руль при угле атаки α и углах отклонения предкрылка φ_1 и закрылка φ_2 , соответствующих максимальной величине подъемной силы, рассматривается как сплошное крыло вогнутого профиля (рис. 6, слева).

Исходными данными являются измеряемые и вычисляемые по результатам продувки (приведены в Атласе для профиля NACA 0021 [1]):

P_Y — подъемная сила всего руля;

P_X — его лобовое сопротивление;

M — гидродинамический момент;

M_2 — момент, действующий на закрылок относительно его шарнира;

по этим данным могут быть вычислены:

$P_N = \sqrt{P_Y^2 + P_X^2} \approx P$ — нормальная сила для всего руля, приблизительно равная суммарной силе P , действующей на руль;

$R = M/P_N = M/\sqrt{P_Y^2 + P_X^2}$ — положение центра давления по ширине профиля.

На рис. 6 приведены расчетная схема составного руля и распределение давления по ширине его элементов.

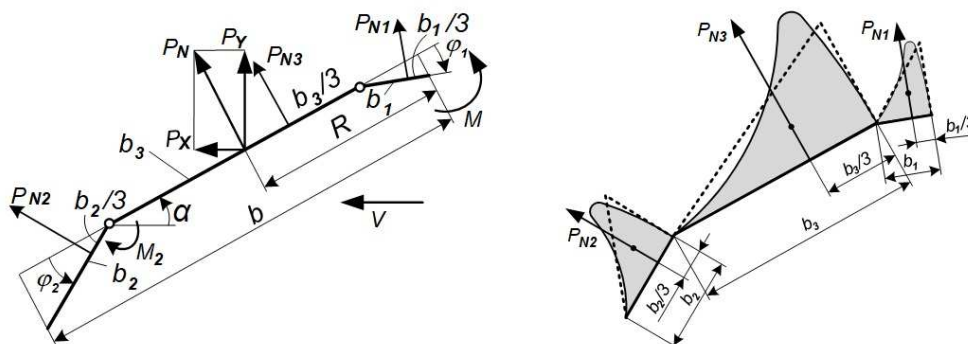


Рис. 6. Расчетная схема составного руля (слева) и распределение давления по ширине его элементов (справа)

Исходными данными являются:

1) $P_N = \sqrt{P_Y^2 + P_X^2}$ — суммарная нормальная сила. В этой формуле P_Y — подъемная сила руля в целом, P_X — его лобовое сопротивление, определяемые при продувке;

2) $M = P_N R$ — действующий на руль суммарный момент, измеряемый при продувке; здесь R — отстояние центра давления руля от его передней кромки;

3) $M_2 = P_{N2} \cdot b_2/3$ — действующий на закрылок момент, измеряемый при продувке; здесь P_{N2} — действующая на закрылок нормальная сила, b_2 — ширина закрылка.

Задача рассматривается в статической постановке. В соответствии с расчетной схемой (рис. 6, слева) уравнения равновесия имеют вид

$$\sum P_{Ni} = 0; P_{N1} \cos \varphi_1 + P_{N3} + P_{N2} \cos \varphi_2 = P_N, \quad (1)$$

$$\sum M_i = 0; P_{N1}(b_1/3) \cdot \cos^2 \varphi_1 + P_{N3}((b_3/3) + b_1 \cos \varphi_1) + P_{N2} \cos \varphi_2 (b_3 + b_1 \cos \varphi_1 + (b_2/3) \cos \varphi_2) = P_N R. \quad (2)$$

После подстановки заданных и предварительно вычисленных по результатам продувки величин получим систему двух алгебраических уравнений относительно неизвестных P_{N1} и P_{N3} . Решая систему уравнений, определим силы, действующие на предкрылок и основную часть руля соответственно,

$$P_{N1} = \frac{P_N((b_3/3) + b_1 \cos \varphi_1 - R) + P_{N2} \cos \varphi_2 ((2/3)b_3 + (b_2/3) \cos \varphi_2)}{\cos \varphi_1 (b_3/3 + (2/3)b_1 \cos \varphi_1)}, \quad (3)$$

$$P_{N3} = \frac{P_N(R - (b_1/3) \cos \varphi_1) - P_{N2} \cos \varphi_2 ((2/3)b_1 \cos \varphi_1 + b_3 + (b_2/3) \cos \varphi_2)}{b_3/3 + (2/3)b_1 \cos \varphi_1}. \quad (4)$$

Что касается силы P_{N2} , приложенной к закрылку, то, принимая во внимание, что измеренный момент для закрылка относительно его шарнира $M_2 = P_{N2} b_2/3$, можно записать $P_{N2} = 3M_2/b_2$. Тогда после подстановки этого выражения для P_{N2} в зависимости (3) и (4) они примут вид

$$P_{N1} = \frac{P_N(b_3/3 + b_1 \cos \varphi_1 - R) + (3M_2/b_2) \cos \varphi_2 ((2/3)b_3 + (b_2/3) \cos \varphi_2)}{\cos \varphi_1 (b_3/3 + (2/3)b_1 \cos \varphi_1)}, \quad (5)$$

$$P_{N3} = \frac{P_N(R - (b_1/3) \cos \varphi_1) - (3M_2/b_2) \cos \varphi_2 ((2/3)b_1 \cos \varphi_1 + b_3 + (b_2/3) \cos \varphi_2)}{b_3/3 + (2/3)b_1 \cos \varphi_1}. \quad (6)$$

Разделив выражения (5) и (6) на $\rho V^2 l/2$ и учитывая, что $C_{M2}(\rho V^2 S/2)b_2 = C_{N2}(\rho V^2 S/2)(b_2/3)$, то есть $C_{N2} = 3C_{M2}$, получим формулы для определения соответствующих гидродинамических коэффициентов

$$C_{N1} = \frac{C_M(b_3/3 + b_1 \cos \varphi_1 - R)(b_1 \cos \varphi_1 + b_3 + b_2 \cos \varphi_2) + 3C_{M2} b_2 \cos \varphi_2 ((2/3)b_3 + (b_2/3) \cos \varphi_2)}{b_1 \cos \varphi_1 (b_3/3 + (2/3)b_1 \cos \varphi_1)}, \quad (7)$$

$$C_{N3} = \frac{C_M(R - (b_1/3) \cos \varphi_1)(b_1 \cos \varphi_1 + b_3 + b_2 \cos \varphi_2) - 3C_{M2} b_2 \cos \varphi_2 ((2/3)b_1 \cos \varphi_1 + b_3 + (b_2/3) \cos \varphi_2)}{b_3(b_3/3 + (2/3)b_1 \cos \varphi_1)}. \quad (8)$$

С учетом допущения 2 искомые расчетные суммарные силы, действующие на закрылок и предкрылок, $P_i \approx P_{Ni}$. При этом расчетные моменты в шарнирах с учетом допущения 1 определяются по формуле $M_i \approx P_{Ni} b_i/3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика приближенного определения расчетных нагрузок, действующих на конструктивные элементы составного руля, оборудованного предкрылком и закрылком, может служить основой раздела инженерной методики расчетного проектирования рулей изменяемого профиля. Оценка адекватности методики и, при необходимости, ее уточнение нуждаются в экспериментальной проверке полученных зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмырев А.Н. Успокоители качки судов / А.Н. Шмырев, В.А. Мореншильд, С.Г. Ильина. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 516 с.
2. Чекризов Г.В. Справочник по успокоителям качки с бортовыми рулями / Г.В. Чекризов, М.С. Темкин, В.О. Воробьев. — Л.: Судостроение, 1979. — 255 с.
3. Патент на изобретение № 2721804. Судовое рулевое устройство: заявл. 13.11.2019, опубл. 22.05.2020, БИ № 15, / А.П. Аносов, Н.И. Восковчук, Д.В. Козырев; патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». — 12 с.
4. Патент на полезную модель № 153733. Судовое рулевое устройство: заявл. 22.01.2015, опубл. 27.07.2016, БИ № 21 / А.П. Аносов, О.С. Шаринкова, А.П. Герман; патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». — 7 с.
5. Патент на изобретение № 2592706. Судовое рулевое устройство: заявл. 09.07.2015, опубл. 27.07.2016, БИ № 21 / А.П. Аносов, О.С. Шаринкова, А.П. Герман; патентообладатель ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». — 9 с.
6. Патент на изобретение № 2130856. Рулевое устройство судна: заявл. 17.03.1998, опубл. 27.05.1999 / А.А. Кеслер; патентообладатель А.А. Кеслер. — 6 с.
7. Плотников К.В. Выбор типа и геометрических характеристик судовых рулей: анализ современных проектных решений / К.В. Плотников, Д.С. Долгов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 1, ч. 1(59). — С. 38–50.
8. Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов и др. — Л.: Судостроение, 1973. — 512 с.
9. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справочник. — Л.: Судостроение, 1988. — 360 с.
10. Шаринкова О.С. Сравнительная оценка гидродинамических характеристик руля изменяемого профиля в составе винторулевого комплекса судна ледового класса / О.С. Шаринкова, А.П. Аносов, И.А. Новосельцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 66/67. — С. 49–57. — EDN GELNOD.
11. Шаринкова О.С. Противоледовая конструктивная защита винторулевого комплекса судов ледового плавания: дисс. ... канд. техн. наук / О.С. Шаринкова; ДВФУ. — Владивосток, 2022.
12. Бессонова В.О. Новые конструкции рулей изменяемого профиля и техническое решение, повышающее их эффективность / В.О. Бессонова, А.П. Аносов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 50–63. — EDN CREIVW.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Часть III. Устройства, оборудование и снабжение. Глава 2. Рулевое устройство / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2025.
14. Румянцев А.Г. Расчетно-экспериментальное исследование обтекания механизированных профилей / А.Г. Румянцев, В.А. Силантьев // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 2. — С. 291–306.
15. Красильщиков П.П. Влияние длины закрылка и предкрылка на работу разрезного крыла / П.П. Красильщиков. — М.; Л.: Гос. авиационное и автотракторное изд-во, 1932. — 57 с. — (Труды ЦАГИ. Вып. 133.)

REFERENCES

1. Shmyrev A.N., Morenschild V.A., Ilyina S.G. Uspokoiteli kachki sudov [Calming agents for pitching ships]. Leningrad: Sudpromgiz, 1961. 516 p.
2. Chekrizov G.V., Temkin M.S., Vorobyev V.O. Spravochnik po uspokoitelyam kachki s bortovymi rulyami [Handbook of pitching dampers with side rudders]. Leningrad: Sudostroenie, 1979. 255 p.
3. Patent for invention No. 2721804. Ship steering gear: appl. 13.11.2019, publ. on 22.05.2020, bul. No. 15 / A.P. Anosov, N.I. Voskovchuk, D.V. Kozyrev; patentee Far Eastern Federal University. 12 p.
4. Patent for a utility model No. 153733. Ship steering device: appl. 22.01.2015, publ. on 27.07.2016, bul. No. 21 / A.P. Anosov, O.S. Sharinkova, A.P. German; patentee Far Eastern Federal University. 7 p.
5. Patent for invention No. 2592706. Ship steering gear: appl. 09.07.2015, publ. on 27.07.2016, bul. No. 21 / A.P. Anosov, O.S. Sharinkova, A.P. German; patentee Far Eastern Federal University. 9 p.
6. Patent for invention No. 2130856. Steering device of the vessel: appl. 17.03.1998, publ. on 27.05.1999 / A.A. Kesler; patentee A.A. Kesler. 6 p.
7. Plotnikov K.V., Dolgov D.S. The type and geometry of ship rudders choosing: the analysis of current designs. *Marine Intellectual Technologies*. 2023. No. 1, part 1(59). P. 38–50. (In Russ.)
8. Spravochnik po teorii korablya. Sudovye dvizhiteli i upravlyаемost' [Handbook of ship theory. Ship propulsion and controllability] / Ya.I. Voitkunsky, R.Ya. Pershits, I.A. Titov et al. Leningrad: Sudostroenie, 1973. 512 p.
9. Hoffman A.D. Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovaniye sudna [Propulsion and steering system and ship maneuvering: handbook]. Leningrad: Sudostroenie, 1988. 360 p.
10. Sharinkova O.S., Anosov A.P., Novoseltsev I.A. Comparative evaluation of hydrodynamic characteristics of variable profile rudder as a part of ice class ship propulsion complex. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2022. No.66/67. P. 49–57. (In Russ.)
11. Sharinkova O.S. Protivoleodovaya konstruktivnaya zashchita vintorulevogo kompleksa sudov ledovogo plavaniya [Anti-ice structural protection of the rotorcraft complex of ships ice swimming: PhD thesis] / Far Eastern Federal University. Vladivostok, 2022.
12. Bessonova V.O., Anosov A.P. The new construction of the variable profile rudders and a technical solution for increasing efficiency. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 50–63. (In Russ.)
13. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part III. Equipment, arrangement and outfit. Chapter 2. Rudder and steering gear / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
14. Rumyantsev A.G., Silantsev V.A. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie obtekaniya mekhanizirovannykh profilei [Computational and experimental study of the flow of mechanized profiles]. *Teplofizika i aeromekhanika [Thermophysics and Aeromechanics]*. 2010. Vol. 17, No. 2. P. 291–306.
15. Krasilshchikov P.P. Vliyaniye dliny zakrylka i predkrylka na rabotu razreznogo kryla [The influence of the length of the flap and slat on the operation of the split wing]. Moscow; Leningrad: State Aviation and Automotive Publishing House, 1932. 57 p. (Transactions of the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Issue 133.)

Статья поступила в редакцию 01.12.2025.

Принята к публикации 16.02.2026.

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.5 Общие требования к оформлению материалов.

1.5.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.5.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилия, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел.;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziologia [Neurophysiology]*. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed on 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MG TU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebanii v inzhernom 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 rashkoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

- цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

- краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;

- обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

- использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

- выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация – книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовки, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (kuteynikov.ma@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят процедуру двойного слепого рецензирования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtп.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>
<https://cdo.smolgu.ru>

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

Научное издание

**Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства
Том 56, № 1**

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

Подписано в печать 16.04.2026. Дата выхода в свет 16.04.2026. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 21,39. Уч.-изд.л.: 12,5. Тираж 200. Свободная цена. Заказ № 147

Учредитель и издатель: Российский морской регистр судоходства
191186, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А
www.rs-class.org/ru/

Отпечатано на полиграфической базе Российского морского регистра судоходства
191186, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А