

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

СУДОВЫЕ АММИАЧНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

АВТОНОМНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ИННОВАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

О МЕМБРАННЫХ СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА



№ 77
декабрь
2024

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 77, 2024

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

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.А. Кутейников

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

ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Электронная версия журнала доступна по адресу:

www.rs-class.org.

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

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

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

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

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 77, 2024

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor-in-Chief

Mikhail Kuteynikov

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

ISSN 2223-7097

Editorial board

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

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

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

Andrey Grigoriev — Candidate of Technical Science, Admiral

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

Alexey Ilin — Doctor of Technical Science, associate professor, Deputy General Director and Head of Research and Production Complex, NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

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

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

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

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

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

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

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

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

Subscription index is 80534 in Ural-press catalog.

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

www.rs-class.org.

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

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

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

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 77

RESEARCH BULLETIN BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

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

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

Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

2.5.18 – Проектирование и конструкция судов

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

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

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

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

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

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

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

2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics

2.5.18 – Design and construction of ships

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

2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург
2024



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

<i>Таровик В.И., Калью В.А., Серов А.А.</i> Проект Программы выполнения системных исследований и регламентации техногенного подводного шума объектов морской техники.	4
<i>V.I. Tarovik, V.A. Kalyu, A.A. Serov</i> Draft Program of systemic research and reglamentation of technogenic underwater noise of marine objects	
<i>Шурпяк В.К., Семионичев Д.С., Реуцкий А.С., Михеева А.А.</i> Использование формализованной оценки безопасности для судовых аммиачных холодильных установок.	14
<i>V.K. Shurpyak, D.S. Semionichev, A.S. Reutskii, A.A. Mikheeva</i> The use of a formalized safety assessment for marine ammonia refrigeration units	
<i>Толмачев С.А., Серов А.А., Михеева А.А., Семионичев Д.С., Реуцкий А.С.</i> Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (СИ) и предлагаемые подходы к их совершенствованию	24
<i>S.A. Tolmachev, A.A. Serov, A.A. Mikheeva, D.S. Semionichev, A.S. Reutskii</i> Consequences of applying MARPOL requirements to operational carbon intensity (CII) and approaches for their improvement	

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

<i>Чернов О.А.</i> Внедрение механизма постоянного мониторинга в Системе проверки государств-членов ИМО (IMSAS).	33
<i>O.A. Chernov</i> Introduction of continuous monitoring mechanism in the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS)	

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

<i>Носков В.В., Горбань Н.Н., Большев А.С., Фролов С.А.</i> Анализ усталостной прочности якорной системы удержания морских плавучих одноточечных причалов методами полновероятностного математического моделирования.	41
<i>V.V. Noskov, N.N. Gorban, A.S. Bolshev, S.A. Frolov</i> Analysis of the fatigue strength of the anchor mooring system of floating single-point moorings by methods of full-probability mathematical modeling	
<i>Семенова В.Ю., Динцер А.И.</i> Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на наклоненные шпангоутные контура	51
<i>V.Yu. Semenova, A.I. Dintser</i> Calculation of second-order non-linear diffraction forces acting on heeled frame sections	

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

<i>Ватолин Д.С.</i> Ретроспективный анализ развития судовых мембранных систем хранения сжиженного природного газа	62
<i>D.S. Vatolin</i> A retrospective analysis of the development of marine membrane cargo containment systems for liquefied natural gas	

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА MATERIALS AND WELDING

- Алифиренко Е.А., Никулин В.Е., Демченко А.Е., Барахтина Н.Н., Кордонец С.М., Кучапов А.В.*
Требования Регистра к технологии сварки трением с перемешиванием судовых конструкций 70
- E.A. Alifirenko, V.E. Nikulin, A.E. Demchenko, N.N. Barakhtina, S.M. Kordonets, A.V. Kuchapov*
Register requirements for friction stir welding of ship structures

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ DESIGN OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

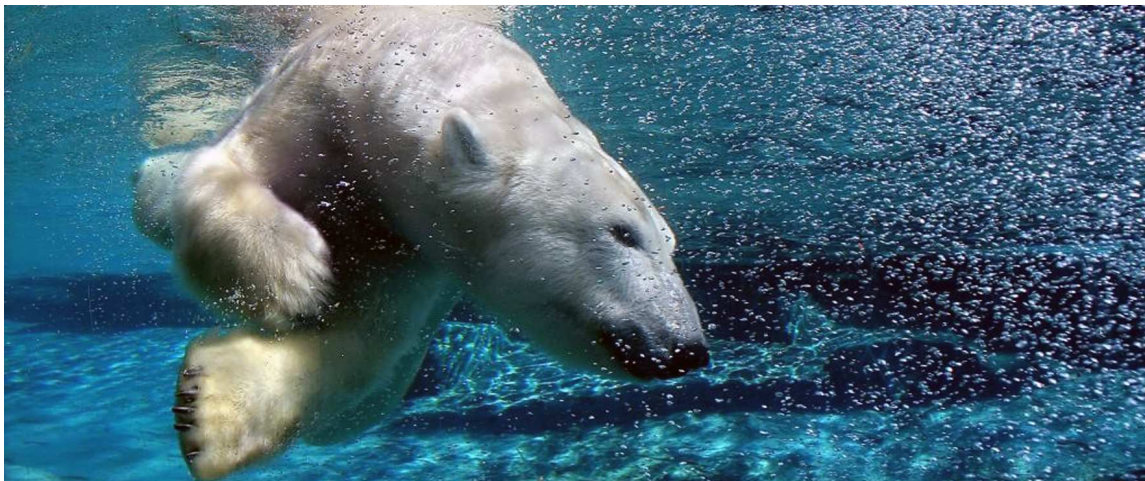
- Суслов А.Н., Одегова О.В., Сафронов Д.В.* Формирование помещений в системах автоматизированного проектирования судна 80
- A.N. Suslov, O.V. Odegova, D.V. Safronov* Approaches for compartments modeling in ship CAD software
- Судаков А.В., Чеснокова И.Г.* Проверка зависимости массы верхних строений от добычной производительности морских платформ с применением статистической модели 87
- A.V. Sudakov, I.G. Chesnokova* Verification of the topside weight dependence on the productivity of offshore platforms using a statistical model
- Назаров А.Г., Королев С.А.* Совершенствование требований к элементам остекления малых судов и яхт 94
- A.G. Nazarov, S.A. Korolev* Improvement of requirements to glazing elements on small craft and yachts

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

- Володин Ю.Г., Марфина О.П., Матвеев Ю.И., Гречко Н.В., Колыванов В.В.* Особенности теплообменных процессов при пуске судового газотурбинного двигателя 105
- Y.G. Volodin, O.P. Marfina, Y.I. Matveyev, N.V. Grechko, V.V. Kolyvanov* Features of heat exchange processes when starting a ship turbine engine
- Покусаев М.Н., Букин В.Г., Дорохов П.А., Горбачев М.М., Дьяченко А.В.* Перспективность применения вибромониторинга для оценки развития крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах 112
- M.N. Pokusaev, V.G. Bukin, P.A. Dorokhov, M.M. Gorbachev, A.V. Dyachenko* Prospects of using vibration monitoring to assess the development of torsional vibrations in marine propulsion systems
- Иванченко А.А., Венцюлис Л.С., Конев Г.А.* Перспективы применения инновационных газотурбинных технологий в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» 126
- A.A. Ivanchenko, L.S. Ventsulis, G.A. Konev* Prospects of innovative gas turbine technologies application in integrated power plants of Aframax tankers

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGY

- Борина А.П., Ещенко М.Н., Ухов А.А.* Автономная интеллектуальная масштабируемая система обеспечения безопасности охраняемых объектов 150
- A.P. Borina, M.N. Eshchenko, A.A. Uhov* Standalone intelligent scalable security management system of protected objects



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.062.2
EDN DGZFIL

ПРОЕКТ ПРОГРАММЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕГЛАМЕНТАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО ПОДВОДНОГО ШУМА ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

В.И. Таровик, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158 Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru

В.А. Калью, канд. техн. наук, доцент, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158 Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44, e-mail: v_kalyu@ksrc.ru

А.А. Серов, ст. эксп. 1 кат., ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: serov.aa@rs-class.org

Интенсификация морской транспортной и промышленной деятельности в акваториях Российской Федерации связана с возрастанием техногенного воздействия на морскую среду. Одним из видов такого воздействия является подводный шум судов, морских промышленных сооружений и других объектов морской техники. В международной морской практике применяются нормативные документы, разработанные ведущими классификационными обществами, а проблематика техногенного подводного шума является предметом обсуждения и регламентации на уровне международного взаимодействия. В Российской Федерации исследования подводной шумности гражданской морской техники опираются на значительный научный потенциал, но в основном, имеют целевой специализированный характер. Для того, чтобы сформировать нормативно-правовой базис по экологической безопасности морской деятельности в области подводной шумности морской техники необходима систематизация теоретических и натурных исследований. Наиболее эффективной такая работа может быть в масштабе комплексной целевой программы, схема и основные разделы которой обсуждаются в настоящей статье.

Ключевые слова: техногенный подводный шум, шумовое загрязнение, судоходство, морские промышленные сооружения, натурные измерения, стандартизация.

Для цитирования: Таровик В.И. Проект Программы выполнения системных исследований и регламентации техногенного подводного шума объектов морской техники / В.И. Таровик, В.А. Калью, А.А. Серов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 4 — 13. — EDN DGZFIL.

DRAFT PROGRAM OF SYSTEMIC RESEARCH AND REGLAMENTATION OF TECHNOGENIC UNDERWATER NOISE OF MARINE OBJECTS

V.I. Tarovik, PhD (Eng.), Krylov State Research Centre, 196158 Russia, St. Petersburg, Moskovskoe sh., 44, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru

V.A. Kalyu, PhD (Eng.), Associate Professor, Krylov State Research Centre, 196158 Russia, St. Petersburg, Moskovskoe sh., 44, e-mail: v_kalyu@ksrc.ru

A.A. Serov, 1 cat. Senior Expert, rules development department, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: serov.aa@rs-class.org

The intensification of marine transport and industrial activities in the waters of the Russian Federation is associated with an increase in the technogenic impact on the marine environment. One of the types of such impact is underwater noise from ships, offshore industrial structures and other marine equipment. In international maritime practice, regulatory documents developed by leading classification societies are used, and the problem of technogenic underwater noise is the subject of discussion and regulation at the level of international cooperation. In the Russian Federation, studies of underwater noise from civil marine equipment rely on significant scientific potential, but are mainly of a targeted specialized nature. In order to form a regulatory framework for the environmental safety of marine activities in the field of underwater noise from marine equipment, it is necessary to systematize theoretical and in situ marine research. Such work can be most effective on the scale of a comprehensive target program, the outline and main sections of which are discussed in this article.

Keywords: *technogenic underwater noise, noise pollution, shipping, offshore industrial structures, in situ marine measurements, standardization.*

For citation: Tarovik V.I., Kalyu V.A., Serov A.A. Draft program of systemic research and reglamentation of technogenic underwater noise of marine objects. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 4 — 13. EDN DGZFIL.

ВВЕДЕНИЕ

Международные исследования техногенного подводного шума объектов морской техники и его воздействий на безопасность жизнедеятельности морских экосистем опираются на положения Конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву и выполняются под руководством структур ООН при участии Международной морской организации (ИМО — IMO). Техногенный подводный шум квалифицирован как загрязнитель моря. Подводный шум судоходства контролируется со стороны Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО — IACS), ряда европейских конвенций по региональным морям, комиссий и организаций. Важная роль в этой работе принадлежит морским классификационным обществам, в частности Американскому бюро судоходства (American Bureau of Shipping — ABS) [1] и Норвежскому бюро Веритас (Det Norske Veritas — DNV) [2], которые активно развивают направления, связанные с международной стандартизацией подводной шумности гражданской морской техники. Американское акустическое общество (Acoustical Society of America — ASA) и Американский национальный институт стандартизации (American National Standards Institute — ANSI) [3] уделяют большое внимание вопросам стандартизации измерительных средств и методик исследований техногенного подводного шума судоходства.

В структуре ИМО действует Комитет по защите морской среды (КЗМС — MEPC), одним из направлений деятельности которого является снижение вклада подводного шума коммерческого судоходства в шумовое загрязнение моря. С российской стороны работа КЗМС курируется Минтрансом России при участии Российского морского регистра судоходства и других профильных организаций Российской Федерации.

Развитие морской транспортной и нефтегазовой промышленной деятельности на акваториях Российской Федерации органично связано с повышением интенсивности шумового загрязнения морской среды, которое формируется в трех основных направлениях. Так, морское транспортное судоходство исторически рассматривается в международной практике как основной объект исследований техногенного подводного шума. Не менее значимым предметом исследований является подводный шум морских промышленных кластеров, представляющих собой сложное сочетание нестационарных во времени, распределенных в пространстве морских буровых установок и нефтегазовых платформ, судов обеспечивающего, транспортного, спасательного и специального флота. Развивающимся третьим предметом исследований является подводный шум объектов портовой инфраструктуры, где подводный шум формируется наземным грузовым и транспортным оборудованием, судами портового флота, а также транспортными судами на портовых фарватерах и якорных стоянках.

Проблематика техногенного подводного шума представляется достаточно обширной и становится все более значимой в деятельности российских морских транспортных и промышленных компаний, работающих как на российском, так и на зарубежных морских рынках. С целью систематизации работ в этом направлении под руководством Российского морского регистра судоходства, при участии ФГУП «Крыловский государственный научный центр», в августе 2024 г. создана Комиссия по регламентации подводного шума судоходства и морской промышленной деятельности. Среди основных планируемых целей Комиссии можно отметить следующие:

- обеспечение выполнения положений Морской доктрины РФ в области экологической безопасности акваторий российской юрисдикции;
- поддержка эффективного природоохранного административно-правового регулирования морской деятельности российских и зарубежных компаний на акваториях и морских транспортных путях Российской Федерации;
- систематизация и координация научно-технической и нормативно-правовой деятельности российских предприятий и организаций морской индустрии Российской Федерации по проблематике техногенного подводного шума.

1. ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОГЕННОГО ПОДВОДНОГО ШУМА

Подводный шум объективно существует в любой акватории Мирового океана. При этом различаются подводные шумы естественного и антропогенного происхождения. Одним из проявлений антропогенного технического воздействия на морскую среду является техногенный подводный шум. На основании информационных материалов, в том числе [4, 5], на рис. 1 приведена иллюстрация частотных диапазонов проявлений подводного шума естественного и техногенного происхождения. Спектральные уровни этих источников, которые описывают степень их воздействия на среду, изменяются в широких пределах в зависимости от конкретных временных, погодных, гидрографических и прочих условий, поэтому на рисунке не приводятся. Техногенный подводный шум занимает широкую частотную область, при этом во многих прикладных задачах исследуется диапазон 50 — 500 Гц, но используемые в международной морской практике стандарты DNV и ABS охватывают диапазон 10 Гц — 50 кГц [1, 2].

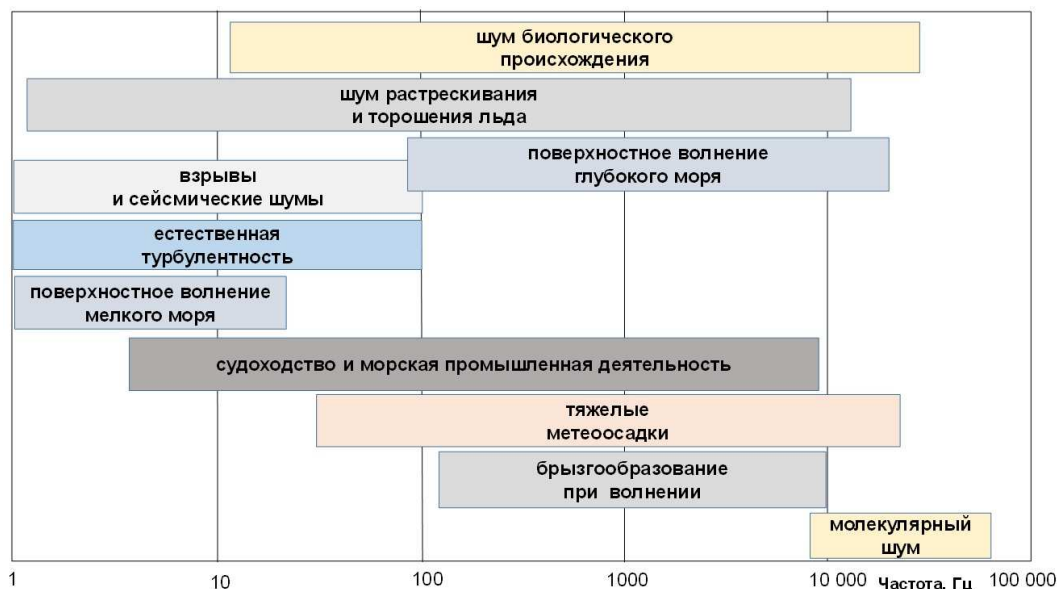


Рис. 1. Иллюстрация частотных областей подводного шума естественного и техногенного происхождения (авторский вариант, сформированный на основании [4, 5])

Для целей сравнения подводной шумности различных объектов морской техники используются приведенные к дистанции 1 метр значения уровней среднеквадратических значений измеренного на различных расстояниях уровней их звукового давления. Отметим, что уровни шума ($L_{дБ}$) выражаются в децибелах (дБ) и определяются как десятичный логарифм отношения среднеквадратичного значения звукового давления P (в Па) к некоторому пороговому значению P_0 , принятому в международной практике за 1 мкПа, таким образом уровень шума в выбранной полосе частот Δf определяется по формуле:

$$L_{дБ}(\Delta f) = 20 \lg (P(\Delta f)/P_0).$$

При этом полезно помнить, что порог слышимости для человека соответствует уровню 26 дБ, болевой порог — уровню 160 — 170 дБ, уменьшение мощности шума в 10 раз соответствует снижению уровня на 10 дБ, а уменьшение звукового давления в 10 раз соответствует снижению его уровня на 20 дБ.

Материалы многочисленных многолетних зарубежных исследований подводного шума судов различных типов, например [6 — 8] и др., дали возможность сформировать область значений приведенных уровней подводного шума судов и морских промышленных сооружений различных типов. Акустические характеристики некоторых из них были приведены на 73-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН 20 марта 2018 г., где Генеральный секретарь выступил с докладом «Мировой океан и морское право» [9]. В докладе, в частности, был сделан обзор основных источников техногенного подводного шума на основании приложения, к которому сформирована табл. 1. Можно отметить, что показанные в табл. 1 приведенные уровни техногенного подводного шума значительно превышают уровни подводного шума естественного происхождения.

Таблица 1

Типовые источники техногенного подводного шума (авторский перевод текста таблицы)

Отрасль	Источник шума	Тип шума	Приведенный уровень звукового давления источника, дБ, 1 мкПа, 1 м	Частота, кГц
Судоходство				
Суда среднего тоннажа (2 — 5 тыс. т)	гребные винты, кавитация	постоянный	165 — 180	<1,0
Суда крупного тоннажа (> 10 тыс. т)	гребные винты, кавитация	постоянный	180 — 219	<0,2
Научно-исследовательские суда	гребные винты, кавитация	постоянный	165 — 180	<1,0
Прогулочные суда и моторные лодки	гребные винты, кавитация	постоянный	160 — 178	1 — 10
Туристические и круизные суда	гребные винты, кавитация	постоянный	160 — 190	0,2 — 10
Разведка и разработка ресурсов				
Нефть и газ	пневмоизлучатели для сейсморазведки бурение	импульсный	220 — 262	0,05 — 0,10
		постоянный	124 — 190	0,1 — 1,0
Освоение возобновляемых источников энергии	ударная забивка свай эксплуатируемая ветряная электростанция	импульсный постоянный	220 — 257 144	0,1 — 2,0 <0,5
Военно-морской флот				
Морские операции	низкочастотный гидролокатор среднечастотный гидролокатор подводные взрывы	импульсный	240	0,1 — 0,5
		импульсный	223 — 235	2,8 — 8,2
		импульсный	272 — 287	0,006 — 0,02
Рыболовство				
Производственная деятельность	гребные винты, кавитация гидроакустические и отпугивающие устройства гидролокатор (эхо-зонд)	постоянный	160 — 198	<10
		импульсный	132 — 200	5 — 30
		импульсный	185 — 210	200 — 260
Донные работы				
Драгирование	гребные винты, резка, работы на донном грунте	в основном постоянный	163 — 188	0,1 — 0,5
Строительство сооружений	забивка свай	импульсный	200	0,1 — 0,5

Важной характеристикой техногенного подводного шума является его пространственная концентрация в акваториях интенсивной транспортной и промышленной деятельности, а также временная нестационарность. С точки зрения влияния на безопасность жизнедеятельности морских биоценозов большое значение имеет его временная экспозиция, то есть время воздействия на тот или иной вид морских животных. Об интенсивности такого воздействия можно судить на основании информации о напряженности (рис. 2а [10]) и плотности (рис. 2б [11]) судоходства.

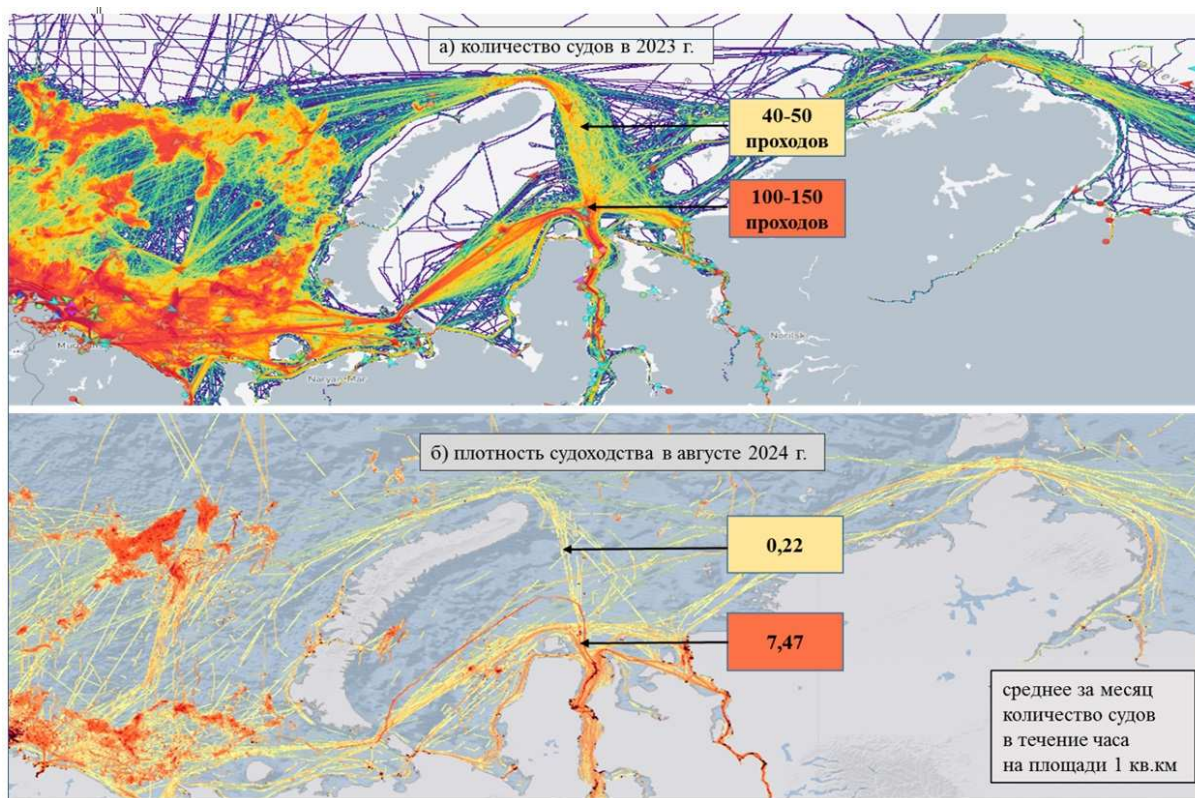


Рис. 2. Плотность судоходства в российских арктических акваториях (авторский вариант сопоставления информации источников [9, 10])

На рис. 2а приведена характеристика напряженности судоходства в течение 2023 г., определяемой в системе AIS (Automatic Identification System) как годовое количество зарегистрированных судов на данном маршруте. Из материалов [10] может быть получена аналогичная информация по другим транспортным маршрутам, что дает возможность сформировать перечень акваторий с наибольшей напряженностью судоходства для исследования их подводной зашумленности.

Временная экспозиция подводного шума иллюстрируется рис. 2б, где показана плотность судоходства, определяемая по методике, приведенной в [12] как среднее за месяц количество судов, находящихся в течение 1 часа на акватории площадью 1 км². (Monthly Hours per 1 km²). По аналогии с плотностью судоходства шумовое загрязнение акватории можно характеризовать плотностью шумового загрязнения, определяемой как средний за месяц уровень подводного шума в течение 1 часа на акватории площадью 1 км². Предлагаемое обозначение этого показателя — DNP (Density of Noise Pollution). Он может быть рассчитан на основе плотности судоходства, данных о составе судов и стационарных морских сооружений в акватории, а также результатов оценки их подводной шумности. Целесообразность введения такой характеристики является предметом дальнейшего обсуждения.

2. ПЛАНИРУЕМЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННОГО ПОДВОДНОГО ШУМА

В рамках работы ИМО в 2023 г. разработано рекомендательное Руководство по снижению подводного шума от судоходства [13]. Руководство является вспомогательным инструментом для судовладельцев и проектантов и предоставляет обзор подходов для снижения подводного шума от судна. В настоящий момент работу в ИМО по снижению подводного шума планируется вести по целому ряду направлений, среди которых необходимо выделить следующие:

- стандартизация подхода к управлению подводным шумом;
- разработка целей по подводному шуму;
- разработка инструментов для сбора и обмена информацией;
- развитие политики по сокращению подводного шума;
- поощрение исследований воздействия подводного шума на живые организмы и места их обитания.

С учетом вышесказанного высока вероятность дальнейшего совершенствования руководства ИМО с разработкой унифицированных стандартов измерения уровня подводного шума и последующим введением обязательных мер по его снижению для коммерческого судоходства.

В действующих стандартах ABS и DNV [1, 2], имеющих сегодня рекомендательный характер, основное внимание уделяется транспортным судам различных типов, а также судам научно-исследовательского и рыболовного флота. Опубликованные зарубежные стандарты практически аналогичны, а из их сопоставления на рис. 3 приведены рекомендованные уровни подводного шума судов, претендующих на символ экологического класса E.

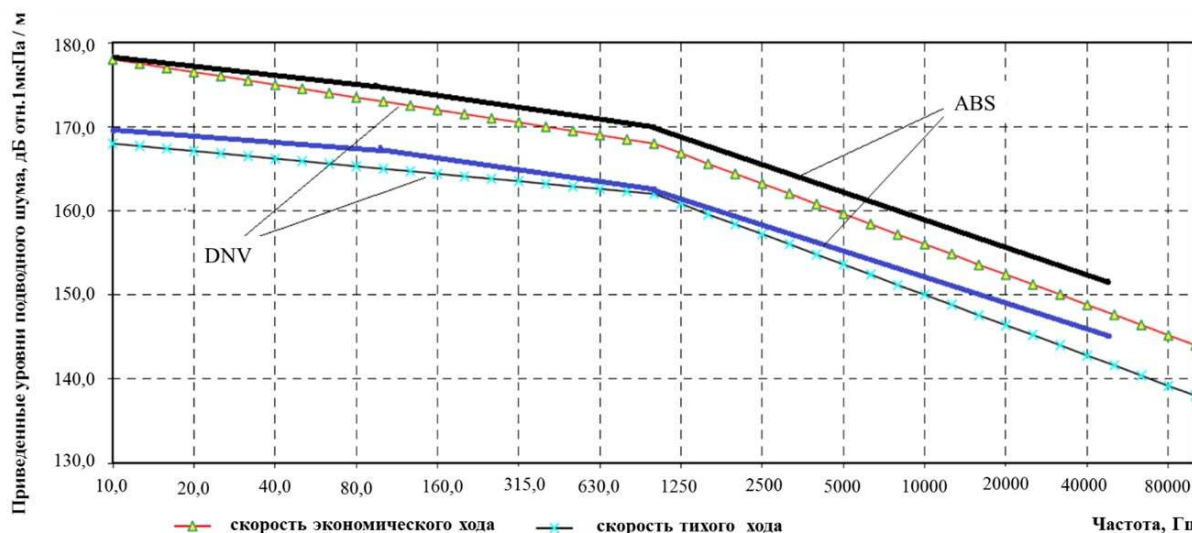


Рис. 3. Рекомендованные максимально допустимые уровни подводного шума судов, претендующих на символ экологического класса E (авторский вариант сопоставления информации источников [1, 2])

Подобных стандартов в Российской Федерации нет, однако конкурентные отношения на морском рынке, а также санкционное давление требуют соответствующего развития этого направления в интересах российской морской транспортной и промышленной деятельности. Разработка отечественных стандартов по регламентации техногенного подводного шума объектов морской техники потребует выполнения большого объема теоретических и натурных исследований [14]. Наиболее эффективно такая масштабная работа может быть выполнена в рамках комплексной целевой программы с привлечением отечественных государственных организаций, морских транспортных и промышленных компаний. Такая программа требует определенной поэтапности, а состав и временной график выполнения работ является предметом специального рассмотрения. В качестве проекта предлагается схема программы, приведенная в табл. 2.

Таблица 2

**Схема Программы выполнения системных исследований и регламентации
техногенного подводного шума объектов морской техники (авторский материал)**

№	Цель работы	Время выполнения, мес.	Основное содержание работы
1	Анализ международного и российского опыта исследований техногенного подводного шума	12	● Аналитический обзор основных типов мобильных (судов) и стационарных (морские промышленные сооружения) источников техногенного подводного шума. ● Исследование номенклатуры основных физических источников подводного шума судов и морских промышленных сооружений. ● Формирование перечня исследуемых характеристик техногенного подводного шума. ● Исследование международной нормативной документации по измерениям и регламентации параметров подводного шума объектов морской техники. ● Анализ российских и зарубежных данных по натурным исследованиям подводного шума судов и морских промышленных сооружений. ● Сравнительный обзор российских и зарубежных технических средств и их морских носителей, используемых для исследований техногенного подводного шума.
2	Научно-техническое обеспечение натурных исследований техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники	12	● Определение номенклатуры контролируемых мелководных, глубоководных, ледовых и безледовых акваторий, требующих регламентации и контроля техногенного подводного шума. ● Исследование гидрологических, метеорологических, батиметрических и пр. реальных условий проведения натурных исследований техногенного подводного шума в контролируемых акваториях. ● Исследование опыта проведения исследований техногенного подводного шума объектов морской техники по российским и зарубежным информационным материалам. ● Исследование номенклатуры импортозамещающего российского гидроакустического измерительного и анализирующего оборудования. ● Разработка расчетных моделей для оценки параметров техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники. ● Анализ функциональных возможностей перспективных морских носителей гидроакустического оборудования для исследований техногенного подводного шума.
3	Разработка технологий натурных исследований техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники	12	● Разработка проекта технических и административных требований к выполнению натурных исследований. ● Разработка функциональных схем и конструктивного облика гидроакустических средств для исследований техногенного подводного шума. ● Разработка функциональной схемы типового аппаратного комплекса для обработки и систематизации данных натурных исследований. ● Разработка проектов технологий натурных исследований подводного шума судов на транспортных маршрутах и в условиях заводских ходовых испытаний. ● Разработка проекта технологии натурных исследований стационарных морских сооружений на основных режимах их эксплуатации. ● Разработка технических предложений по вариантам морских носителей гидроакустического оборудования для исследований подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники, адаптированных к реальным условиям.
4	Разработка и испытания опытных образцов гидроакустического оборудования для измерений техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники в реальных условиях контролируемых акваторий	24	● Разработка документации на изготовление и комплектацию макетов гидроакустических измерительных трактов для их использования в донном и плавучем вариантах в ледовых и безледовых контролируемых акваториях. ● Изготовление лабораторных макетов гидроакустических измерительных трактов и исследование их параметров в маломощном акустическом бассейне. ● Корректировка документации по результатам лабораторных исследований и разработка проектной документации на изготовление и комплектацию опытных образцов гидроакустических измерительных трактов. ● Разработка технических предложений на конструктивный облик морских носителей измерительного гидроакустического оборудования. ● Разработка проектной документации и изготовление опытных образцов гидроакустических средств для измерений техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники в реальных условиях контролируемых акваторий. ● Натурные испытания опытных образцов гидроакустических средств для измерений техногенного подводного шума.

Окончание — табл. 2

№	Цель работы	Время выполнения, мес.	Основное содержание работы
5	Натурные исследования параметров техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники	24	- Натурные исследования подводного шума крупнотоннажного транспортного судна на типовом морском транзитном маршруте с использованием опытных образцов для измерений техногенного подводного шума. - Натурные исследования подводного шума морской поисково-разведочной буровой установки на типовых режимах работы. - Натурные исследования подводного шума морской добычной платформы на типовых режимах работы. - Обработка и систематизация результатов натурных исследований.
6	Разработка проекта Стандарта «Гидроакустика. Суда морские, сооружения нефтегазопромысловые морские и объекты портовой инфраструктуры. Техногенный подводный шум»	12	- Разработка Части I Стандарта: «Техногенный подводный шум. Общие положения»: - основные источники подводного шума; - технологии натурных измерений подводного шума; - документирование результатов измерений подводного шума. - Разработка Части II Стандарта: «Техногенный подводный шум. Нормативные требования»: - нормативные требования к транспортным судам; - нормативные требования к морским промышленным сооружениям; - нормативные требования к подводной шумности объектов портовой инфраструктуры. - Разработка проектов «Паспорта подводного шума судна» и «Сертификата подводной шумности судна» Российского морского регистра судоходства, а также требований к «Символу класса судна по подводной шумности».
7	Разработка предложений по виброакустическому проектированию судов и морских промышленных сооружений на соответствие нормативным требованиям Российского регистра морского судоходства по подводному шуму объектов морской техники	12	- Разработка проекта методики оценки параметров подводного шума транспортного судна и морского промышленного сооружения на этапе эскизного проектирования. - Разработка рекомендаций по использованию на этапе технического проекта оптимизированных по виброакустическим параметрам проектных решений, в том числе по применению: - средств вибропоглощения и виброизоляции машин, механизмов и неопорных связей; - конструкционных материалов и судостроительных сталей с повышенными вибропоглощающими свойствами. - Разработка предложений по проектированию движителей с улучшенными гидроакустическими характеристиками.
8	Разработка технологий измерений подводного шума новых судов при заводских сдаточных испытаниях	12	- Натурные исследования источников гидроакустических помех естественного и техногенного происхождения в акватории заводских сдаточных испытаний. - Разработка программы и методики проведения натурных измерений техногенного подводного шума судов на этапе заводских сдаточных испытаний. - Разработка предложений по комплектации гидроакустического измерительного комплекса. - Разработка методики обработки и систематизации результатов натурных измерений техногенного подводного шума судна на этапе заводских сдаточных испытаний.

Общее время выполнения работ по предлагаемой в табл. 2 схеме Программы составляет 10 лет. На основании функционального сочетания разделов работы целесообразно их объединение в отдельные НИОКР, предлагаемые в табл. 3.

Таблица 3

Проектные этапы выполнения Программы системных исследований и регламентации техногенного подводного шума объектов морской техники (авторский материал)

№ разделов Программы	Наименование НИОКР	Срок выполнения, мес.
1, 2, 3	НИР «Разработка технологий измерений техногенного подводного шума объектов морской техники в реальных условиях их эксплуатации»	36
4, 5	НИОКР «Натурные исследования параметров техногенного подводного шума мобильных и стационарных объектов морской техники»	48
6	НИР «Разработка проекта Стандарта «Гидроакустика. Суда морские, сооружения нефтегазопромысловые морские и объекты портовой инфраструктуры. Техногенный подводный шум»	12
7	НИР «Разработка проекта методики виброакустического проектирования объектов морской техники на соответствие сертификату Российского морского регистра судоходства по подводному шуму»	12
8	НИР «Разработка технологий измерений подводного шума новых судов при заводских сдаточных испытаниях»	12
		Всего: 10 лет

Изложенная в статье концепция комплексной целевой программы основана на ряде выполненных ФГУП «Крыловский государственный центр» научно-исследовательских работ, публикаций в статьях и на конференциях. Полагается, что изложенный материал будет использован в процессе работы Комиссии по регламентации подводного шума судоходства и морской промышленной деятельности под руководством ФАУ «Российский морской регистр судоходства» с необходимыми в работе обсуждениями, возможными коррекциями и дополнениями.

ВЫВОДЫ

Современные тенденции указывают на необходимость совершенствования нормативной базы в сфере регулирования подводного шума. В процессе выполнения пяти НИОКР общей длительностью 10 лет планируется сформировать научно-технический базис, позволяющий обеспечить независимую морскую транспортную и промышленную позицию по проблематике техногенного подводного шума. Одним из основных разделов работы планируется выполнение натурных исследований подводной шумности судов и морских промышленных сооружений на основании разработанных в Программе технологий акустических измерений. Информация о результатах натурных измерений действующих объектов морской техники даст возможность сформировать основные положения в области стандартизации и контроля подводной шумности их основных типов по принципу «от достигнутого». Соответственно, будет сформирована научно-техническая база для виброакустического проектирования строящихся объектов, а также для их акустической паспортизации на этапе заводских сдаточных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ABS Guide for the Classification Notation. Underwater Noise and External Airborne Noise, July 2022. [Электронный ресурс] <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-resources/RuleManager2/class-notations-table.pdf> (дата обращения 16.11.2024).
2. DNV Rules for Classification of Ships. Part 6, Chapter 24, January 2010. SILENT Class Notation. [Электронный ресурс] <https://docs.entd.ru/document/440117024> (дата обращения 16.11.2024).
3. ANSI/ASA, American National Standard. General Requirements. S12.54-2009 / Part 1. Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. [Электронный ресурс] URL: <https://standards.globalspec.com/std/9995616/ansi-asa-s12-54-iso-3744> (дата обращения 16.11.2024).
4. Good Practice Guide № 133. Underwater Noise Measurement. National Physical Laboratory, 2014. [Электронный ресурс] URL: <https://eprintspublications.npl.co.uk/6121/1/mgpg133.pdf> (дата обращения 16.11.2024).

5. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики / пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1981. — 448 стр. URL: <https://reallib.org/reader?file=678588> (дата обращения 16.11.2024).
6. MacGillivray A.O. Slowing deep-sea commercial vessels reduces underwater radiated noise / A.O. MacGillivray, Z. Li, D.E. Hannay, K.B. Trounce et al. // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — July 2019. — Vol. 146, No. 1. — P. 340 — 351.
7. McKenna M.F., D. Ross, S.M. Wiggins, J. Hildebrand. Underwater radiated noise from modern commercial ships // *The Journal of the Acoustical Society of America*. January 2012. Vol. 131, No. 1. P. 92 — 103.
8. Jimenez G., Cook S.Ph., Banda N., Watt R. Review on existing data on underwater sounds produced by the oil and gas industry / Joint Industry Programme (JIP) on E&P Sound and Marine Life. September 2020. Report number: 1.4.2. [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/364623474_Review_on_existing_data_on_underwater_sounds_produced_by_the_oil_and_gas_industry (дата обращения 16.11.2024).
9. Генеральная Ассамблея ООН. 73-я сессия, п. 80. Мировой океан и морское право: доклад Генерального секретаря. 20 марта 2018 г. [Электронный ресурс] URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/PartnershipsProjects/Documents/GloNoise-Library/UNGA-A-73-68.pdf> (дата обращения 16.11.2024).
10. Marine Traffic: Global Ship Tracking Intelligence / AIS Marine Traffic. [Электронный ресурс] URL: www.marinetraffic.com (дата обращения 16.11.2024).
11. Global Maritime Traffic Density Service. [Электронный ресурс] URL: <https://globalmaritimetraffic.org/> (дата обращения 16.11.2024).
12. EU Vessel Density Map. Detailed Method. [Электронный ресурс] URL: https://emodnet.ec.europa.eu/sites/emodnet.ec.europa.eu/files/public/HumanActivities_20231101_VesselDensityMethod.pdf (дата обращения 16.11.2024).
13. MEPC.1/Circ.906 — Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life. 2023.
14. Таровик В.И. О проекте стандарта по измерениям, контролю и регламентации параметров техногенного подводного шума объектов гражданской морской техники / В.И. Таровик, В.А. Калыу // *Арктика: экономика и экология*. — 2022. — Т.12, №3. — С. 359 — 366. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-359-366.

REFERENCES

1. ABS Guide for the Classification Notation. Underwater Noise and External Airborne Noise, July 2022. URL: <https://www.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-resources/RuleManager2/class-notations-table.pdf> (accessed 16.11.24).
2. DNV Rules for classification of Ships. Part 6, Chapter 24, January 2010. SILENT Class Notation. URL: <https://docs.cntd.ru/document/440117024> (accessed 16.11.24).
3. ANSI/ASA, American National Standard. General Requirements. S12.54-2009 / Part 1. Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. URL: <https://standards.globalspec.com/std/9995616/ansi-asa-s12-54-iso-3744> (accessed 16.11.24).
4. Good Practice Guide № 133. Underwater Noise Measurement / National Physical Laboratory, 2014. URL: <https://eprintspublications.npl.co.uk/6121/1/mgpg133.pdf> (accessed 16.11.24).
5. Urick R.J. Fundamentals of Hydroacoustics (Russian translation: Osnovy gidroakustiki. Leningrad: Sudostroyeniye, 1981).
6. MacGillivray A.O., Li Z., Hannay D.E., Trounce K.B. et al. Slowing deep-sea commercial vessels reduces underwater radiated noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. July 2019. Vol. 146, No. 1. P. 340 — 351.
7. McKenna M.F., Ross D., Wiggins S.M., Hildebrand J. Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Jan 2012. Vol. 131, No. 1. P. 92 — 103.
8. Jimenez G., Cook S.Ph., Banda N., Watt R. Review on existing data on underwater sounds produced by the oil and gas industry / Joint Industry Programme (JIP) on E&P Sound and Marine Life. September 2020. Report number: 1.4.2. [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/364623474_Review_on_existing_data_on_underwater_sounds_produced_by_the_oil_and_gas_industry (accessed 16.11.24).
9. General Assembly of the UN. Oceans and the law of the sea : report of the Secretary-General. URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/PartnershipsProjects/Documents/GloNoise-Library/UNGA-A-73-68.pdf> (accessed 16.11.24).
10. Marine Traffic: Global Ship Tracking Intelligence / AIS Marine Traffic. URL: www.marinetraffic.com (accessed 16.11.24).
11. Global Maritime Traffic Density Service. URL: <https://globalmaritimetraffic.org/> (accessed 16.11.24).
12. EU Vessel Density Map. Detailed Method. URL: https://emodnet.ec.europa.eu/sites/emodnet.ec.europa.eu/files/public/HumanActivities_20231101_VesselDensityMethod.pdf (accessed 16.11.24).
13. MEPC.1/Circ.906 — Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life. 2023.
14. Tarovik V.I., Kalyu V.A. On the draft standard for measuring, monitoring and regulating the parameters of man-made underwater noise from civil marine equipment. *Arctic: Economics and Ecology*. 2022. Vol.12, No. 3. 2022. T.12, No. 3. C. 359 — 366. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-359-366.

УДК 629.12, 004.413.4
EDN EBEQMS

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СУДОВЫХ АММИАЧНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

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

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

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

А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

При использовании риск-ориентированных методов зачастую необходимо учитывать факторы взаимодействия персонала и объектов наблюдения. В ходе анализа причин аварийности на судах, оборудованных аммиачными холодильными установками, была разработана квалиметрическая модель для проведения формализованной оценки безопасности аммиачных холодильных установок. В основу модели для оценки воздействия различных параметров на общую безопасность были положены коэффициенты весомости различных опасностей, величина которых определялась на основе анализа аварийности на судах с такими установками. В результате была рекомендована система показателей, позволяющая оценивать уровень риска и потенциальные последствия аварий. Методика была успешно проверена на практике на более чем 40 судах, которые были освидетельствованы ФАУ «Российским морским регистром судоходства», что подтвердило ее надежность и соответствие международным стандартам, установленным Международной морской организацией. Что наиболее важно, авторы пришли к выводу о возможности более широкого применения методов квалиметрии для улучшения и реализации формализованных оценок безопасности сложных систем и опасных производственных объектов. Таким образом, статья подчеркивает значимость формализованной оценки безопасности как инструмента для повышения уровня безопасности.

Ключевые слова: Российский морской регистр судоходства, анализ рисков, ФОб, аммиачная холодильная установка.

Для цитирования: Шурпьяк В.К. Использование формализованной оценки безопасности для судовых аммиачных холодильных установок / В.К. Шурпьяк, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 14 — 23. — EDN EBEQMS.

THE USE OF A FORMALIZED SAFETY ASSESSMENT FOR MARINE AMMONIA REFRIGERATION UNITS

V.K. Shurpyak, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

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

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

A.A. Mikheeva, Lead R&D Specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

When using risk-based methods, it is often necessary to take into account the factors of interaction between personnel and surveillance objects. During the analysis of the causes of accidents on ships equipped with ammonia refrigeration units, a qualimetric model was developed to carry out a formal assessment of the safety of ammonia refrigeration units. The model for assessing the impact of various parameters on overall safety was based on the weight coefficients of various hazards, the value of which was determined based on the analysis of accidents on ships with such installations. As a result, a system of indicators was recommended to assess the level of risk and potential consequences of accidents. The methodology has been successfully tested in practice on more than 40 vessels that have been inspected by the FAI Russian Maritime Register of Shipping, which confirmed its reliability and compliance with international standards established by the International Maritime Organization. Most importantly, the authors concluded that further application of qualimetry methods is necessary to improve and implement formalized safety assessments of complex systems and hazardous production facilities. Thus, the article emphasizes the importance of a formalized safety assessment as a tool for improving the level of safety.

Keywords: Russian Maritime Register of Shipping, risk analysis, FSA, FMEA, ammonia refrigeration unit.

For citation: Shurpyak V.K., Semionichev D.S., Reutskii A.S., Mikheeva A.A. The use of a formalized safety assessment for marine ammonia refrigeration units. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 14 — 23. EDN EBEQMS.

ВВЕДЕНИЕ. ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ (ФОБ) В ПРАКТИКЕ РАБОТЫ РЕГИСТРА

Формализованная оценка безопасности (ФОБ) является структурированной и систематической методологией, имеющей целью повышение уровня оценки безопасности (включая разные способы защиты жизни, здоровья людей, а также окружающей среды и имущества) путем оценки уровня риска и соотношения расходов и выгод.

Методика формализованной оценки безопасности была утверждена Международной морской организацией (ИМО) в 2002 г. [1], после чего успешно применяется в морской индустрии для оценки безопасности сложных технических объектов, надежность работы которых не может быть оценена на основе только детерминированных предписывающих требований, которые основаны на опыте эксплуатации подобных технических объектов и результатах расследования аварийных случаев. Особенностью ФОБ является ее направленность на предотвращение аварий до появления опыта их расследования, в этом проявляется как достоинства, так и недостатки этого метода. Методы ФОБ дают возможность рассматривать потенциальные опасности до того, как произойдут серьезные аварии [2 — 4]. По своей сути ФОБ является подходом, основанным на оценке риска и направленным на выявление опасностей в сложных системах до того, как их реализация приведет к аварийной ситуации.

Примерами таких сложных систем являются как судно в целом, так и его отдельные системы. Одним из наиболее опасных объектов на судне, требующих особого внимания к обеспечению безопасности, может служить холодильная установка с использованием аммиака в качестве хладагента. Особую опасность представляют аммиачные холодильные установки, расположенные в общем машинном отделении (МО), так как крупная утечка аммиака из такой установки может привести к гибели всего находящегося в это время в МО персонала. Вероятность нахождения персонала в МО на судах с постоянной вахтой практически равна 100 % и в случае высокого класса автоматизации тоже весьма велика, так как проведение технического обслуживания в длительных рейсах является нормальной повседневной практикой на рыболовных судах.

ФАУ «Российский морской регистр судоходства» уже более 20 лет использует в своей практике методы ФОБ для определения допустимости эксплуатации на судне аммиачных холодильных установок, и в настоящее время можно подвести некоторые итоги применения ФОБ к судовым аммиачным холодильным установкам и сформулировать рекомендации для дальнейшего развития таких методик, что можно рассматривать как цель настоящей статьи.

Необходимость разработки методики такой оценки появилась на рубеже века, когда Государственной Думой был введен запрет на лов рыбы в экономической зоне РФ судами под флагами других стран. В результате этого появилось большое количество обращений российских и иностранных судовладельцев (в основном на Дальнем Востоке) с просьбой о переводе своих судов в класс Регистра с последующей сменой флага на флаг РФ. При этом в большинстве своем это были достаточно крупные суда с аммиачными холодильными установками, расположенными в общем машинном отделении, что противоречило требованиям Правил Регистра и УТ МАКО М57, которые допускают такое расположение только для судов длиной не более 55 м. Для приема таких судов в класс в 1999 — 2002 гг. сотрудниками Регистра и Астраханского технического университета была разработана методика оценки безопасности судовых аммиачных холодильных установок [4, 5].

1. ЭТАПЫ ФОБ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АММИАЧНЫМ ХОЛОДИЛЬНЫМ УСТАНОВКАМ

Как известно [2, 4, 6, 7], формальная оценка безопасности включает в себя 5 этапов:

- 1) выявление опасностей;
- 2) оценка риска;
- 3) определение возможных вариантов управления риском;
- 4) оценка затрат и выгод;
- 5) принятие решения.

Первый этап – выявление опасностей и их ранжирование – производился при разработке методики. Для этого был произведен анализ причин 56 аварийных случаев на судах с аммиачными холодильными

установками. Изучение проблемы безопасности позволило в итоге сформировать следующие опасности, которые потенциально могут приводить к аварийным случаям на аммиачных холодильных установках с причинением ущерба людям, судну (оборудованию), грузу и окружающей среде:

- механическая опасность;
- пожароопасность;
- взрывоопасность (в том числе опасность высоких давлений);
- химическая опасность.

На втором этапе ФОБ была разработана квалиметрическая модель оценки риска холодильной установки, с помощью которой может проводиться оценка риска для конкретного судна. В квалиметрической модели учитывается влияние различных параметров аммиачной холодильной установки (прежде всего ее состава) на безопасность. Учитываются такие технические параметры, как количество и производительность компрессоров, аммиакоемкость холодильной установки, расположение рефотделения и т.п. Кроме этого учитываются параметры, связанные с человеческим фактором: численность экипажа, возраст, профессиональное образование, продолжительность вахты, уровень медицинского обслуживания.

На третьем этапе ФОБ разработанная квалиметрическая модель позволяет путем варьирования различных параметров, влияющих на безопасность судна, определить возможные варианты действий по уменьшению риска для приведения уровня безопасности к приемлемому уровню. Например, возможно изменить район плавания судна, увеличить численность экипажа с уменьшением длительности несения вахт, заменить или отказаться от эксплуатации части оборудования.

На четвертом этапе ФОБ судовладелец оценивает затраты для различных возможных вариантов управления риском, определенных на предыдущем этапе, и реализует принятое решение на пятом этапе ФОБ.

Таким образом, ФОБ вообще и ФОБ аммиачных холодильных установок в частности — это инструмент, который подразумевает совместную работу судовладельца и классификационного общества и позволяет судовладельцу оптимизировать затраты и выбрать наименее болезненный метод повышения безопасности.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Необходимость в формализации процесса возникновения аварии диктуется требованием получения количественных оценок риска, непосредственно влияющих на принятие решений о допустимости эксплуатации опасного объекта.

Под формализацией процесса возникновения аварии понимается разработка математической модели, описывающей связи элементов опасного объекта с элементами системы негативных факторов в различных состояниях сложной системы. Решения по обеспечению безопасности объекта сводятся в основном к оценке качества и количества элементов и их влияния на безопасность в процессе деятельности. С помощью математической модели при наличии данных о влиянии состояний сложной системы на безопасность возможно производить оценку уровня безопасности объекта.

В качестве математической модели, описывающей переходы такой сложной системы из состояния в состояние, можно использовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова, которая решается аналитическими или численными методами. Решением дифференциальных уравнений Колмогорова может быть определение функции вероятности состояний сложной системы от времени. Решить вышеуказанную задачу можно лишь при наличии исходных данных о вероятностях перехода сложной системы из исходного состояния в различные особые состояния, которые определяются с помощью статистических методов.

Зачастую статистика состояний элементов сложной системы отсутствует или недостаточно полная, так как обычно имеется в наличии только информация о случившихся авариях и катастрофах, но частота и вероятность возникновения событий, предшествующих этим событиям, остаются неизвестными. Для построения адекватной модели на основе статистики состояния сложных систем необходимо иметь значительное число наблюдений за состоянием системы в ситуациях, предшествующих авариям. Исходя из вышеизложенного, обоснованное решение о безопасности объекта, представляющего сложную систему, состоящую из большого числа элементов, на основе статистических методов невозможно [2]. Для определения вероятностей переходов сложной системы в небезопасное состояние необходимы другие подходы, в качестве которых можно использовать элементы теории квалиметрии, используя ее возможности измерения неизмеримых величин, в данном случае безопасности.

С точки зрения квалиметрии безопасность есть нефизическая величина нематериального размера, которую можно оценить неинструментальными методами, учитывая особенности объекта, его аспекты, параметры и свойства. Любое свойство объекта может быть выражено в большей или меньшей степени, то есть иметь количественную характеристику, которая будет в той или иной степени отражать влияние этого свойства на безопасность. У каждого свойства объекта может быть несколько количественных характеристик, наиболее важные из которых называются мерами:

- мерами физических свойств являются физические величины;
- мерами нефизических свойств служат показатели качества.

Единой меры измерения безопасности в настоящее время нет, а любые способы количественной оценки риска и сравнения опасности различных объектов возможны, только если все участники будут пользоваться одинаковыми мерами.

Показатели качества, как и физические величины, могут быть как абсолютными, так и относительными. Относительные показатели значительно удобнее для оценки безопасности, так как могут быть безразмерными, а единиц измерения безопасности в настоящее время нет. Для разработки и оценки относительного параметра безопасности какого-либо объекта необходимо выбрать или разработать какой-либо образец, который может быть принят за эталон, произвести оценку его безопасности, оценить влияние его параметров на безопасность.

3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КВАЛИМЕТРИИ

Разработанная методика предусматривает использование квалиметрической модели и единый механизм выявления резервов снижения риска для конкретного рискующего субъекта.

В соответствии с теорией квалиметрии для производства адекватной оценки необходимо решить ряд задач:

- 1) создание системы показателей качества, то есть определение перечня параметров элементов системы, влияющих на безопасность;
- 2) количественная оценка влияния показателей на безопасность объекта, определение коэффициентов весомости;
- 3) определение единиц измерений и шкалы измерений;
- 4) выбор метода измерений и оценки показателей;
- 5) определение критерия приемлемости на основе оценки безопасности существующих объектов;
- 6) принятие решения о допустимости на основе сравнения вычисленного интегрального итогового показателя с критерием приемлемости.

В результате для оценки безопасности аммиачных холодильных установок фактически была разработана численная шкала для измерения уровня риска и методика определения места рискующего субъекта на этой шкале.

Применительно к безопасности холодильных установок возможным нежелательным событием является аварийный случай с определенными нежелательными последствиями. Поэтому были выбраны два комплексных показателя А и Б, первый из которых в квалиметрической модели оценивает степень опасности холодильной установки, то есть вероятность возникновения аварии, а второй оценивает возможные последствия аварий и степень ущерба (нежелательность последствий). Далее для сокращения изложения мы опишем методологию определения показателя А, при этом показатель Б определяется с помощью аналогичного математического аппарата.

Показатели А и Б являются показателями высшего (нулевого) ранга.

Частные показатели $A_1 \div A_n$ в безразмерной числовой форме конкретизируют степень опасности объекта А. Они являются основаниями «ветвей» и относятся к первому рангу «дерева». Эти показатели являются факторами, формирующими показатель А, и имеют следующий смысл: вероятность события А может иметь место, если произойдет или событие A_1 , или событие A_2 , или событие A_3 , или событие A_n . Теория вероятностей при операциях с такими событиями предлагает теорему сложения вероятностей. Основное правило квалиметрии: показатели одного ранга должны по смыслу быть независимыми друг от друга (в крайнем случае — условно независимыми).

Коэффициенты $\alpha_1 \div \alpha_n$ являются коэффициентами весомости или значимости частных показателей $A_1 \div A_n$.

Физический смысл коэффициентов весомости $\alpha_1 \div \alpha_n$ представляет собой условную вероятность реализации событий $A_1 \div A_n$. То есть вероятность события А может иметь место при условии, что может

произойти событие A_1 , или событие A_2 , или событие A_3 , или событие A_n , но с разной степенью вероятности. Сказанное выше можно представить уравнением:

$$A = \alpha_1 \cdot A_1 + \alpha_2 \cdot A_2 + \alpha_3 \cdot A_3 + \dots + \alpha_n \cdot A_n = \sum_{n=1}^n \alpha_n \cdot A_n, \quad (1)$$

где $\alpha_1 \div \alpha_n$ — коэффициенты весомости первого ранга.

Условием квалиметрии является то, что сумма коэффициентов значимости показателей (n)-го ранга, характеризующих показатель (n)-го ранга, должна равняться единице:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n = \sum_{n=1}^n \alpha_n = 1. \quad (2)$$

Частные показатели низших рангов являются факторами, формирующими показатели высших рангов. Так, например, механическая опасность (A_1) определяется холодопроизводительностью рефустановки (A_{11}), наличием механизмов движения в холодильной установке (A_{12}), технологического холодильного оборудования (A_{13}), действиями обслуживающего персонала (A_{14}), уровнем автоматизации (A_{15}), электрооборудованием и электроприводом (A_{16}). Эти факторы выбраны в качестве частных показателей второго ранга; по сравнению с показателями первого ранга они являются менее важными. Еще менее важны показатели третьего ранга. В свою очередь холодопроизводительность (A_{11}), как показатель второго ранга, конкретизируется показателями третьего ранга — двухступенчатой (A_{111}) или одноступенчатой (A_{112}) холодильной машиной. Опасность, связанную с механизмами движения (показатель A_{12}) конкретизируют показатели третьего ранга: A_{121} (компрессоры), A_{122} (насосы), A_{123} (вентиляторы). Более конкретно опасность от компрессоров (A_{121}) определяют показатели четвертого ранга: A_{1211} , A_{1212} , A_{1213} , A_{1214} , A_{1215} , характеризующие конструктивные особенности компрессоров и их количество.

Математическая модель сказанного выше представляет систему уравнений, которую в общем виде можно записать:

$$A_n = \sum_{k=1}^k \alpha_{nk} \cdot A_{nk}. \quad (3)$$

При выборе показателей пожароопасности учтены эффективность системы пожарной сигнализации (A_{213} , A_{223}) и пожаротушения (A_{212} , A_{222}), наличие горючего оборудования, материалов и грузов (A_{211} , A_{221}), возможность появления высоких температур (A_{216}), возможность распространения очага пожара на соседние объекты и т.п.

При назначении показателя взрывоопасности учитывают вероятность создания в воздухе рефотделения взрывоопасной концентрации аммиака, возможность появления при этом искры или открытого пламени, количество и емкость сосудов и аппаратов, работающих под давлением, и т.п.

При назначении показателей химической опасности учтены аммиакоемкость холодильной установки, возможная концентрация аммиака в машинном отделении при разгерметизации элементов холодильной установки, эффективность работы аварийной вентиляции, возможность распространения газовой среды в соседние помещения и отсеки и т.п.

Частные показатели второго ранга (A_{11} , A_{12} , ..., A_{1k} , A_{21} , A_{22} , ..., A_{2k} , A_{n1} , A_{n2} , ..., A_{nk}) являются факторами, формирующими показатели первого ранга и имеющими следующий смысл: вероятность события A_1 может иметь место, если произойдет или событие A_{11} , или событие A_{12} , или событие A_{13} ... или событие A_{1k} ; вероятность события A_2 может иметь место, если произойдет или событие A_{21} , или событие A_{22} , или событие A_{2k} ; и т.д. Квалиметрическая модель оценки степени опасности судовой аммиачной холодильной установки в виде «дерева свойств А» для оценки опасности показана на рис. 1 [4].

Эти опасности приняты частными показателями первого ранга «дерева» и являются факторами, формирующими комплексный показатель А нулевого ранга. Причем эти опасности (частные показатели) имеют различную степень формирования показателя А, которая учитывается коэффициентами значимости. Модель представлена в виде «дерева свойств А», состоящего из «ветвей», см. рис. 1.

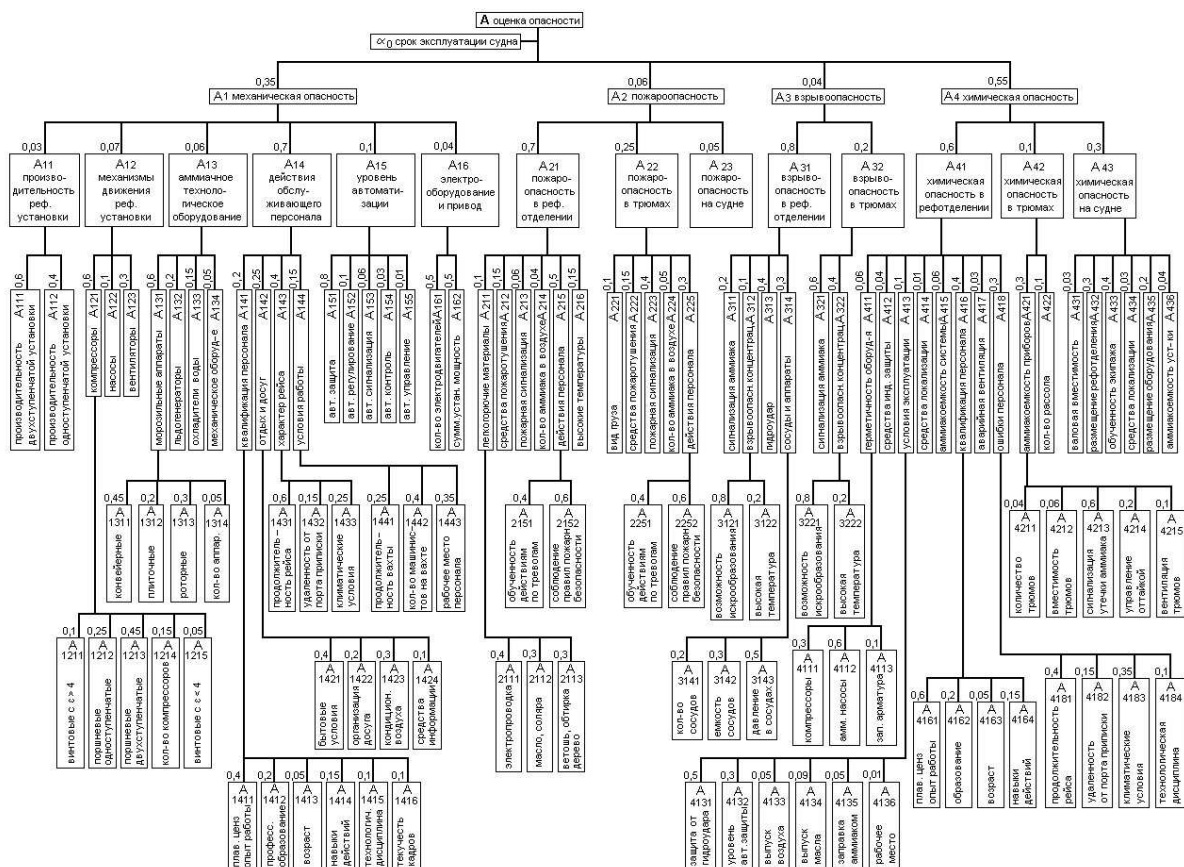


Рис. 1. Квалиметрическая модель оценки степени опасности судовой аммиачной холодильной установки (показатель А)

При разработке методики и процедуры ФОБ судовых аммиачных холодильных установок при определении коэффициентов весомости высших рангов использовалась имеющаяся статистика аварий и были учтены причины 56 аварийных случаев с такими установками. Приняв во внимание эти статистические данные, можно оценить в % значимость той или иной опасности в появлении аварийного случая:

- 37 % аварийных случаев были связаны с механической опасностью;
- 2 % аварийных случаев были связаны с пожароопасностью;
- 5 % аварийных случаев были связаны с взрывоопасностью;
- 56 % аварийных случаев были связаны с химической опасностью;

Анализ статистических данных позволил определить коэффициенты значимости высших рангов. Примеры определения коэффициентов значимости на основе статистики аварий показаны в табл. 1 и 2. Для определения коэффициентов весомости низших рангов применялся метод экспертных оценок.

Таблица 1

Коэффициенты значимости показателей первого ранга

Вид опасности, приведшей к аварийному случаю	Количество аварийных случаев	В % к общему количеству	Принятый коэффициент значимости ¹
Механическая опасность (А ₁)	21	37,4	α ₁ = 0,35
Пожароопасность (А ₂)	1	1,8	α ₂ = 0,06
Взрывоопасность (А ₃)	3	5,4	α ₃ = 0,04
Химическая опасность (А ₄)	31	55,4	α ₄ = 0,55
Всего:	56	100	Σ α _n = 1

¹С учетом мнения авторов.

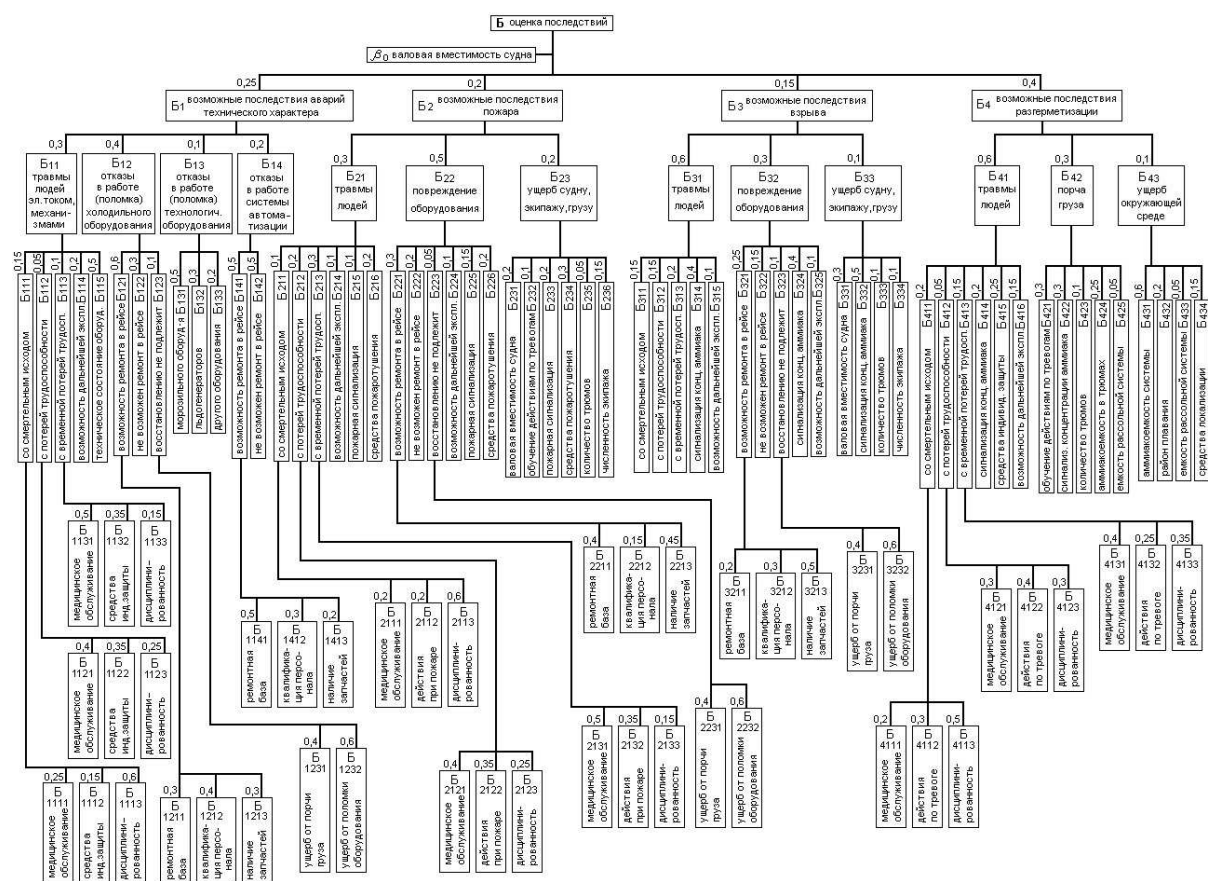


Рис. 2. Квалиметрическая модель оценки возможных последствий аварии судовой аммиачной холодильной установки (показатель Б)

Таблица 2

Коэффициенты значимости показателей третьего ранга

Аварийные случаи, вызванные механической опасностью	Количество аварийных случаев	В % к общему количеству	Коэффициент значимости (округленно)
Связанные с работой двухступенчатой установки (A_{111})	10	62,5	$\alpha_{111} = 0,6$
Связанные с работой одноступенчатой установки (A_{112})	6	37,5	$\alpha_{112} = 0,4$
Всего:	16	100	$\Sigma \alpha_{nki} = 1$

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ПРИЕМЛЕМОСТИ РИСКА

Показатели А и Б могут теоретически принимать числовые значения от нуля до единицы. При этом полагается, что А не может быть равным нулю, так как холодильная установка с показателем $A = 0$ должна быть абсолютно безопасна, что не может соответствовать действительности. Не реальным следует считать также $A = 1$, так как эксплуатация установки с таким показателем обязательно приведет к аварии. Поэтому: $0 < A < 1$.

Возможные последствия аварий на аммиачной холодильной установке в квалиметрической модели оцениваются показателем Б, который является показателем высшего (нулевого) ранга. Согласно приведенным выше формулам, показатель Б может теоретически принимать числовые значения от нуля до единицы. При этом полагается, что возможные последствия аварий (так же, как и степень опасности А) не могут быть равными нулю, так как в этом случае событие нельзя расценивать как аварию. Под $B = 1$ будем подразумевать последствия с обязательным максимально возможным ущербом — эксплуатация объекта с такими последствиями недопустима. Поэтому $0 < B < 1$.

Интегральным показателем безопасности М, учитывающим степень опасности А и последствия аварии Б, была выбрана сумма двух этих показателей. Критерий приемлемости был определен на основе расчета усредненной оценки безопасности существующих судов с аммиачными установками на борту. Для этого был выбран ряд судов, имеющих действующий класс Регистра и опыт продолжительной безаварийной эксплуатации аммиачных холодильных установок. То есть Регистр и судовладелец на протяжении многих лет принимали риск эксплуатации судов с такими установками, следовательно, его можно считать приемлемым и взять за эталон.

Далее были просчитаны показатели А и Б для этих судов и определен диапазон значений интегрального показателя М (от 0,7298 до 1,1068) и его средняя величина 1,00516 (данные представлены в табл. 3).

Таблица 3

Определение диапазона значений и средней величины показателя безопасности М

Название судна	Фактические показатели судов		
	А	Б	Риск М = (А + Б)
«Каспрыба-2»	0,3953	0,5063	0,9016
«Панагия» (пр. 502ЭМ)	0,5472	0,5561	1,1033
СРТМ (пр. 502ЭМ)	0,5168	0,5561	1,0729
«Борис Зайцев»	0,4180	0,4583	0,8763
«Даурия»	0,4892	0,4373	0,9265
«50 лет ВЛКСМ»	0,5628	0,5977	1,1605
«Наталия Ковшова»	0,5097	0,3620	0,8717
«Полярные Зори»	0,4784	0,4823	0,9607
«Каспий»	0,4394	0,5822	1,0616
«Обь» (типа «Каспий»)	0,4670	0,4474	0,9144
«Тамань»	0,5553	0,6484	1,2037
Среднее значение риска М = А + Б			1,00516

По результатам анализа данных табл. 3 было решено принять как допустимый для судов, получающих класс Регистра, риск равный единице: М = 1.

5. УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ

Методика ФОБ эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок [5] позволяет количественно оценивать степень риска эксплуатации таких установок. При этом учитываются опасность аварий, обусловленных не только техническим состоянием судна, но и человеческим фактором. Несмотря на видимую сложность модели, программа, разработанная для персонального компьютера, позволяет решать задачи оценки быстро и эффективно. Созданная методика ФОБ применяется при приеме в класс РС судов с аммиачной холодильной установкой, расположенной в общем машинном отделении, что отличается от практики постройки судов в классе Регистра.

Процедура оценки ФОБ включает в себя расширенное освидетельствование холодильной установки, заполнение судовладельцем чек-листа (всего 189 вопросов), расчет показателей безопасности по специальной программе, разработка дополнительных требований для обеспечения безопасности (если это требуется), составление акта инспектором Регистра с указанием дополнительных требований, после выполнения которых безопасность судна может быть признана достаточной для присвоения судну класса РС. Если сумма показателей А и Б меньше 1, то допускается присвоить судну класс РС.

Если сумма показателей А и Б больше 1, то можно осуществить ряд мероприятий, которые позволят снизить либо показатель опасности холодильной установки (А), либо показатель последствий аварийных случаев (Б), либо и то и другое так, чтобы суммарный показатель (А + Б) стал меньше 1, то есть снизить степень риска до допустимых размеров. Влияние этих мероприятий на уровень риска можно быстро определить с помощью программы. Например, для уменьшения вероятных последствий аварийных случаев можно оборудовать медпункт с необходимым медицинским оборудованием и аптечкой, ввести в судовую роль врача и фельдшера. Эти мероприятия изменят частные показатели B_{1111} , B_{1121} , B_{1131} , B_{2111} , B_{2121} , B_{2131} , B_{311} , B_{4111} , B_{4121} , B_{4131} , B_{313} , B_{312} . В итоге это приведет к уменьшению комплексного показателя Б. Показатель опасности А можно уменьшить, например, путем переноса из рефотделения емкостей для хранения

масла (A_{2112}), установки средств пожаротушения и сигнализации с автоматическим включением средств пожаротушения (A_{223}), сигнализаторов аммиака с автоматическим включением вентиляции (A_{4213}), автоматизировать процесс оттайки (A_{4214}), автоматизировать процесс заправки маслом (A_{4134}) и выпуска воздуха (A_{4133}), установить дублированную систему автоматической защиты от гидроудара (A_{313}) и т.п.

Предложенные мероприятия позволяют снизить риск до допустимых пределов, однако это потребует от судовладельца дополнительных затрат (приобретение и монтаж средств автоматизации, оснащение медпункта, зарплата врача и фельдшера и т.п.). Для судов с небольшим превышением границы допустимого риска для снижения степени риска потребуются меньшее число мероприятий, у судовладельца появится выбор. При выборе предпочтительного варианта мероприятий судовладелец, как правило, руководствуется экономическими или временными факторами. Если финансовые возможности судовладельца ограничены, то из всех возможных мероприятий, снижающих риск, он выберет и осуществит те, которые потребуют от него минимальных финансовых затрат. Выбор мероприятий по снижению риска остается за судовладельцем. После принятия им решения производится корректировка данных в чек-листе и новый расчет. Если сумма показателей А и Б становится меньше 1, то допускается присвоить судну класс РС, выставив дополнительные требования.

После окончания освидетельствования составляется акт по форме 6.3.10, в котором указываются основные данные по установке, требования, выставляемые по результатам освидетельствования, мероприятия, позволяющие снизить риск до допустимых пределов, показатели риска А и Б (указываются значения после выполнения требований настоящего акта и мероприятий по снижению риска).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

ИТОГИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КВАЛИМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА

Основное назначение любой модели (включая квалиметрическую) — сделать возможными некоторые выводы о поведении реальной системы, поскольку модель допускает значительно более широкие исследования по сравнению с натурными экспериментами над объектами, а именно, дает информацию для прогнозирования поведения объекта. Под качеством модели обычно понимают [3] совокупность свойств и характеристик модели, определяющих его способности удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности субъекта, использующего модель.

Потребностью субъекта (в данном случае их два: судовладелец и классификационное общество) относительно полученной модели является безопасная эксплуатация судна и обеспечение ее по возможности не слишком затратными способами. Поскольку с использованием указанной методики за последние 20 лет было освидетельствовано уже более 40 судов и после приема в класс Регистра их дальнейшая эксплуатация была безаварийной и вполне успешной, то можно констатировать, что построенная квалиметрическая модель вполне согласуется с требованиями субъектов и отвечает требованиям безопасности. Разработанная методика полностью согласуется с требованиями ИМО по ФОб, сформулированными в MSC/Circ.829 и MEPC/Circ.335.

Опыт использования описанной модели показывает, что за время ее применения интегральный показатель безопасности судов с аммиачными установками, принимаемых в класс Регистра, заметно улучшился, и если 20 лет назад его среднее значение было около 1, то в последние годы показатель М составляет в среднем около 0,8.

Предлагаемая методика позволила перейти от запретительного принципа по одному формальному признаку (длина судна менее 55 м) к принятию решения на основе количественной оценки риска эксплуатации опасного объекта по множеству параметров и сравнения его с риском эксплуатации уже существующих объектов. В настоящее время применение методики необходимо и обязательно при приеме в класс РС судов, не отвечающих требованиям п.5 УТ МАКО М57 и п. 3.1.1 части XII Правил РС, где допускается расположение аммиачного оборудования в общем машинном отделении только для судов длиной менее 55 м.

Опыт применения методов квалиметрии для оценки риска при проведении ФОб можно считать успешным, и можно рекомендовать расширение применения квалиметрических моделей в практике проведения ФОб сложных систем и опасных производственных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. MSC/Circ.1023/MEPC/Circ.392.
2. Захаров А.А. Формализованная оценка безопасности — универсальный инструмент для снижения риска на транспорте / А.А. Захаров // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2006. — №3 (3). [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizovannaya-otsenka-bezopasnosti-universalnyy-instrument-dlya-snizheniya-riska-na-transporte> (дата обращения: 23.10.2024).
3. Горелик Б.А. Идентификация опасностей и оценка риска судовых трубопроводов / Б.А. Горелик, В.К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2009. — Вып. 32. — С. 156 — 170.
4. Жильцов И.Б. Методика оценки риска при эксплуатации судовых холодильных установок / И.Б. Жильцов, В.К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2003. — Вып. 26. — С. 206 — 236.
5. Инструкция по проведению формализованной оценки безопасности эксплуатации судовых аммиачных холодильных установок // Сборник нормативно-методических материалов. Книга четырнадцатая / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2004. — С. 94 — 157.
6. Медведев В.В., Семионичев Д.С. Методические рекомендации по прогнозу и оценке рисков при обосновании целесообразности модернизации судовых энергетических установок // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2009. — Вып. 32. — С. 156 — 170.
7. Семионичев Д.С. Управление техническим состоянием судовой энергетической установки на основе метода формализованной оценки безопасности: дис. ... канд. техн. наук / Д.С. Семионичев. — СПб., 2010. — 228 с.
8. Медведев В.В. Применение методологии формализованной оценки безопасности при проектировании судовой энергетической установки и ее элементов / В.В. Медведев. — СПб.: Реноме, 2008. — 328 с.
9. Кузьмин А.А. Подход к оценке уровня безопасности опасных производственных объектов с использованием элементов теории квалиметрии / А.А. Кузьмин, А.Г. Чириков // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. — 2010. — № 4. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-otsenke-urovnya-bezopasnosti-opasnyh-proizvodstvennyh-obektov-s-ispolzovaniem-elementov-teorii-kvalimetrii> (дата обращения: 24.10.2024).
10. Микони С.В. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов / С.В. Микони, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. — М.: РАН, 2018. — 314 с.
11. Емельянов М.Д. Система компьютерного мониторинга технического состояния морских судов с оценкой рисков / М.Д. Емельянов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2009. — Вып. 32. — С. 23 — 43.

REFERENCES

1. The Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. MSC/Circ.1023/MEPC/Circ.392.
2. Zakharov A.A. Formalizovannaya otsenka bezopasnosti — universal'nyi instrument dlya snizheniya riska na transporte [Formal safety assessment as a multipurpose instrument for transport risk reduction]. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike*. 2006. No. 3 (3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formalizovannaya-otsenka-bezopasnosti-universalnyy-instrument-dlya-snizheniya-riska-na-transporte> (accessed 23.10.2024).
3. Gorelik B.A., Shurpyak V.K. Hazards Identification and Risk Assessment of Ship Piping. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2009. Issue 32. P. 156 — 170. (In Russ.)
4. Zhil'cov I.B., Shurpyak V.K. Metodika otsenki riska pri ekspluatatsii sudovykh kholodil'nykh ustanovok [Methodology for risk assessment in the operation of ship refrigeration units]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2003. Issue 26. P. 206 — 236. (In Russ.)
5. Instruksiya po provedeniyu formalizovannoi otsenki bezopasnosti ekspluatatsii sudovykh ammiachnykh kholodil'nykh ustanovok [Instructions for formal safety assessment of operation of ship ammonia refrigeration units]. *Sbornik normativno-metodicheskikh materialov. Kniga chetyrnadtsataya*. Vol. 14/ Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. St. Petersburg, 2004. P. 94 — 157.
6. Medvedev V.V., Semionichev D.S. Methodological recommendations on risk assumption and assessment when substantiating the expediency of ship propulsion plant modernization. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2009. Issue 32. P. 171 — 181. (In Russ.)
7. Semionichev D.S. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem sudovoi energeticheskoi ustanovki na osnove metoda formalizovannoi otsenki bezopasnosti: dis. ... kand. tekhn. nauk [Ship power plant technical condition management based on formal safety assessment method: PhD thesis]. St. Petersburg, 2010. 228 p.
8. Medvedev V.V. Primenenie metodologii formalizovannoi otsenki bezopasnosti pri proektirovanii sudovoi energeticheskoi ustanovki i ee elementov [Application of formal safety assessment methodology in the design of a ship power plant and its components]. — St. Petersburg: Renome, 2008. — 328 p.
9. Kuz'min A.A., Chirikov A.G. Podkhod k otsenke urovnya bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov s ispol'zovaniem elementov teorii kvalimetrii [Approach to the assessment of safety level of hazardous production facilities using elements of the theory of qualimetry] // *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoi zashchity*. 2010. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-otsenke-urovnya-bezopasnosti-opasnyh-proizvodstvennyh-obektov-s-ispolzovaniem-elementov-teorii-kvalimetrii> (accessed 24.10.2024).
10. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modelei i polimodel'nykh kompleksov [Qualimetry of models and multi-model complexes]. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2018. 314 p.
11. Yemelyanov M.D. Computer-based system for risk assessment and monitoring of sea-going ship technical condition. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2009. Issue 32. P. 23 — 43. (In Russ.)

УДК 629.123, 504.05
EDN FXBYEL

ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ МАРПОЛ К ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УГЛЕРОДОЕМКОСТИ (СИ) И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПОДХОДЫ К ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ

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

А.А. Серов, ст. эксп. 1 кат., ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: serov.aa@rs-class.org

А.А. Михеева, вед. специалист по НИР, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

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

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

В работе рассматривается существующая и разрабатываемая в настоящий момент нормативная база МАРПОЛ, касающаяся эксплуатационной углеродоемкости морских судов (далее — СИ). Для создания справедливых и равных для всех судовладельцев условий при расчете показателя СИ транспортного судна применяются специальные коэффициенты и рейсовые корректировки, направленные на учет в структуре расхода судового топлива внешних факторов, находящихся вне зоны ответственности и контроля судовладельца (погодных условий на маршруте следования, характерных конструктивных особенностей судна, специфических режимов эксплуатации и режимов работы энергетической установки и т.д.). Проведенное аналитическое исследование флота судов под российским флагом на предмет их рейтинга СИ за 2023 г., позволило спрогнозировать их перспективные значения СИ с учетом запланированного ужесточения расчетной методики по их определению. Так, в 2026 г. более половины судов под российским флагом могут иметь низкие рейтинги СИ, что потребует от их судовладельцев корректирующих мер, при этом в настоящий момент исчерпывающее представление об этих мерах отсутствует. Таким образом, задачей специалистов Регистра, участвующих в профильных мероприятиях в ИМО по совершенствованию СИ, является корректировка этих новых элементов СИ в интересах отечественных судовладельцев без ущерба экологической безопасности. Эти корректирующие меры предполагают выработку и учет в работе новых направлений и подходов совершенствования требований СИ, представленных в этой статье.

Ключевые слова: МАРПОЛ, ИМО, эксплуатационная углеродоемкость, СИ.

Для цитирования: 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.

CONSEQUENCES OF APPLYING MARPOL REQUIREMENTS TO OPERATIONAL CARBON INTENSITY (CII) AND APPROACHES FOR THEIR IMPROVEMENT

S.A. Tolmachev, Assistant Head of International Dep. FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: tolmachev.sa@rs-class.org

A.A. Serov, 1 cat. Senior Expert, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: serov.aa@rs-class.org

A.A. Mikheeva, Lead R&D Specialist, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: mikheeva.aa@rs-class.org

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

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

The paper discusses the existing and currently being developed MARPOL regulatory framework concerning the operational carbon intensity of marine vessels (CII). In order to create fair and equal conditions for all shipowners, when calculating the CII indicator of a transport vessel, special coefficients and voyage adjustments are used. The purpose of these tools is taking into account external factors outside the shipowner's area of responsibility and control in the structure of ship fuel consumption (weather, characteristic of the vessel, specific operating modes, etc.). A study of the fleet of Russian-flagged vessels has shown that some of their features will not allow them to have the required CII value, taking into account the planned tightening of the

calculation methodology for CII. Thus, the task of Register specialists involved in IMO procedures for evaluating revised and new CII elements is to adjust these new CII elements in the interests of domestic shipowners without compromising environmental safety. These corrective measures involve the development of new directions and approaches to improve the CII requirements presented in this article.

Key words: MARPOL, IMO, operational carbon intensity, CII.

For citation: 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.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Первоначальной стратегией ИМО 2018 г. по сокращению выбросов парниковых газов энергетическими установками морских транспортных судов, присвоение им показателя эксплуатационной углеродоемкости (СИ – carbon intensity indicator) является краткосрочной мерой, а принцип определения СИ представлен в Приложении VI к МАРПОЛ [1].

Эти требования были приняты на 76-й сессии Комитета по защите морской среды (далее — КЗМС) в июне 2021 г. (MEPC.328(76)), вступили в силу 1 ноября 2022 г. и применяются для судов, осуществляющих международные транспортные перевозки валовой вместимостью 5000 и выше. В них СИ представляет собой отношение выбросов CO₂ судна к выполненной им при этом транспортной работе. Выбросы углекислого газа получают на основании одобренной ИМО методологии путем пересчета потребленного топлива, а под совершенной транспортной работой подразумевается отношение пройденного судном расстояния к параметру, характеризующему его грузоподъемность или грузовместимость (дедвейт или валовая вместимость в зависимости от типа судна), аналогично [2]. Требования предполагают необходимость ежегодного расчета достигнутого СИ, который сравнивается с требуемым СИ. Требуемый СИ определен на основании статистического анализа средних значений по международному судоходству для оцениваемых типов судов. По результатам этой оценки исследуемому судну присваивается ежегодный рейтинг СИ («А» — наилучший, «В», «С», «D», «Е» — наихудший). Средняя точка значения рейтинга «С» соответствует требуемому СИ.

В соответствии с согласованным графиком (рис. 1) значение требуемого СИ подлежит ежегодному ужесточению. В период с 2024 по 2026 г. предполагается ежегодное ужесточение требований на 2 % по сравнению с базовым значением 2019 г., а в 2027 — 2030 гг. решение о величине ежегодного изменения значения требуемого СИ (годового понижающего коэффициента) предполагается принять на этапе пересмотра требований в 2024 — 2025 гг. В настоящий момент судам, которым присвоен рейтинг «Е» или три года подряд присваивался рейтинг «D», необходимо разрабатывать и впоследствии выполнять ежегодный план корректирующих действий по улучшению СИ.

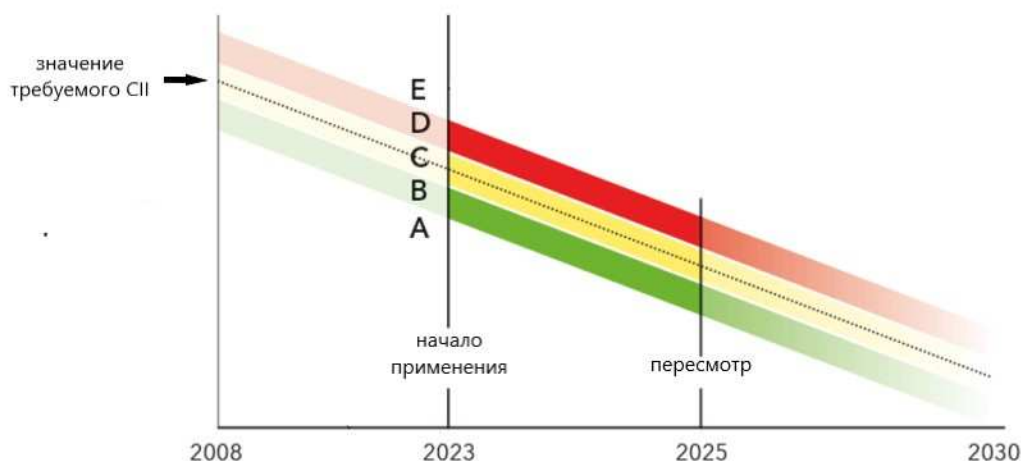


Рис. 1. График ужесточения требований по СИ

Процедура по расчету СП предполагает, что данные по количеству использованного судном топлива с учетом каждого вида и пройденному расстоянию представляются судовладельцем в Администрацию / признанную организацию для последующей проверки и загрузки в Систему сбора данных ИМО.

Значение ежегодного СП и присвоенный рейтинг СП после проверки Администрацией или признанной организацией вносится в «Удостоверение о соответствии отчетности по расходу топлива и эксплуатационный рейтинг углеродоемкости», которое ежегодно выдается на судно и проверяется в рамках государственного портового контроля (далее — ГПК) совместно с другими профильными судовыми документами («Международным свидетельством по энергоэффективности судна», «Планом управления энергоэффективностью судна»).

Обзор актуальной в настоящий момент нормативной базы показывает, что п. 28 Приложения VI к МАРПОЛ содержит только набор рамочных требований в отношении СП, а необходимые методики и особенности расчетов и присвоения рейтинга СП были одобрены КЗМС в 2021 — 2022 гг. в виде рекомендательных руководств ИМО:

- Руководство 2022 г. по показателям эксплуатационной углеродоемкости и методам их расчета (G1), МЕРС.352(78) [3];
- Руководство 2022 г. по базовым линиям для использования с показателями эксплуатационной углеродоемкости (G2), МЕРС.353(78) [4];
- Руководство 2021 г. по понижающим коэффициентам к базовым линиям эксплуатационной углеродоемкости (G3), МЕРС.338(76) [5];
- Руководство 2022 г. по рейтингам эксплуатационной углеродоемкости судов (G4), МЕРС.354(78) [6];
- Временное руководство 2022 г. по поправочным коэффициентам и рейсовым корректировкам для расчета СП (G5), МЕРС.355(78) [7].

1. ПОДХОДЫ ПРИ РАСЧЕТАХ СП И УЧЕТЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА

При разработке требований по СП делегации исходили из того, что этот показатель является по природе эксплуатационным, соответственно, на объем потребления судном топлива и пройденное расстояние могут влиять другие внешние факторы, находящиеся вне контроля судовладельца (погодные и природные условия, логистика в порту, доступность и качество топлива, условия фрахта, форс-мажорные обстоятельства, особенности конструкции судна и потребления топлива на борту в разных режимах эксплуатации и пр.). В этой ситуации показатель и рейтинг СП одного и того же типа судна при разных условиях эксплуатации могут существенно различаться, и судовладелец не будет иметь возможности повлиять на связанные с этим обстоятельства.

Для нивелирования, насколько это возможно, неравных условий, вытекающих из внешних факторов, находящихся вне контроля судовладельца, в июне 2021 г. КЗМС в ходе своей 76-й сессии принял решение о необходимости разработки Руководства ИМО по поправочным коэффициентам и рейсовым корректировкам. В этот документ должны были войти позиции, которые подлежали проверке на основании согласованных КЗМС-76 четырех критериев оценки адекватности представленных предложений по поправочным коэффициентам и рейсовым корректировкам, а именно:

- позиция № 1 — обоснование необходимости корректировки, т.е. подтверждение неадекватных результатов применения СП для судов некоторых типов и/или имеющих конструктивные особенности;
- позиция № 2 — точность, т.е. наличие и полнота данных для учета возможных поправок в расчетах СП с целью исключения ситуации избыточной и необоснованной коррекции;
- позиция № 3 — осуществимость, т.е. относительная простота и возможность контролируемой корректировки без избыточной административной нагрузки;
- позиция № 4 — оценка воздействия или понимание, насколько включение тех или иных поправок к расчетам повлияет на осуществление задач по сокращению углеродоемкости международного судоходства.

В межсессионный период в формате корреспондентской группы была проведена оценка представленных предложений, разработано и впоследствии одобрено КЗМС-78 Временное руководство 2022 г. по поправочным коэффициентам и рейсовым корректировкам для расчета СП (далее — Руководство G5), МЕРС.355(78) [7]. В документ были включены некоторые поправочные коэффициенты (далее — ПК) и рейсовые корректировки (далее — РК), которые были признаны обоснованными на основании анализа по вышеуказанным четырем критериям.

Рейсовые корректировки включают корректировки в отношении рейсов во льдах для судов ледовых классов, так как пройденное расстояние и потраченное топливо при плавании во льдах не учитываются в расчете СП.

Поправочные коэффициенты включают как новые коэффициенты, так и те, которые обоснованно используются в расчетах Конструктивного коэффициента энергоэффективности (EEDI / ККЭЭ) и применимы в отношении СП. В первой группе ПК относятся:

- ПК для судов при перевозке рефрижераторных контейнеров;
- ПК для систем подогрева/охлаждения груза на газовозах и СПГ;
- ПК при использовании электрических насосов для перекачки нефти на танкерах;
- ПК в части подогрева и перекачки груза на танкерах;
- ПК при использовании насосов для перекачки груза на танкерах, работающих от отдельного дизельного генератора;
- ПК для операций по перегрузке с судна на судно для танкеров, соответствующих требованиям правила 41.2 Приложения I МАРПОЛ;
- ПК для челночных танкеров с системами динамического позиционирования.

Ко второй группе ПК относятся:

- ПК в отношении вместимости для химовозов;
- ПК для конструктивных улучшений для саморазгружающихся навалочных судов;
- ПК по вместимости для судов ледового класса [10];
- ПК для судов высокого ледового класса IA Super и IA.

В целом, на сегодня механизм назначения СП включает достаточно развитую, хотя и несовершенную систему различных корректировок, учитывающих конструктивные и эксплуатационные особенности некоторых типов судов и сценарии их работы, что позволяет более справедливо применять требования по СП, нивелируя, насколько это возможно, внешние факторы, находящиеся вне контроля судовладельца. При этом объем корректировок остается незначительным и практически не оказывает влияния на итоговые значения совокупной углеродоемкости международного судоходства.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ СП К ФЛОТУ СУДОВ ПОД РОССИЙСКИМ ФЛАГОМ

Специалистами Регистра был проведен предварительный анализ применения требований по СП за 2023 г. на судах в классе РС под российским флагом, подпадающих под соответствующие требования МАРПОЛ, на основании имеющейся информации. Ниже представлена статистика распределения судов по рейтингам СП (табл. 1).

Таблица 1

Статистика распределения по рейтингам СП флота судов под флагом Российской Федерации на 2023 г.

Тип судна	Рейтинг СП				
	A	B	C	D	E
Газовоз	—	—	—	2	—
Генгруз	21	35	54	22	18
Контейнерное	3	5	11	3	6
Навалочное	1	1	2	4	3
Накатное	1	6	5	6	1
Нефтеналивное	28	20	25	32	8
Пассажирское	—	—	—	1	—
Пассажирское накатное	—	4	4	—	—
Рефрижераторное	1	9	19	6	4
Итого	55	80	120	76	40
%	15	21	33	20	11

Распределение рейтингов СИ для флота судов под российским флагом можно сравнить с уже имеющимися данными по мировому флоту (табл. 2).

Таблица 2

Статистика распределения по рейтингам СИ судов мирового флота на 2023 г. [8] и по статистике Международной палаты судоходства [9]

Рейтинг СИ	Распределение судов под российским флагом, %	Распределение судов по промежуточной статистике Международной палаты судоходства, %	Распределение судов мирового флота согласно статистике ИМО, %
A	15	7	22
B	21	13	25
C	33	26	31
D	20	37	16
E	11	13	6

При рассмотрении табл. 2 необходимо учитывать, что в отношении судов мирового флота на момент публикации отчетов значительное количество судов не представило данных и статистика по мировому флоту фактически может отличаться, вероятнее всего, в сторону увеличения количества судов с низкими рейтингами. В то же время промежуточная статистика Международной палаты судоходства основана на данных порядка 200 судов, что предполагает весьма ограниченную выборку.

По результатам анализа табл. 1 и 2 можно сделать следующие выводы:

1) рейтинг «С» в среднем является наиболее частым при оценке энергоэффективности судна, что указывает на корректность подхода к СИ в целом;

2) рейтинг судов в части высоких и низких оценок может сильно варьироваться в зависимости от состава и условий эксплуатации флота, что подтверждает необходимость внедрения ПК и РК.

За период 2024 — 2026 гг. предполагается ужесточение значений требуемого СИ на 6 % по сравнению с данными 2019 г., что в рамках существующих условий и сценариев эксплуатации судов, в случае сохранения дальнейшей тенденции ужесточения, с высокой вероятностью приведет к тому, что более 50 % судов будут по итогам 2026 г. иметь рейтинги «D» и «E». Несмотря на то, что в результате этого ужесточения картина по отечественному флоту будет более схожа с общемировой, на данный момент нет однозначного понимания, какие у этого будут последствия.

3. НАПРАВЛЕНИЯ И ВРЕМЕННЫЕ РАМКИ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПО СИ

Правило 28.11 Приложения VI к МАРПОЛ предписывает КЗМС до 1 января 2026 г. провести обзор и оценку требований по СИ с точки зрения эффективности, необходимости в усилении корректирующих мер, совершенствования механизма контроля за соблюдением требований, а также совершенствования системы сбора данных и пересмотра годового понижающего коэффициента. Работа по совершенствованию СИ также предполагает оценку осуществления требований за первые два года применения (2023 — 2024) в целом, а также отдельных элементов, включая применение поправочных коэффициентов и рейсовых корректировок, рассмотрение предложений об их корректировке и учете в Руководстве G5 новых ПК и РК в случае представления соответствующих предложений государств и международных организаций.

В рамках первого этапа планируется рассмотрение наиболее важных и проблемных вопросов рейтинговой системы СИ, в том числе:

- определение понижающего коэффициента Z для применения его при расчетах СИ в 2027 — 2030 гг.;
- рассмотрение необходимости внедрения корректирующих факторов, которые отмечены большинством членов комитета как «критически важные» для получения корректных значений СИ при помощи учета времени простоя, ожидания в порту и коротких рейсов;
- необходимость более жестких мер для принуждения соответствию требуемому СИ.

Детализированный план работ по СИ 1 этапа выглядит следующим образом:

- в период с 30 сентября по 4 октября 2024 г. в рамках КЗМС-82 прошло первоначальное рассмотрение предложений по совершенствованию СИ, включая предложения по новым и изменению существующих поправочных коэффициентов и рейсовых корректировок;

- в период с осени 2024 г. по весну 2025 г. должна состояться детальная проработка предложений, в том числе по ряду ПК и РК, представившихся ранее, в формате корреспондентской группы и следующей за ней межсессионной рабочей группы, с учетом принципиальных решений КЗМС-82. Работа также будет включать определение годовых понижающих коэффициентов, ужесточающих требуемый СИ, на период 2027 — 2030 гг., разработку более жестких мер контроля выполнения СИ, определение порядка применения СИ после 2030 г. и др. Соответственно, специалистам Регистра, которые участвуют в этой работе в составе российской делегации, необходимо будет проработать более чем 90 объемных документов с различными проектами изменений в отношении СИ;

- весной 2025 г. на КЗМС-83 произойдет рассмотрение итогов работы корреспондентской группы и межсессионной рабочей группы, комментариев делегаций, согласование и одобрение поправок к главе IV Приложения VI к МАРПОЛ и связанным Руководствам ИМО, включая Руководство G5;

- на октябрь 2025 г. запланирована внеочередная сессия КЗМС, на которой произойдет принятие одобренных поправок к МАРПОЛ с учетом итогов обсуждения комментариев, если таковые будут представлены;

- подведет черту под первым этапом вступление в силу пересмотренных требований по СИ, запланированное на 2027 г.

В рамках 2 этапа предполагается рассмотреть предложенные корректирующие факторы, не рассмотренные в рамках 1 этапа, а также другие потенциальные изменения системы, которые будут основаны на анализе опыта применения СИ в период до 2027 г. и, возможно, кардинально поменяют систему в целом.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДА К ВОПРОСАМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ В ИМО ТРЕБОВАНИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УГЛЕРОДОЕМКОСТИ

В данный момент наиболее важными представляются вопросы, планируемые к обсуждению в рамках 1 этапа. В рамках формирования подхода к вопросам совершенствования в ИМО требований по эксплуатационной углеродоемкости специалисты Регистра предполагают исходить из следующего.

1. В рамках КЗМС был достигнут консенсус относительно существования внешних факторов вне контроля судовладельца, которые могут оказать влияние на достигнутый СИ и ежегодный рейтинг СИ. Даже наиболее активные представители природоохранных неправительственных организаций признали необходимость введения дополнительных корректирующих факторов, в первую очередь касающихся простоя судна и ожидания в порту.

2. Глобальное влияние мирового океана на атмосферные процессы и изменение климата на планете, характеризующееся увеличением частоты и интенсивности стихийных природных явлений, негативно влияют на морскую деятельность и повышают степень влияния внешних факторов на условия эксплуатации судов.

3. Как отражение этого общего понимания КЗМС разработал и одобрил Руководство G5 с перечнем обоснованных поправочных коэффициентов и рейсовых корректировок, которые призваны сбалансировать применение требований и создать более равные условия для судов, подвергающихся воздействию внешних факторов, влияющих на эксплуатационные показатели судна.

4. В рамках работы над Руководством G5 применялись согласованные делегациями критерии и методология оценки, которая позволила включить в документ значительное количество обоснованных ПК и РК, описывающих различные сценарии эксплуатации и конструктивные особенности судов.

5. Плановый обзор и совершенствование требований по СИ будут предполагать ужесточение не только годового понижающего коэффициента, но и механизмов контроля и обеспечения выполнения. То есть высокая вероятность не только увеличения годового понижающего коэффициента с 2 % до 3 % на период 2027 — 2030 гг., но и применения санкций за низкие рейтинги по результатам проверок судов властями государства порта.

6. Более жесткий механизм применения пересмотренных требований СИ может привести к изменению логистики морских перевозок в определенных регионах или сезонах. Некоторые сценарии эксплуатации судна, маршруты, порты захода, без учета соответствующих ПК и РК, могут стать проблемными для судовладельцев с точки зрения показателя и рейтинга СИ, что может, в свою очередь, привести к сокращению

или полному прекращению работы судов для таких портов, регионов или в определенные временные промежутки.

7. Имеющаяся статистика в части СП по российскому флоту подтверждает риски увеличения доли низких рейтингов по мере ужесточения значений требуемого СП даже при существующих ежегодных поправочных коэффициентах на 2024 — 2025 гг. При дальнейшем ужесточении риски санкций в отношении российских судов в иностранных портах будут расти.

8. Регистр отмечает увеличение количества обращений судовладельцев с проблемой невозможности получения требуемого рейтинга СП ввиду крайне малого количества транспортной работы из-за специфики эксплуатации транспортного судна.

Таким образом, в рамках применимых процедур ИМО по оценке пересматриваемых и новых элементов СП, включая поправочные коэффициенты и рейсовые корректировки, наиболее целесообразным представляется следующий подход:

- воздерживаться от поддержки предложений, ведущих к необоснованной корректировке расчета СП в случаях, когда имеются альтернативные способы достижения результата без необходимости корректировки, то есть фактор не находится вне контроля судовладельца;

- воздерживаться от поддержки предложений, ведущих к избыточной административной нагрузке на судовладельца, морскую администрацию или признанную организацию при проведении расчетов, оформления результатов и управления подтверждающими документами;

- воздерживаться от поддержки предложений по проведению расчетов СП применительно к флоту компании целиком, а не к отдельному судну;

- воздерживаться от поддержки увеличения значения годовых поправочных коэффициентов на период 2027 — 2030 гг. свыше 2 %; при этом продвигать идею возможности корректировки этого значения в меньшую сторону, если будет очевидна тенденция невозможности соответствия судов ужесточающимся требованиям;

- воздерживаться от поддержки включения в требования по СП избыточных мер контроля и обеспечения выполнения, которые могут привести к непропорциональным негативным последствиям, изменению сценариев эксплуатации судов с целью избежать получения низких рейтингов СП;

- поддерживать включение в требования по СП альтернативных механизмов соответствия и учета энергосберегающих и понижающих углеродоемкость судовых технологий;

- поддерживать обоснованные предложения, подтверждающие целесообразность учета ПК или РК на основе представленных данных, схожести сценариев и условий с существующими одобренными ПК и РК;

- поддерживать сохранение в рамках СП имеющихся ПК и РК для судов ледового класса при движении во льдах;

- поддерживать сохранение всех прочих ПК, ранее одобренных и прошедших требуемую процедуру оценки, в случае подтверждения их актуальности по результатам анализа опыта применения.

Предложенный подход позволит:

- избежать применения избыточных и не пропорциональных экологическим угрозам мер контроля в отношении российских судов;

- противодействовать попыткам ряда государств получить конкурентные преимущества для своего торгового флота, эксплуатируемого на более выгодных маршрутах и в более благоприятных с точки зрения СП условиях;

- содействовать в обеспечении гибкости при осуществлении требований по СП;

- избежать дополнительной административной нагрузки на судовладельцев, морскую администрацию и признанные организации;

- избежать нарушения логистики перевозок в условиях, когда судовладельцы будут вынуждены отказываться от определенных маршрутов и портов захода с целью поддержания приемлемого рейтинга СП в ситуации жестких пересмотренных требований;

- поддержать условия для выполнения основной задачи требований СП — сокращение углеродоемкости международного судоходства в рамках значений, определенных Стратегией ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов 2023.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены существующая и разрабатываемая в настоящий момент нормативная база МАРПОЛ, касающаяся эксплуатационной углеродоемкости морских судов. Для создания справедливых и равных для всех судовладельцев условий при расчете показателя СИ транспортного судна применяются поправочные коэффициенты и рейсовые корректировки, направленные на учет в структуре расхода судового топлива внешних факторов, находящихся вне зоны ответственности и контроля судовладельца (погодных условий на маршруте следования, характерных конструктивных особенностей судна, специфических режимов эксплуатации и режимов работы энергетической установки и т.д.). Проведенное аналитическое исследование торгового флота под российским флагом на предмет текущего рейтинга СИ позволило оценить перспективные значения СИ с учетом запланированного ужесточения расчетной методики по их определению. Это позволило получить картину, согласно которой уже в 2026 г. более половины судов под российским флагом будут иметь низкие рейтинги СИ, что потребует от их судовладельцев корректирующих мер, при этом в настоящий момент исчерпывающее представление об этих мерах отсутствует.

В ходе работы специалистов Регистра, участвующих в процедурах ИМО по оценке пересматриваемых и новых элементов СИ, было установлено, что ключевой целью перспективной международной работы должна являться корректировка этих новых элементов СИ в интересах отечественных судовладельцев без ущерба экологической безопасности, при этом необходимо учитывать положения Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [11], которые распространяются на все отечественные суда вне зависимости от размеров и районов эксплуатации. Корректирующие меры предполагают выработку новых направлений и подходов совершенствования требований СИ, представленных в этой статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.А. Толмачев. Вопросы и проблемы, связанные с осуществлением стратегии ИМО 2023 года по сокращению выбросов парниковых газов с судов / Толмачев С.А. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 13 — 28.
2. Буянов А.С. Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов / А.С. Буянов, В.В. Якимов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 21 — 31.
3. Resolution MEPC.352(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1).
4. Resolution MEPC.353(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2).
5. Resolution MEPC.338(76) (adopted on 17 June 2021). 2021 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Reduction Factors Relative to Reference Lines (CII Reduction Factors Guidelines, G3).
6. Resolution MEPC.354(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Rating of Ships (CII Rating Guidelines, G4).
7. Resolution MEPC.355(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Interim Guidelines on Correction Factors and Voyage Adjustments for CII Calculations (CII Guidelines, G5).
8. MEPC 82/6/38 (26 July 2024). Energy Efficiency of Ships. Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS. (Reporting year: 2023.)
9. MEPC 82/6/10 (18 July 2024). Energy Efficiency of Ships. ICS CII data collection — summary results.
10. Шурпак В.К. О конструктивном коэффициенте энергетической эффективности судов ледового плавания / В.К. Шурпак, В.В. Гришкин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — Вып. 36. — С. 191 — 212.
11. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р. О стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года.

REFERENCES

1. Tolmachev S.A. Questions and issues related to the implementation of the IMO strategy 2023 on the reduction of GHG emissions from ships. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 13 — 28. (In Russ.)
2. Buyanov A.S., Yakimov V.V., Reutsky A.S. Energy efficiency coefficient as a tool for determining the carbon footprint from the operation of sea-going ships of ice classes. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 21 — 31. (In Russ.)
3. Resolution MEPC.352(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1).
4. Resolution MEPC.353(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2).
5. Resolution MEPC.338(76) (adopted on 17 June 2021). 2021 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Reduction Factors Relative to Reference Lines (CII Reduction Factors Guidelines, G3).
6. Resolution MEPC.354(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Rating of Ships (CII Rating Guidelines, G4).
7. Resolution MEPC.355(78) (adopted on 10 June 2022). 2022 Interim Guidelines on Correction Factors and Voyage Adjustments for CII Calculations (CII Guidelines, G5).
8. MEPC 82/6/38 (26 July 2024). Energy Efficiency of Ships. Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS. (Reporting year: 2023.)
9. MEPC 82/6/10 (18 July 2024). Energy Efficiency of Ships. ICS CII data collection — summary results.
10. Shurpyak V.K., Grishkin V.V. Energy efficiency design index (EEDI) of ice class ships. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2013. Issue 36. P. 191 — 212. (In Russ.)
11. Government Resolution 29.10.2021 No. 3052-r validating Strategy of socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050. (In Russ.)



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 35.07
EDN IGFAPO

ВНЕДРЕНИЕ МЕХАНИЗМА ПОСТОЯННОГО МОНИТОРИНГА В СИСТЕМЕ ПРОВЕРКИ ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ ИМО (IMSAS)

О.А. Чернов, нач. междунар. отдела, ФАУ Российский морской регистр судоходства, 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: chernov.oa@rs-class.org

Первый цикл проверок государств-членов ИМО в рамках Системы проверки государств-членов Международной морской организации (IMO Member State Audit Scheme, IMSAS) в настоящее время приближается к завершению, которое ожидается в начале 2026 г. С момента начала проведения в 2016 г. обязательных проверок накоплен богатый опыт их планирования и организации, который может быть использован при выработке мероприятий по повышению эффективности функционирования Системы в целях повышения на глобальном уровне безопасности, экономичности и экологичности морского судоходства.

Существующая нормативная база ИМО, описывающая Систему проверки, не в полной мере предусматривает применение современных цифровых технологий, проведение постоянного мониторинга, самопроверки стран, а также не полностью учитывает специфику организации процесса подготовки к проверкам.

Целью статьи является разработка обоснованных предложений и мероприятий по модернизации Системы проверки государств-членов ИМО через внедрение механизма постоянного мониторинга и более широкого применения цифровых технологий и инструментов управления.

Имплементация предложенных решений, методологических подходов и управленческих механизмов позволит оптимизировать операционные процессы и качественные характеристики Системы проверки государств-членов ИМО. Результаты исследования могут быть применены для улучшения функционирования Системы и организации системы проверок в других организациях различных отраслей экономики.

Ключевые слова: Система проверки государств-членов ИМО, Международная морская организация, постоянный мониторинг, повышение эффективности, безопасность мореплавания, защита морской среды, осуществление инструментов ИМО, Кодекс ОДИ.

Для цитирования: Чернов О.А. Внедрение механизма постоянного мониторинга в Системе проверки государств-членов ИМО (IMSAS) / О.А. Чернов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 33 — 40. — EDN IGFAPO.

INTRODUCTION OF CONTINUOUS MONITORING MECHANISM IN THE IMO MEMBER STATE AUDIT SCHEME (IMSAS)

O.A. Chernov, Head of International Dep., FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: chernov.oa@rs-class.org

The first cycle of audits of IMO Member States under the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS) is currently nearing completion, which is expected in early 2026. Since the start of mandatory audits in 2016, a wealth of experience has been accumulated in audit planning and organization, which can be used in developing measures to improve the efficiency of the Scheme in order to improve the safety, economy and environmental friendliness of maritime shipping at the global level.

The existing IMO regulatory framework describing the Audit Scheme does not fully provide for the use of modern digital technologies, continuous monitoring, self-audit of States, and also does not fully take into account the specifics of the organization of the audit preparation process.

The purpose of this article is to develop sound proposals and measures to modernize the IMO Member States Audit Scheme through the introduction of a mechanism for continuous monitoring and wider use of digital technologies and management tools.

The implementation of the proposed solutions, methodological approaches and management mechanisms will optimize the operational processes and qualitative characteristics of the IMO Member States Audit Scheme. The results of the study can be applied to improve the functioning of the Scheme and conduct audits in other areas of activity.

Keywords: *IMO Member State Audit Scheme, International Maritime Organisation, continuous monitoring, improving efficiency, maritime safety, marine environment protection, IMO instruments implementation, III Code.*

For citation: Chernov O.A. Introduction of continuous monitoring mechanism in the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS). *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 33 — 40. EDN IGFAPO.

ВВЕДЕНИЕ

В 2016 г. вступила в силу обязательная Система проверки государств-членов Международной морской организации (IMO Member State Audit Scheme, IMSAS), в соответствии с которой каждое государство-член ИМО должно быть проверено на соответствие применимым требованиям с определенной периодичностью.

Целью такой проверки является, с одной стороны, повышение на глобальном уровне безопасности мореплавания и защиты морской среды через обеспечение того, чтобы каждое из государств-членов надлежащим образом применяло и обеспечивало выполнение разработанных ИМО нормативных документов, а с другой — оказание государствам-членам ИМО помощи при выполнении этой задачи.

В научных трудах отечественных и зарубежных исследователей освещаются различные факторы, способствующие повышению результативности функционирования международных транспортно-логистических систем, например современные проблемы развития водного транспорта [1, 2], применение цифровых технологий в морском судоходстве [3, 4], развитие национального законодательства в области морского судоходства [5, 6], повышение экологических показателей судоходства [7, 8].

Однако, как следует из результатов анализа специализированной и научной литературы [9], принципы, методы и инструменты Системы проверки государств-членов ИМО в основном описаны в нормативных документах Международной морской организации.

Основная нормативная база Системы определена в «Кодексе по осуществлению документов ИМО» (Резолюция Ассамблеи ИМО А.1070(28); далее — Кодекс ОДИ [10]) и в резолюции Ассамблеи ИМО А. 1067 (28) «Рамочные принципы и процедуры Системы проверки государств-членов ИМО» [11] (далее — Рамочные принципы и процедуры), актуальная версия которой принята в 2013 г. и начала действовать в 2016 г., когда Система проверки приобрела обязательный для всех государств-членов ИМО характер. Особенности Системы подробно показаны в [12] и [13].

В настоящей статье, которая является одним из результатов исследования автора, посвященного Системе проверки государств-членов ИМО, анализируется текущее состояние этой Системы и итоги проверок, проведенных в рамках первого цикла. Выделены и сформулированы наиболее важные в данный момент положения нормативной базы ИМО, требующие актуализации. Предложены мероприятия по совершенствованию Системы проверки ИМО, заключающиеся во внедрении механизма постоянного мониторинга, более широком применении цифровых технологий и инструментов управления.

ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМАТА ПРОВЕРОК В РАМКАХ СИСТЕМЫ ПРОВЕРКИ ИМО

Из 176 государств-членов ИМО к концу 2024 г. проверку IMSAS прошли уже 132, то есть порядка $\frac{3}{4}$ от общего числа. Результаты 92 проверок оформлены в виде официальных окончательных отчётов, включая разработанные государствами планы корректирующих действий. Количество проверяющих экспертов в пуле ИМО составляет 260. Количество выявленных замечаний превышает 1500 [14].

К настоящему времени ИМО накопила богатый опыт организации и проведения проверок, учитывающий в том числе ее функционирование в период пандемии COVID-19.

Тем не менее возникает необходимость в совершенствовании Системы для повышения результативности, эффективности и качества проверок через внедрение механизма постоянного мониторинга и более широкого применения цифровых технологий и инструментов управления с конечной целью достичь запланированного результата функционирования Системы проверки за отчетный период с наименьшими затратами ресурсов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ К СИСТЕМЕ ПРОВЕРКИ ИМО

Система проверки описана в Резолюции ИМО A.1067(28), и для внедрения нового подхода предлагается внести в нее ряд принципиальных изменений.

В Рамочные принципы Системы проверки государств-членов ИМО (Framework for IMSAS) (Часть 1 Резолюции A.1067(28)), которые являются основополагающим набором положений, регламентирующих базовые принципы Системы, предлагается внести новый раздел, укрупненно описывающий механизм постоянного мониторинга.

При этом важно обеспечить отсутствие противоречий между новыми положениями и существующими, поскольку в Рамочных принципах в разделе 7 уже существует положение о том, что в проверку государства обязательно должны входить вопросы осуществления (implementation) и обеспечения выполнения (enforcement) применимых инструментов ИМО.

В часть 2 Резолюции A.1067(28), которая содержит Процедуры системы проверки государств-членов ИМО (Procedures for IMSAS), предлагается внести ряд более точечных изменений, касающихся составления общего графика проверок и плана проверки конкретного государства, определения объема такой проверки. Также предлагается интегрировать механизм приоритизации проверок государств во втором цикле, то есть посредством проведения специальных расчетов определять порядок и приоритетность проведения проверок государств.

МЕХАНИЗМ ПРИОРИТИЗАЦИИ ПРОВЕРОК И ПОСТОЯННОГО МОНИТОРИНГА ГОСУДАРСТВ

При формировании графика проведения проверок в рамках первого цикла, начавшегося в 2016 г., был учтен факт прохождения некоторыми из них добровольных проверок в предшествующий период. Благодаря этому данные государства были включены в конец общего перечня проверяемых стран. Оставшиеся государства-члены ИМО были распределены по списку случайным образом.

В связи с этим видится необходимым разработать и применить более объективную методику, которая позволит государствам-членам ИМО, с одной стороны, попасть в конец списка, а с другой — претендовать на «Сокращенную очную проверку» (Limited on-site audit, LOA).

Предлагаемая методика заключается в следующем.

1. На первом этапе расчета предлагается оценивать два показателя.

1.1. Доля (процент) устранения замечаний, выявленных при проверке в первом цикле, причем предлагается учитывать устранение обоих типов замечаний: и выводов (findings), и наблюдений (observations).

Устраненным будет считаться официально закрытое замечание, по которому оформлена Form C — форма, в которой руководитель группы проверки подтверждает внедрение корректирующих действий и устранение замечания.

Для расчета показателя будет определяться доля устраненных замечаний от общего числа оформленных замечаний.

Предлагается рассчитывать показатель 1.1 (Indicator of implementation of corrective action, *ИСА*) по следующей формуле:

$$ИСА = \frac{\text{Количество устраненных замечаний}}{\text{Количество оформленных замечаний}} \cdot 100 \, \%.$$

Исходя из полученного значения государству может быть присвоено значение приоритетности:

- менее 50 % замечаний устранены — высокий приоритет;
- 50 — 80 % — средний приоритет;
- 80 % и более — низкий приоритет.

1.2. Полнота поставляемой информации в GISIS (Глобальная интегрированная информационная система о судоходстве, Global Integrated Shipping Information System).

Предлагается рассчитывать процентное соотношение: количество отдельно взятых требований ИМО, по которым государство предоставляет информацию, в отношении к общему количеству требований ИМО, предусматривающих предоставление информации.

Предлагается рассчитывать показатель 1.2 (Indicator of reporting of mandatory information, *ИРМИ*) по следующей формуле:

$$ИРМИ = \frac{\text{Количество требований ИМО, по которым государство предоставляет информацию}}{\text{Количество требований ИМО, которые подразумевают обязательное предоставление информации}} \cdot 100 \, \%.$$

Исходя из полученного значения государству может быть присвоено значение приоритетности:

- менее 60 % поставляемых данных — высокий приоритет;
- 60 — 90 % — средний приоритет;
- 90 % и более — низкий приоритет.

Государство, получившее по обоим показателям 1.1 и 1.2 «низкий» приоритет, сможет претендовать на сокращенную очную проверку, в то время как остальным государствам необходимо будет проходить обычную очную проверку в стандартном объеме.

Исходя из среднего арифметического значения по обоим показателям предлагается определять положение государства в общем графике проверок: чем больше, то есть чем лучше рассчитанное значение, тем позднее будет проверка; чем значение меньше, то есть хуже, тем ранее будет проверка, поскольку проверка данного государства будет считаться более приоритетной.

ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ ГОСУДАРСТВОМ ИНФОРМАЦИИ, ТРЕБУЕМОЙ ИНСТРУМЕНТАМИ ИМО

Конвенции, Кодексы и другие инструменты ИМО содержат большое количество требований о предоставлении государствами-сторонами различной информации в Секретариат ИМО или другим заинтересованным сторонам.

Поставка части информации в ИМО реализована через базу данных ИМО GISIS, предполагающую самостоятельную загрузку данных морской администрацией.

Для некоторых видов данных, не включенных в GISIS, поставка информации осуществляется, как правило, путем ее отправки в электронном виде в Секретариат ИМО, а в адрес других государств — согласованным в каждом конкретном случае способом.

Анализ требований обязательных инструментов ИМО, касающихся предоставления государством информации и отчетности, позволяет распределить их по категориям в зависимости от типа требования (см. рис. 1).

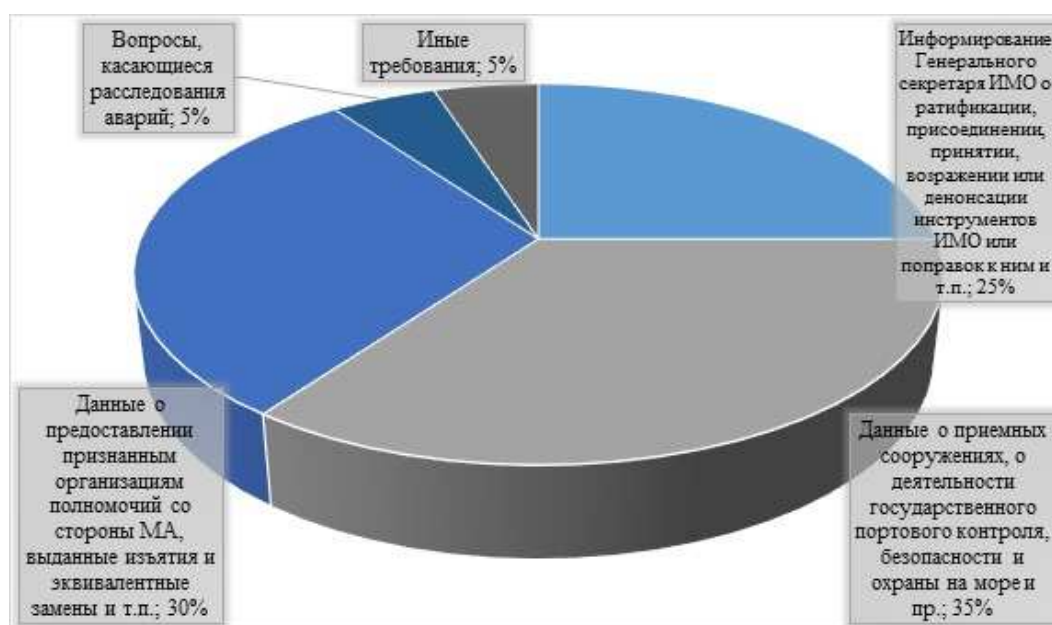


Рис. 1. Требования инструментов ИМО по обязательной отчетности

Поскольку предлагаемая в настоящей статье методика постоянного мониторинга IMSAS во многом опирается на полноту поставляемой информации, целесообразной видится выработка государствами своих внутренних процедур, учитывающих опыт и наилучшую практику работы других государств по обеспечению выполнения требований по обязательной отчетности, а также опыт Секретариата ИМО в части администрирования базы данных GISIS и взаимодействия с государствами по вопросам поставки информации в ИМО.

СОКРАЩЕНИЕ ОБЪЕМА ПРОВЕРКИ

Другой новеллой, которую предлагается внедрить во втором цикле проверок, является возможность сократить объем проверки и исключить из него некоторые вопросы, в том числе, например, осуществление или обеспечение выполнения обязательств государства флага, порта или прибрежного государства.

Это обеспечит более рациональное расходование ресурсов как со стороны проверяющих экспертов и сотрудников Секретариата ИМО, так и со стороны проверяемого государства.

Такую привилегию предлагается предоставлять государствам, достигшим лучших значений в области устранения ранее выявленных замечаний и поставки в GISIS соответствующей информации.

Возможное уменьшение объема проверки предлагается производить на втором этапе предлагаемой методики.

2. На втором этапе для государств, претендующих согласно результатам первого этапа на сокращенную очную проверку, не позднее чем за 6 месяцев до предполагаемой проверки будут рассчитаны следующие три показателя.

2.1. Процент устранения замечаний (показатель, аналогичный п. 1.1 выше).

2.2. Доля обязательств, по которым государство предоставило информацию, подтверждающую их выполнение, от общего числа обязательств, содержащихся в «Неисчерпывающем перечне обязательств...» (Non-Exhaustive List of Obligations; действующая версия — Резолюция A.1187(33)) [15].

Необходимо отметить, что для предоставления указанной информации потребуются создание специальной онлайн-платформы на базе GISIS, где по каждому обязательству государство сможет указать ответственное ведомство/учреждение в Морской Администрации и привести ссылку(и) на национальное законодательство, касающееся выполнения данного обязательства.

2.3. Доля вопросов «Вопросника проверки государства», на которые даны удовлетворительные ответы, от общего числа вопросов.

Для государства, получившего по показателям 2.1, 2.2 и 2.3 среднее значение, превышающее 90 %, предлагается определять итоговый объем сокращенной очной проверки исходя из того, что из очной проверки не могут быть исключены разделы Кодекса ОДИ, по которым у государства есть «пробелы», то есть либо неустраненные замечания (показатель 2.1), либо недостаточная представленная информация о выполнении обязательств (2.2), либо недостаточные ответы на вопросы Вопросника (2.3).

Предлагаемый подход к определению приоритетности проверок представляется достаточно сбалансированным и позволяет применять расчеты единообразно ко всем государствам-членам ИМО на недискриминационной основе.

Однако, чтобы оценить применимость методики для конкретного государства, необходимым условием, прежде всего, является отсутствие у него неустраненных замечаний, выявленных в ходе предыдущей проверки.

ВОПРОСНИК ПРОВЕРКИ ГОСУДАРСТВА

«Вопросник, заполняемый до проверки» также предлагается переработать.

На сегодняшний день существуют и используются при проверках одновременно два вопросника:

- «Вопросник, заполняемый до проверки» (PAQ, Pre-Audit Questionnaire) (Приложение 2 к Резолюции А.1067(28));

- «Дополнительная информация перед проверкой» (APAI, Additional Pre-Audit Information) (Приложение 3 к документу С 125/6/1) — документ, разработанный во время глобальной пандемии COVID-19 с прицелом на проведение проверок в дистанционном формате [16].

Второй вопросник продемонстрировал свою практическую пользу как для проверяющих, так и для проверяемых, и логичным видится их объединение, что позволит избежать дублирования информационных потоков.

Предлагается объединить перечни вопросов из указанных выше вопросников, подвергнув их незначительной корректировке, при этом каких-либо принципиальных изменений не требуется.

Назначение Вопросника останется прежним, то есть государство должно будет заблаговременно перед проверкой направить проверяющим ответы на соответствующие вопросы, для того чтобы проверяющие могли заранее изучить информацию о государстве, которое им предстоит проверить.

В целом, предусмотренная в IMSAS необходимость заблаговременного ознакомления проверяющих с подробной и структурированной информацией о проверяемом государстве является полезной особенностью Системы, повышающей ее эффективность.

За счет данного инструмента проверяющие эксперты имеют возможность лучше подготовиться к проверке, заранее изучив информацию, предоставленную государством в своих ответах на вопросы Вопросника.

Кроме того, проверяемое государство уже на этапе подготовки к проверке, в ходе подготовки ответов на вопросы Вопросника, приобретает дополнительную возможность провести самооценку и самопроверку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности деятельности транспортных организаций и результативности решения задач на уровне макрологистических систем является важной и актуальной задачей для международных цепей поставок, в которых задействован морской транспорт, поскольку грузы, доставляемые морем, составляют около 80 % от общего объема мировой торговли [17].

Международная морская организация, являясь специализированным агентством ООН по морским вопросам, уделяет особое внимание повышению эффективности собственной Системы проверки государств-членов ИМО, которая за время своего существования, показав в принципе свою состоятельность, требует модернизации с целью учета актуальных методов и методик проведения проверок.

Предложенные в настоящей статье изменения к Системе могут повысить ее эффективность, высвободив тем самым трудовые ресурсы для решения других важных задач для государств, общества и бизнеса.

Предложены мероприятия по модернизации и усовершенствованию Системы посредством таких новых подходов к проверке, как:

- приоритизация очередности проверок в следующем цикле в зависимости от прогресса устранения ранее выявленных замечаний;

- расширение применения цифровых технологий и методов;
- формализация порядка применения дистанционных методов проверок;
- оптимизирование существующих вопросников для исключения дублирования информационных потоков и, как следствие, минимизации потерь ресурсов;
- дифференцирование проверяемых государств с предоставлением им возможности сократить объем очной проверки в зависимости от результатов предварительной оценки.

Целесообразным представляется заблаговременный учет государствами изменяемых требований ИМО, касающихся Системы проверки, с целью заблаговременной и качественной организации самоподготовки к проверкам и в целом для содействия государству в применении и обеспечении выполнения разработанных ИМО нормативных документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домнина О.Л. Современное состояние, проблемы и основные направления развития логистики на водном транспорте / О.Л. Домнина, В.Н. Костров, А.О. Ничипорук // Научные проблемы водного транспорта. — 2023. — № 76 (3). — С. 141 — 165.
2. Палкина Е.С. Современное состояние и актуальные проблемы развития водного транспорта России / Е.С. Палкина // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 126 — 136.
3. Розенберг И.Н. Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов / И.Н. Розенберг, С.С. Соколов, И.А. Дубчак // Мир транспорта. — 2023. — Т. 21, № 6 (109). — С. 6 — 13. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-6-1.
4. Водницкая Э.О. Влияние цифровых инноваций на оптимизацию работы судоходных компаний / Э.О. Водницкая, Н.П. Белозерцева // Наука, меняющая жизнь: сб. м-лов нац. науч. форума магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — Владивосток: Изд-во ВВГУ, 2024. — С. 91 — 97.
5. Ключев В.В. Развитие законодательства в области автономного судоходства в Российской Федерации / В.В. Ключев // Транспортное право и безопасность. — 2023. — № 4 (48). — С. 74 — 89.
6. Юсуфова Д.Б. Международно-правовое регулирование в области развития арктического региона Российской Федерации и зарубежными странами / Д.Б. Юсуфова, С.В. Ефименко // Вопросы российского и международного права. — 2022. — Т. 12, № 9А. — С. 175 — 190. — DOI: 10.34670/AR.2022.80.47.026.
7. Дорохов П.А. Судовые малоразмерные двигатели и возможные способы совершенствования их технических характеристик // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2024. — № 3. — С. 67 — 73. — DOI: 10.24143/2073-1574-2024-3-67-73. EDN KXPENP.
8. Шурпак В.К. Анализ потребления альтернативных видов топлива на морских судах / В.К. Шурпак, М.С. Богданов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — №70 — 71. — С. 29 — 36.
9. Lymperopoulos V. Comparison of International Maritime Organization (IMO) Member State Audit Scheme (IMSAS) with ISO/IEC 17000 Conformity assessment standards series and ISO 19011 / V. Lymperopoulos, S. Karagiannis // International Journal of Conformity Assessment. — Vol. II, Issue I. — P. 22 — 26.
10. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1070(28). Кодекс по осуществлению документов ИМО.
11. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1067(28). Рамочные принципы и процедуры Системы проверки государств-членов ИМО.
12. 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. — № 101. — С. 103 — 119. — DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-103-119.
13. Чернов О.А. Типовые замечания, выявляемые при проверках государств — членов ИМО, и способы их устранения / О.А. Чернов // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 32 — 41. — DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-32-41.
14. Сводные отчеты о проверках IMSAS. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Report (CASR). Циркулярные письма ИМО №№ 3772 от 04.09.2017, 3879 от 10.10.2018, 4028 от 13.09.2019, 4317 от 15.09.2020, 4442 от 01.10.2021, 4771 от 06.10.2023, 4919 от 01.10.2024.
15. Неисчерпывающий перечень 2023 года обязательств в соответствии с документами, которые указаны в Кодексе по осуществлению документов ИМО. Резолюция Ассамблеи ИМО А.1187(33).
16. Итоги 125-й сессии Совета ИМО. 28 июня — 2 июля 2021 г. (дистанционная сессия). [Электронный ресурс] URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/C125.aspx> (дата обращения: 01.12.2022).
17. Чернов О.А. Анализ текущего состояния морских транспортно-логистических систем / О.А. Чернов // Логистика и управление цепями поставок: сб. науч. тр. — СПб.: СПбГЭУ, 2024. — С. 204 — 208.

REFERENCES

1. O.L. Domnina, V.N. Kostrov, A.O. Nichiporuk. The current state, problems and main directions of logistics development in water transport. *Russian Journal of Water Transport*. 2023. No.76 (3). P. 141 — 165. (In Russ.)
2. Palkina E.S. The current state and actual problems of the development of water transport in Russia. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2013. No. 3. P. 126 — 136. (In Russ.)
3. Rosenberg I.N., Sokolov S.S., Dubchak I.A. Methods of forming a digital double of the water area for navigation of unmanned vessels. *Mir transporta*. 2023. Vol. 21. No. 6 (109). P. 6 — 13. — DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>.
4. Vodnitskaya E.O., Belozertseva N.P. Vliyanie tsifrovyykh innovatsii na optimizatsiyu raboty sudokhodnykh kompanii [The impact of digital innovations on the optimization of the work of shipping companies]. *Nauka, menyayushchaya zhizn'* [Life-changing Science: Proceedings of the national forum of sciences]. — Vladivostok: Vladivostok State University, 2024. — P. 91 — 97.
5. Klyuev V.V. Development of legislation in the field of autonomous navigation in the Russian Federation. *Transport law and security*. 2023. No. 4 (48). P. 74 — 89.
6. Yusufova D.B., Efimenko S.V. International legal regulation in the development of the Arctic region of the Russian Federation and foreign countries. *Matters of Russian and International Law*. 2022. Vol. 12, Issue 9A. P. 175 — 190. DOI: 10.34670/AR.2022.80.47.026.
7. Dorokhov P.A. Small-sized marine engines and possible ways to improve their technical characteristics. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2024. No. 3. P. 67 — 73. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-3-67-73.
8. 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*. No.70/71, 2023. P. 29 — 36.
9. Lymperopoulos V., Karagiannis S. Comparison of International Maritime Organization (IMO) Member State Audit Scheme (IMSAS) with ISO/IEC 17000 Conformity assessment standards series and ISO 19011. *International Journal of Conformity Assessment*. Vol. II, Issue I. P. 22 — 26.
10. IMO Assembly resolution A.1070(28). Code for the Implementation of IMO documents.
11. IMO Assembly resolution A.1067(28). Framework principles and procedures of the IMO Member States Verification System.
12. Chernov O.A., Palkina E.S. Modernizing the IMO Member State Audit Scheme to Increase Efficiency of Maritime Transport. *Public Administration. E-Journal*. 2023. Issue 101. P. 103 — 119. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-103-119.
13. Chernov O.A. Typical findings issued during IMO member states audits and ways to eliminate them. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2023. Vol. 15. No. 1. P. 32 — 41. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-32-41.
14. IMO Member State Audit Scheme — Consolidated Audit Summary Reports (CASR). IMO Circular Letters No. 3772 dated 04.09.2017, 3879 dated 10.10.2018, 4028 dated 13.09.2019, 4317 dated 15.09.2020, 4442 dated 01.10.2021, 4771 dated 06.10.2023, 4919 dated 01.10.2024.
15. Non-exhaustive list of obligations in 2023 in accordance with the documents specified in the IMO Instruments Implementation Code. IMO Assembly Resolution A.1187(33).
16. Results of the 125th session of the IMO Council. June 28 — July 2, 2021 (remote session). URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/C125.aspx> (accessed 12.01.2022).
17. Chernov O.A. Analiz tekushchego sostoyaniya morskikh transportno-logisticheskikh sistem [Analysis of the current state of marine transport and logistics systems]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics, 2024. P. 204 — 208.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.5, 627.2
EDN IVRBZM

АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЯКОРНОЙ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ МОРСКИХ ПЛАВУЧИХ ОДНОТОЧЕЧНЫХ ПРИЧАЛОВ МЕТОДАМИ ПОЛНОВЕРОЯТНОСТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.В. Носков, гл. конструктор АО «ЦКБ «Коралл», 299045 Россия, Севастополь, ул. Репина, 1,
e-mail: noskovvv@cdbcoral.ru

Н.Н. Горбань, канд. техн. наук, АО «КТК-Р», 115093 Россия, Москва, Павловская ул., 7, стр. 1,
e-mail: press@срспipe.ru

А.С. Большев, д-р техн. наук, профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29Б,
e-mail: bolshev_as@spbstu.ru

С.А. Фролов, канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29Б,
e-mail: frolov_as@spbstu.ru

В настоящей статье рассматривается методология выполнения усталостного анализа якорных систем удержания выносных причальных устройств (FSPM) методами полновероятностного математического моделирования. Рассматриваются задачи построения полновероятностной схемы математического моделирования с использованием данных о ветроволновых условиях в морях, омывающих РФ, представленные в Справочниках РС. Описываются подходы к проведению математического моделирования поведения механической системы: танкер — буй — подводные шланги с вспомогательным понтоном — якорная система удержания во всех стационарных режимах, описанных в полновероятностной схеме. Приводится общая методология усталостного анализа якорных связей, основанная на численном воспроизведении поведения FSPM в различных режимах эксплуатации, при разных сочетаниях нерегулярных внешних воздействий, характерных для длительных промежутков времени, соответствующих жизненному циклу FSPM. Представлены некоторые данные о практическом применении предложенной методологии.

Ключевые слова: плавучие морские одноточечные причалы, якорные системы удержания, усталость якорных связей, математическое полновероятностное моделирование, численное моделирование во временной области.

Для цитирования: Носков В.В. Анализ усталостной прочности якорной системы удержания морских плавучих одноточечных причалов методами полновероятностного математического моделирования / В.В. Носков, Н.Н. Горбань, А.С. Большев, С.А. Фролов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 41 — 50. — EDN IVRBZM.

ANALYSIS OF THE FATIGUE STRENGTH OF THE ANCHOR MOORING SYSTEM OF FLOATING SINGLE-POINT MOORINGS BY METHODS OF FULL-PROBABILITY MATHEMATICAL MODELING

V.V. Noskov, Chief Design Engineer, JSC “Central Design Bureau “Corall”, 299045 Russia, Sevastopol, ul. Repina, 1, e-mail: noskovvv@cdbc corall.ru

N.N. Gorban, PhD, CPC-R JSC, 115093 Russia, Moscow, Pavlovskaya ul., 7, str. 1, e-mail: press@cpcpipe.ru

A.S. Bolshev, DSc, Professor of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29Б, e-mail: bolshev_as@spbstu.ru

S.A. Frolov, PhD, Associate Professor of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya ul., 29Б, e-mail: frolov_as@spbstu.ru

The article deals with the methodology for the performance of fatigue analysis of Floating Single-Point Moorings (FSPM), using full-probability mathematical simulation methods. Under consideration are problems of developing a full-probability mathematical simulation scheme using data on wind/wave conditions in seas surrounding the Russian Federation available in Handbooks issued by the Register of Shipping (RS). Approaches to mathematical simulation of the behavior of the mechanical system "tanker/buoy/submarine hoses with an auxiliary buoyancy tank — the anchor mooring system" in all steady modes covered by the full-probability scheme, are described. A general methodology is presented for fatigue analysis of anchor legs, based on the numerical simulation of the behavior of FSPM in various operating modes, as exposed to different combinations of irregular environmental actions typical for long-term periods associated with the life cycle of FSPM. Some data on the practical application of the proposed methodology are given.

Key words: *Floating Single-Point Moorings, anchor mooring systems, fatigue of anchor legs, full-probability mathematical simulation, time-domain numerical simulation.*

For citation: Noskov V.V., Gorban N.N., Bolshev A.S., Frolov S.A. Analysis of the fatigue strength of the anchor mooring system of floating single-point moorings by methods of full-probability mathematical modeling. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 41 — 50. EDN IVRBZM.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике, в том числе в Российской Федерации, широкое распространение получила отгрузка углеводородного сырья с помощью морских однотоочных причалов. Для безледовых акваторий предпочтительным является использование плавучих морских однотоочных причалов (floating single point mooring — FSPM).

В состав FSPM (рис. 1) входят буй, его якорная система удержания (ЯСУ) и шланги для транспортировки углеводородного сырья.

Одной из наиболее важных задач при проектировании FSPM является выбор характеристик ЯСУ. При проектировании ЯСУ необходимо учитывать, что она должна выдерживать не только пиковые нагрузки в режимах удержания танкера и штормового отстоя, но и постоянные циклические нагрузки в течение всего срока эксплуатации.



Рис. 1. Общий вид плавучего морского однотоочного причала

Наибольшее влияние циклические нагрузки оказывают на якорные цепи. С учетом сроков эксплуатации FSPM 20 — 30 лет именно усталостная прочность во многих случаях является определяющей для выбора калибра и категории прочности якорных цепей.

Корректное выполнение расчетов усталостной прочности зависит от достоверного определения количества циклов для соответствующих размахов величин натяжения в элементах цепей за весь срок эксплуатации объекта.

Методология анализа ЯСУ FSPM на циклические нагрузки должна учитывать изменения состояния рассматриваемой системы (автономная работа буя и работа буя с пришвартованным танкером) под действием нерегулярных внешних нагрузок. Методология реализации усталостного анализа ЯСУ плавучих морских одноточечных причалов, ввиду большой вычислительной трудоемкости, должна также учитывать существующие ограничения на сроки реализации проектных работ.

1. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ УСТАЛОСТНОГО АНАЛИЗА ЯСУ

Расчеты якорных систем допускается выполнять с использованием как детерминистического, так и вероятностного подхода. При наиболее содержательном с научной точки зрения вероятностном подходе сначала устанавливаются комбинации всевозможных погодных условий и воздействий. Для всех сочетаний внешних нагрузок выполняются расчеты якорной системы и производится статистический анализ реакций. Расчеты реакций в якорных линиях и перемещений сооружений допускается выполнять квазистатическими или динамическими методами [1].

При квазистатическом методе воздействия от ветра течения и составляющие сил волнового дрейфа рассматриваются как статические силы, а волновые возмущающие силы, вызывающие качку, — как гармонические нагрузки с частотой волн.

При реализации динамического метода обычно учитывается динамика якорных связей, трубопроводов FSPM, а также динамика ветровых порывов, вызывающая низкочастотные колебания заякоренного сооружения.

Анализ поведения заякоренного сооружения осуществляется обычно путем решения дифференциальных уравнений его движения в частотной или временной области. Анализ в частотной области требует линеаризации задачи и использования ряда упрощений, тогда как решение во временной области позволяет в полной мере учесть динамический характер воздействий, инерционные силы в якорных связях, влияние сил трения и нелинейные эффекты, обусловленные как физической, так и геометрической нелинейностью.

На основании анализа поведения заякоренного сооружения, эксплуатируемого в течение длительного времени, должны выполняться расчеты на циклические нагрузки и анализ прочности ЯСУ с учетом предела выносливости элементов. Сложность реализации усталостного анализа связана с полигармоническим нагружением якорных связей ввиду нерегулярного характера внешних воздействий, собственной динамикой танкера, буя, шлангов, якорных связей, наличием низкочастотных и высокочастотных колебаний, различными динамическими характеристиками FSPM в разных режимах функционирования. В этой ситуации необходимо либо разрабатывать и обосновывать процедуры объединения разных по происхождению колебаний, полученных в частотной области, в единые статистические закономерности, либо воспроизводить поведение заякоренного сооружения во временной области во всех возможных режимах, регистрировать и статистически обрабатывать наблюдаемые колебания.

В целом способы усталостного анализа ЯСУ могут основываться на положениях нормативного документа [2], который целесообразно адаптировать к особенностям функционирования плавучих морских одноточечных причалов с учетом особенностей полигармонического нагружения ЯСУ и различных режимов функционирования FSPM путем выполнения полновозрастного моделирования поведения всей механической системы на протяжении всего жизненного цикла.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом настоящего исследования являются морские заякоренные объекты, предназначенные для работы в условиях открытого моря.

Предмет исследования — циклические нагрузки в якорных системах удержания выносных причальных устройств.

Цель работы — выполнение расчетов ЯСУ на циклические нагрузки и анализ их прочности с учетом предела выносливости их элементов.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе реализуются следующие задачи:

- построение трехмерной геометрической и математической модели заякоренного сооружения (цифрового двойника объекта исследования);
- построение по полновероятностной схеме моделей внешних нагрузок, действующих на сооружение на протяжении его жизненного цикла;
- математическое моделирование в динамической постановке (во временной области) поведения механической системы (танкер — буй — подводные шланги с вспомогательным понтоном — якорная система удержания) во всех стационарных режимах, описанных в полновероятностной схеме;
- статистическая обработка нагружения якорных связей во всех режимах функционирования сооружения;
- усталостный анализ якорных связей.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЛАВУЧЕГО ЗАЯКОРЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

Математическое моделирование реализуется в ПК «Anchored Structures» (Свидетельство Российского морского регистра судоходства №2200040.314 от 04.04.2022). Расчетный программный комплекс включен в Единый Реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных (Регистрационный номер ПО 4673, Приказ Минкомсвязи РФ № 347 от 05.07.2018).

Трехмерные геометрические модели FSPM и танкера создаются с помощью геометрического редактора программного комплекса или импортируются из иных программных сред.

При расчете сил и моментов от течения в программном комплексе используются данные геометрической модели о площади подводной парусности FSPM и танкера, а также типовые коэффициенты сопротивления при обтекании объектов с известной геометрической формой. Скорость течения задается с учетом изменения по глубине [1], а нагрузки на смоченную поверхность FSPM и танкера вычисляются по формуле Морисона [3].

При расчете сил и моментов от ветра в программном комплексе используется постановка задачи, также предполагающая наличие априорных сведений о площади парусности и коэффициентах сопротивления при обдувке сооружений.

Скорость ветра задается с учетом эпюры ее изменения по высоте [1] в виде двух составляющих: постоянной скорости ветра, определяемой осредненной за 1 час скорости на высоте 10 м над уровнем моря и пульсационной составляющей, генерируемой с использованием спектра Давенпорта [1]. Вычисление ветровых нагрузок осуществляется с помощью формулы Морисона [3] во временной области в процессе реализации динамического моделирования поведения FSPM и танкера.

Нагрузки от нерегулярного волнения на FSPM и танкер вычисляются в ПК «Anchored Structures» во временной области. Нерегулярное волнение генерируется с помощью спектра JONSWAP, а волновые нагрузки вычисляются численно с использованием метода пространственных источников излучения [3,4].

Усилия, возникающие в якорных связях и трубопроводах FSPM, вычисляются во временной области численно с помощью решения специальных уравнений движения этих линий [5].

В данной работе поведение системы «FSPM — танкер» рассматривается как задача динамики трех плавучих объектов (FSPM, танкер, вспомогательный понтон) с учетом динамики связей и подводных шлангов. Вспомогательный понтон является элементом трубопроводной системы. При этом каждый трубопровод рассматривается как одна из дополнительных связей, которая, в отличие от якорных связей, обладает изгибной жесткостью.

В качестве модельного представления якорной связи и швартового каната используется гирлянда сосредоточенных масс, соединенных упругой невесомой нитью. Подводный шланг также представляется в виде гирлянды масс, соединенных прямолинейными невесомыми продольно деформируемыми стержнями со сферическими шарнирами и моментными пружинами между ними. Такая модель позволяет отразить

инерционные характеристики за счет распределения масс по его длине. Продольные деформации воспроизводятся за счет упругой продольной деформации цепочки стержней. Изгибные деформации происходят за счет моментных пружин, размещенных в его узловых точках. В данной работе, ввиду большого объема плавучести (понтон), он рассматривался как самостоятельный водоизмещающий объект, а шланги разделялись на отдельные составляющие (от бúa к понтону и от понтона к манифольду).

Математическое моделирование поведения FSPM и танкера сводится к численному интегрированию дифференциальных уравнений их движения совместно с дифференциальными уравнениями движения узловых точек якорных связей и трубопроводов.

4. ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ПЛНОВЕРОЯТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК НА FSPM

Для построения описания совокупности ветроволновых режимов, полностью описывающих изменчивость ветра и волнения на протяжении жизненного цикла FSPM, использовались данные справочников Российского морского регистра судоходства (далее — Справочник РС) по режимам ветра и волнения (в данном случае использовался справочник для района № 2 Черного моря [6]).

К сожалению, в справочных данных нет информации о совместном действии ветра и волнения по румбам с указанием вероятности того или иного сочетания. Поэтому в данной работе была построена методика построения таких сочетаний, которая с точки зрения статистических характеристик ветра и волнения не противоречит данным Справочника РС.

Исходные данные по скоростям ветра и высоте волн были преобразованы в плотность их вероятности и интерполированы в пределах определения сплайнами. Для получения значений кривых, выходящих за пределы определения, кривые были экстраполированы по закону Вейбулла, с учетом согласования с интерполяционным сплайном по значению наклона (первой производной).

В рамках данной методики кривые плотностей вероятности ветра и волнения накладывались друг на друга, начиная с самых высоких значений скоростей ветра и высот волн. После наложения распределений ветра и волнения система замыкается, если определить взаимосвязь скоростей ветра и высот волн. Данная зависимость была задана в виде кубического полинома, обеспечивавшего наилучшее совпадение кривой плотности вероятности ветра за длительный промежуток наблюдений с суммой кривых плотности вероятности ветров по всем ветроволновым режимам в разрабатываемой плновероятностной схеме моделирования.

Пример полученных суммарных распределений параметров скорости ветра, высоты волн и периодов волнения по сгенерированным 24 ветроволновым режимам, покрывающим изменчивость ветра и волнения в течение длительного срока эксплуатации сооружения, и его сравнение с данными справочника РС, приведены на рис. 2 — 4. Точками на кривой обозначены реальные значения параметров, полученных в сгенерированном наборе штормов.

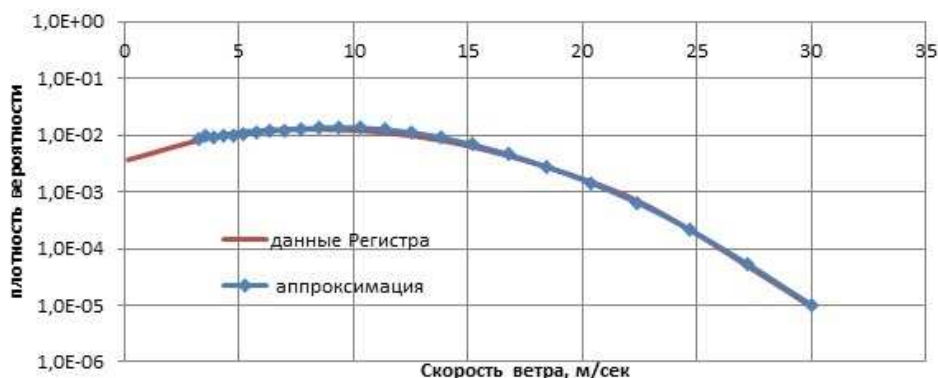


Рис. 2. Пример суммарной плотности распределения скоростей ветра и его сравнение с данными справочника РС

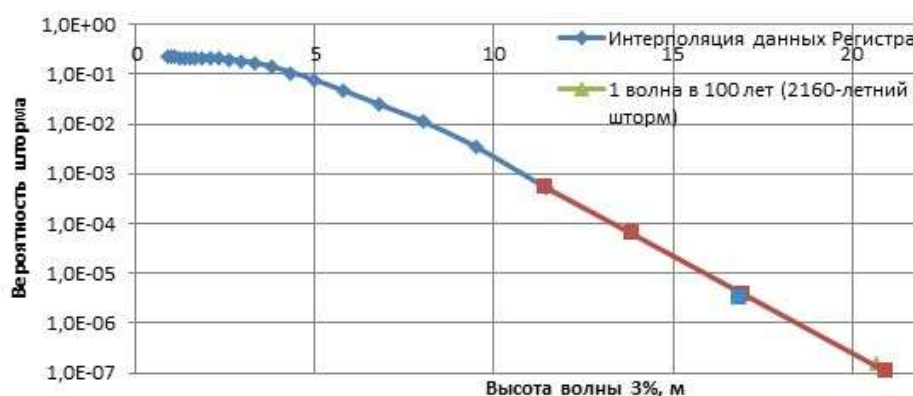


Рис. 3. Пример сопоставления кривой повторяемости волновых режимов и ее сравнение с данными справочника РС

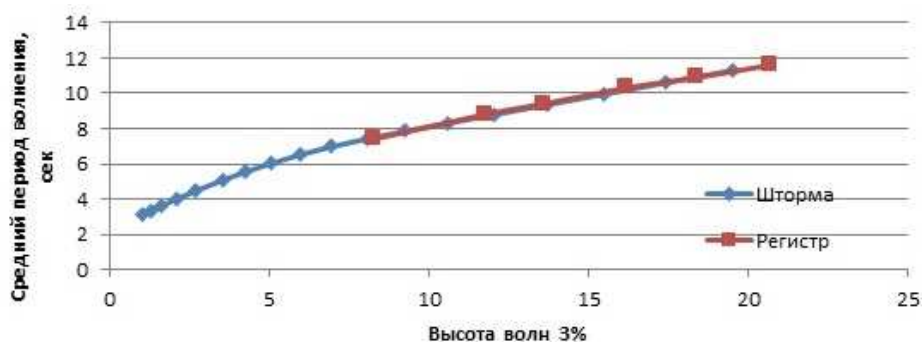


Рис. 4. Пример интерполяции зависимости средних периодов волнения от высот волн и экстраполяции этой зависимости в область малых высот волн

Таким образом, полученный набор ветроволновых режимов соответствует данным Справочника РС. Каждый режим специфицируется для 8 румбов, данные по которым представлены в Справочниках РС. Для каждого режима с учетом данных Справочника РС указана вероятность его реализации в течение длительного срока эксплуатации.

5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ FSPM В ТЕЧЕНИЕ СРОКА ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для выполнения анализа усталостной прочности якорных связей в настоящей работе используются средства математического моделирования поведения цифрового двойника исследуемого объекта под действием природных нагрузок на протяжении всего жизненного цикла этого объекта. Ввиду большой длительности жизненного цикла сооружения численное моделирование выполняется в виде последовательного изучения поведения механической системы «FSPM — танкер» на конечном наборе расчетных ситуаций. При этом каждая ситуация характеризуется своим сочетанием течения, скорости и направления ветра, высоты, периода и направления волнового воздействия. Таким образом, вся изменчивость природных нагрузок описывается конечной совокупностью ситуаций с известными параметрами внешних воздействий и вычисленной вероятностью данного режима. В качестве допущения при формировании ветроволновых расчетных режимов принимается сонаправленность действия ветра, волнения и течения. При заданном заранее ограничении на высоту волн полагается, что танкер прекращает отгрузку нефти и FSPM работает в автономном режиме, переживая экстремальное для этой системы штормовое воздействие.

Используя описанную выше схему полновероятностного моделирования, для условий заданной акватории формируется несколько сотен условно стационарных ветроволновых режимов, отличающихся

направлением действия ветроволновой нагрузки, скоростью ветра, высотой и периодом волн. Для части этих режимов поведение FSPM моделируется в автономном режиме, а в остальной части режимов исследуется поведение FSPM с пришвартованным танкером. Длительность моделирования каждой расчетной ситуации составляет 10 часов реального шторма.

В ходе воспроизведения каждого режима выполняется моделирование поведения FSPM или системы «FSPM — танкер» во временной области. При этом воспроизводится нерегулярное волнение, воздействие ветра с учетом ветровых порывов, воздействие течения. Также моделируется динамика якорных и швартовых связей, динамика трубопроводов. В каждом режиме собирается информация о циклических нагрузках во всех характерных точках якорных связей и подводных шлангов, формируется характерный набор циклических нагружений за один час, который в дальнейшем масштабируется с учетом реальной длительности подобного режима в течение одного года или всего срока службы сооружения.

Большой объем численных экспериментов, необходимый для решения данной задачи, стал возможным ввиду высокой вычислительной производительности использованного расчетного комплекса (ПК «Anchored Structures») и использования подходов параллельных вычислений, распределяющих моделируемые процессы на несколько десятков ядер персонального компьютера.

6. АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЯКОРНОЙ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате движения FSPM и танкера непрерывно изменяющиеся усилия в связях и элементах подводных шлангов провоцируют накопления повреждений, которые со временем могут вызвать разрушение связей или элементов крепления шлангов.

Обычно при анализе усталостной прочности используется гипотеза линейного накопления усталостных повреждений, в рамках которой необходимо проанализировать число циклов напряжений разного уровня в элементах конструкции и сравнить их с кривой предельного числа таких же циклов для материала, из которого изготовлен данный элемент конструкции. При полигармоническом нагружении выявление циклов нагружений является самостоятельной задачей. В настоящей работе для обработки временных диаграмм усилий (напряжений) в элементах связей используется так называемый «метод дождя» [7]. С помощью этого метода в каждом моделируемом режиме обрабатываются временные зависимости натяжения якорных связей, выявляются циклы нагружений, которые в дальнейшем ранжируются, и вычисляется число циклов каждого ранга.

Кривая усталости якорных связей регламентируется ГОСТ Р 58773—2019 [2] и представляется в виде:

$$N \cdot T^m = K, \quad (1)$$

где N — общее количество допустимых циклов натяжения T ,
 T — отношение диапазона натяжения (двойная амплитуда) к эталонному разрывному усилию элемента,
 m — обратный уклон кривой усталости $T-N$,
 K — постоянная усталости.

Формирование совокупности условно стационарных ветроволновых режимов в заданной акватории приводит к описанию L возможных разных штормов с номерами $j, j = 1 \div L$.

Шторм с индексом j моделируется в программном комплексе в течение натурального времени t_j (обычно 10 ч) и имеет вероятность возникновения p_j .

За t_j часов реализаций этого шторма в процессе моделирования динамики сооружений и связей в программном комплексе исследуемая на усталость произвольная связь имеет за этот шторм N_j циклов натяжений, причем

$$N_j = \sum_{i=1}^k n_{ji}, \quad (2)$$

где n_{ji} — число колебаний в этом шторме с размахом от $\frac{i-1}{k} A_{\max}$ до $\frac{i}{k} A_{\max}$,
 $A_{\max}$ — максимальный размах колебаний,
 k — количество групп, на которые распределяются все размахи.

Тогда годовое количество колебаний N_{1j} составляет:

$$N_{1j} = 8760 \frac{N_j p_j}{t_j}, \quad (3)$$

где 8760 — число часов в году.

Годовое повреждение связи равно:

$$D_1 = \sum_{j=1}^L \frac{N_{1j}}{N_j} \sum_{i=1}^k \frac{T_i^m n_{ji}}{K}, \quad (4)$$

где T_i^m — размах натяжения с величиной $\frac{i}{k} A_{\max}$.

Общее повреждение D , накопленное за весь срок эксплуатации плавучего объекта, определяется суммированием годовых повреждений и должно удовлетворять условию:

$$D\gamma_f \leq 1,0, \quad (5)$$

где γ_f — коэффициент безопасности усталостной долговечности, равный 3,0 для inspectируемых районов.

Подобная процедура реализуется для каждой якорной связи. Таким образом, из условия (5) нетрудно получить предельный срок эксплуатации каждой связи, при котором условие (5) еще не нарушается.

7. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ В УСЛОВИЯХ ПОСТАНОВКИ FSPM ТУРЕЛЬНОГО ТИПА В НЕЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЯХ

Рассмотренная выше методология усталостного анализа якорных систем удержания FSPM была реализована для совершенствования параметров системы удержания FSPM турельного типа, устанавливаемой в условиях южных морей.

На рис. 5 представлены геометрические модели FSPM и танкера, подготовленные в ПК «Anchored Structures». FSPM удерживается 6 якорными связями и соединяется с танкером швартовым тросом.

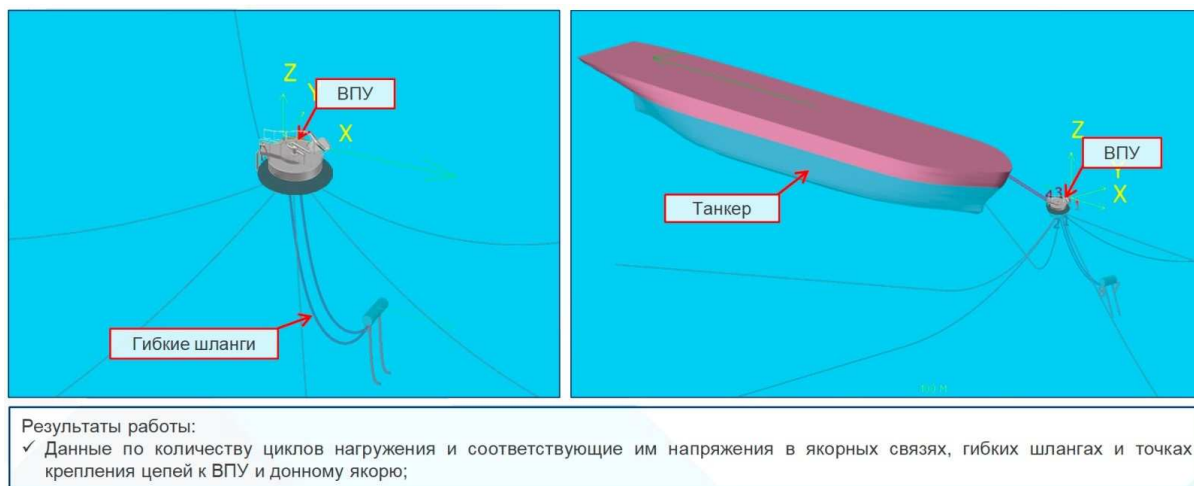


Рис. 5. Модель FSPM в различных условиях эксплуатации

Для условий района незамерзающих морей было сформировано 328 условно стационарных ветроволновых режимов, отличающихся направлением действия ветроволновой нагрузки, скоростью ветра, высотой и периодом волн.

Моделирование всех ветроволновых режимов проводилось в режиме динамики всех связей (кроме швартового троса) и трубопроводов. Статистический анализ циклических колебаний натяжений всех связей производится методом дождя. При этом производился подсчет количества колебаний различной интенсивности (размаха) в каждом шторме. После завершения всех расчетов результаты обрабатываются специальной утилитой «Анализ усталости», получающей кривую циклического нагружения каждой связи за весь период эксплуатации сооружения и сравнивающей ее с кривой усталости якорных связей данного калибра.

Выполненный инженерный анализ позволил обоснованно выбрать калибр якорных связей, а также их прочность. В табл. 1 в качестве примера приводятся итоговые результаты по усталостной долговечности якорных связей, полученные при условии отсоединения FSPM от танкера при высоте волн 3 %,

превышающей 3,5 м. Очевидно, что из-за различия ветроволновых нагрузок, действующих с различных географических направлений, значения срока службы связей существенно различаются.

Таблица 1

Срок службы якорных связей при ограничении высоты волны 3 % обеспеченности в рабочем режиме на уровне 3,5 м

Якорная связь №	1	2	3	4	5	6
Годовое повреждение	0,0111	0,0051	0,0042	0,0008	0,0089	0,0067
Срок службы, лет	29,9	65,6	79,4	403,4	37,7	50,1
Коэффициент запаса по экстремальному натяжению	5,75	6,79	5,10	6,58	5,03	4,56

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет наиболее полно учесть особенности поведения сложной механической системы, включающей в себя танкер, буй, подводные трубопроводы, вспомогательные плавучести, якорные связи под совместным действием нерегулярных нагрузок.

Численный анализ циклов нагружения якорных линий, выполняемый на протяжении всего срока эксплуатации FSPM с учетом изменения режимов его функционирования и всевозможных сочетаний нерегулярных внешних воздействий, позволяет получить наиболее полную и достоверную картину накопления усталостных повреждений в элементах системы удержания.

Разработанная методика позволяет достоверно и в приемлемые с точки зрения графика проектирования сроки определить характеристики якорных цепей. В связи с этим ее применение позволяет сократить время разработки проектной документации и повысить надежность спроектированных объектов при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023. — 471 с.
2. ГОСТ Р 58773—2019 — Сооружения нефтегазовых морских. Системы позиционирования плавучих сооружений. — М.: Стандартинформ, 2020. — 151 с.
3. Большев А.С. Математическое моделирование морских плавучих объектов в программном комплексе «Anchored Structures» / А.С. Большев, С.А. Фролов, М.А. Кутейников // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2013. — Вып. 36. — С. 68 — 90.
4. Garrison C.J., Chow P.Y. Wave forces on submerged bodies // Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. — 1972. — Vol. 98, No. WW3. — P. 375 — 392. (American Society of Civil Engineers, New York, USA.)
5. Сергеев А.Д. Динамика дискретно-континуальных механических систем: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А.Д. Сергеев. — СПб.: Институт проблем машиноведения РАН, 2006. — 328 с.
6. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2006. — 450 с.
7. Григорьева О.А. Инженерные методы оценки прочности и долговечности якорных связей и райзеров шельфовых сооружений: дис. ... канд. техн. наук / О.А. Григорьева. — СПб., 2009. — 178 с.

REFERENCES

1. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units (MODU) and Fixed Offshore Platforms of (FOP) / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023. 510 p.
2. GOST R 58773—2019 — Sooruzheniya neftegazopromyslovye morskoe. Sistemy pozitsionirovaniya plavuchikh sooruzhenii (ISO 19901-7:2013, Petroleum and natural gas industries — Specific requirements for offshore structures — Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units, MOD). Moscow: Standartinform, 2020. 151 p.
3. Bolshev A.S., Frolov S.A., Kuteynikov M.A. Mathematical modeling of floating facilities behaviour by means of the software package "Anchored Structures". *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2013. Issue 36. P. 68 — 90. (In Russ.)
4. Garrison C.J., Chow P.Y. Wave forces on submerged bodies. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*. 1972. Vol. 98, No. WW3. P. 375 — 392. (American Society of Civil Engineers, New York, USA.)
5. Sergeev A.D. Dinamika diskretno-kontinual'nykh mekhanicheskikh sistem: diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Dynamics of discrete-continuum mechanical systems: Dr. phys. and math. sci. thesis]. St. Petersburg: Institut problem mashinovedeniya RAN, 2006. 328 p.
6. Reference Data on Wind and Wave Regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2006. 450 p.
7. Grigor'eva O.A. Inzhenernye metody ocenki prochnosti i dolgovechnosti yakornykh svyazej i rajzerov shel'fovykh sooruzhenij: diss. kand. tekhn. nauk [Engineering methods for assessing the strength and durability of anchor ties and risers of offshore structures: PhD thesis]. St. Petersburg, 2009. 178 p.

УДК 629.12.073.243.4
EDN JLNBMQ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СИЛ ВТОРОГО ПОРЯДКА, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НАКРЕНЕННЫЕ ШПАНГОУТНЫЕ КОНТУРА

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: sem_viktoria@mail.ru
А.И. Динцер, инженер-конструктор 3 кат., АО «Северное ПКБ», 198096 Россия, Санкт-Петербург, Корабельная ул., 6, корп. 2, лит. А; аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; e-mail: cassraps19@gmail.com

Представлены результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов второго порядка, действующих на накрённые шпангоутные контура, на основании применения двухмерной потенциальной теории. Для определения указанных сил используется классический и модифицированный методы интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины. Проводится исследование влияния относительной глубины водоема h/T , сопоставляются результаты расчетов, полученных классическим и модифицированным методом. Также исследовано влияние изменения угла крена на нелинейные силы при постоянной величине относительной глубины h/T . Показано увеличение значений нелинейных сил при увеличении угла крена и уменьшении величины h/T .

Ключевые слова: качка судна, дифракция, мелководье, двухмерная потенциальная теория, функция Грина, метод интегральных уравнений, нелинейные силы второго порядка, угол крена.

Для цитирования: Семенова В.Ю. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на накрённые шпангоутные контура / В.Ю. Семенова, А.И. Динцер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 51 — 61. — EDN JLNBMQ.

CALCULATION OF SECOND-ORDER NON-LINEAR DIFFRACTION FORCES ACTING ON HEELED FRAME SECTIONS

V.Yu. Semenova, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

A.I. Dintser, 3 cat. Design Engineer, Severnoye Design Bureau JSC, 198096 Russia, St. Petersburg, Korabelnaya ul., 6, korp. 2, lit. A; postgraduate student, St. Petersburg State Marine Technical University, e-mail: cassraps19@gmail.com

The results of calculations of non-linear diffraction forces and moments of the second-order acting on heeled frame sections, on the basis of application of two-dimensional potential theory are presented. The classical and modified methods of integral equations for shallow water are used to determine these forces. A study of shallow waters h/T influence on diffraction forces was carried out, also, the results of calculations obtained by classical and modified methods are compared. The influence of a change in heel angle on nonlinear forces at a constant value of relative depth h/T was conducted. An increase of values of non-linear forces with increase of roll angle and decrease of magnitude h/T is shown.

Key words: ship motions, diffraction, shallow waters, two-dimensional potential theory, Green's function, method of integral equations, nonlinear forces of the second order, heel angle.

For citation: Semenova V.Yu., Dintser A.I. Calculation of second-order non-linear diffraction forces acting on heeled frame sections. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 51 — 61. EDN JLNBMQ.

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейные силы второго порядка, обусловленные дифракцией и возникающие на мелководье, были подробно изучены на основании двумерной потенциальной теории в работе Со Чжо Ту и В.Ю. Семеновой [1]. В данной работе приведены результаты расчетов дифракционных сил и моментов, действующих на различные шпангоутные контура в зависимости от изменения относительной глубины. Показано значительное увеличение данных сил при уменьшении глубины.

Между тем большой практический интерес представляет собой определение нелинейных сил, действующих на накрённые шпангоутные контура. Расчеты инерционно-демпфирующих сил первого порядка, а именно коэффициентов присоединенных масс и демпфирования для накрённых шпангоутных

сечений, были выполнены в работе Я.М. Элис [2, 3]. В работе [4] рассмотрено определение постоянных нелинейных сил второго порядка в зависимости от изменения угла крена для различных судов на основании применения гипотезы плоских сечений в условиях бесконечно глубокой жидкости.

Для определения нелинейных сил, возникающих при качке шпангоутных контуров судна на регулярном волнении, обычно используются два метода: модифицированный метод [5 — 7] и метод интегральных уравнений [8 — 10].

Однако использование комбинированного метода, основанного на конформном отображении контуров и методе гидродинамических особенностей для накрённых шпангоутных контуров, сопряжено с трудностями нахождения конформного отображения несимметричного шпангоутного контура.

Полученные в [8] результаты показали значительное влияние изменения относительной глубины h/T на все категории нелинейных сил.

Учитывая упомянутые выше особенности, в настоящей работе рассматривается определение нелинейных дифракционных сил в жидкости ограниченной глубины, действующих на накрённые шпангоутные контура, на основании классического метода интегральных уравнений и модифицированного, свободного от влияния «нерегулярных» частот, что подтверждается расчетами [11]. Особое внимание уделяется определению нелинейных сил второго порядка при изменении относительной глубины h/T .

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Предположим, что на свободной поверхности тяжелой, однородной, идеальной, несжимаемой жидкости ограниченной глубины находится фиксированный с углом крена плоский контур, имеющий форму шпангоутного сечения [8].

В настоящей работе рассматривается воздействие набегающего волнения на неподвижные накрённые контура. Поэтому для решения поставленной задачи вводятся малый параметр, характеризующий относительную амплитуду набегающего волнения:

$$\varepsilon_7 = a_w/b, \quad (1)$$

где b — полуширина шпангоутного контура;
 a_w — ордината волны.

Тогда потенциал скорости может быть представлен в виде следующей суперпозиции:

$$\Phi(\eta, \zeta, t) = \Phi^{(1)}(\eta, \zeta, t) + \Phi^{(2)}(\eta, \zeta, t) = \left(\sum_m \varepsilon_7 \phi_7^{(1)}(\eta, \zeta) \right) e^{-i\omega t} + \left(\sum_{m,k} \varepsilon_7^2 \phi_{77}^{(2)}(\eta, \zeta) \right) e^{-i2\omega t}. \quad (2)$$

Здесь [6]:

$$\Phi^{(1)}(\eta, \zeta, t) = \varepsilon_7 \phi_7^{(1)} e^{-i\omega t}, \quad \Phi^{(2)}(\eta, \zeta, t) = \varepsilon_7^2 \phi_{77}^{(2)} e^{-i2\omega t}, \quad (3)$$

где $\phi_7^{(1)} = \phi_{7S}^{(1)} + \phi_{7A}^{(1)}$ — потенциал первого порядка дифрагированного движения жидкости, его составляющие определяются согласно [8]:

$$\phi_{C7}^{(1)} = \phi_{C7S}^{(1)} + \phi_{C7A}^{(1)}; \quad (4)$$

$$\phi_{S7}^{(1)} = \phi_{S7S}^{(1)} + \phi_{S7A}^{(1)}.$$

$\phi_7^{(1)}$ — определяется на основе решения соответствующей линейной задачи;

$\phi_{77}^{(2)}$ — потенциал второго порядка, обусловленный взаимодействием набегающего и дифрагированного волнения.

Граничные условия на свободной поверхности жидкости в задачах второго порядка для потенциала скорости записывается в виде:

$$\begin{aligned} \partial \phi_{77}^{(2)} / \partial \zeta - 4v \phi_{77}^{(2)} = M_{77}^{(2)} = i\omega/2g \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial(\phi_7^{(1)} + \phi_0)}{\partial \eta}(\eta_1, 0) \right)^2 \left(\frac{\partial(\phi_7^{(1)} + \phi_0)}{\partial \zeta}(\eta_1, 0) \right)^2 \right] - \right. \\ \left. - (\phi_7^{(1)} + \phi_0) \left(\frac{\partial^2(\phi_7^{(1)} + \phi_0)}{\partial \zeta^2} - v \frac{\partial(\phi_7^{(1)} + \phi_0)}{\partial \zeta} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

В рассматриваемой задаче потенциал дифрагированного волнения представляется в виде суммы симметричной и несимметричной части. Математически это объясняется разложением экспоненты на сумму тригонометрических функций. Тогда граничное условие непротекания для симметричной и несимметричной частей имеет вид соответственно [8]:

$$\phi_{7S}^{(1)} = -\left(\zeta' \frac{\partial \phi_{0S}}{\partial \eta} + \eta' \frac{\partial \phi_{0S}}{\partial \zeta}\right); \phi_{7A}^{(1)} = -\left(\zeta' \frac{\partial \phi_{0A}}{\partial \eta} + \eta' \frac{\partial \phi_{0A}}{\partial \zeta}\right); \frac{\partial \phi_{77}^{(2)}}{\partial n} = 0, \quad (6)$$

где ϕ_0 — потенциал набегающего волнения.

Для определения потенциалов второго порядка в работе используется модифицированный метод интегральных уравнений.

Описание классического метода рассматривается в [12].

Согласно модифицированному методу, в системе интегральных уравнений

$$-\phi_{77}^{(2)}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_S \left\{ \phi_{77}^{(2)}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) \right\} ds = \left\{ \int_S F_{77}^{(2)} G^{(2)} \right\} ds + \phi_{771}, \quad (7)$$

потенциал второго порядка представляется в виде суперпозиции двух потенциалов:

$$\phi_{77}^{(2)} = \phi_{771} + \phi_{772}, \quad (8)$$

где потенциалы ϕ_{771} учитывают граничное условие на свободной поверхности, а граничное условие на контуре для потенциала ϕ_{772} записывается в следующем виде:

$$\phi_{771} = \int_{-\infty}^{\infty} M_{77}^{(2)}(\eta_1, 0) G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, 0) d\eta_1, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_{772}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{77}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{771}}{\partial n}. \quad (10)$$

$$\text{Здесь } \frac{\partial \phi_{771}}{\partial n} = \frac{\partial \psi_{771}}{\partial s},$$

где ψ_{mm1} — сопряженная с потенциалом функция тока.

$$-\phi_{772}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \phi_{772}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G^{(2)}}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \frac{\partial \phi_{772}}{\partial n} G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds. \quad (11)$$

Система интегральных уравнений (11) решается относительно второго потенциала (ϕ_{772}) с учетом граничного условия на контуре. Для потенциала, учитывающего граничное условие на свободной поверхности, используется выражение (9).

При использовании классического и модифицированного методов интегральных уравнений в условиях жидкости ограниченной глубины функция Грина второго порядка имеет вид:

$$\begin{aligned} G^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) = & 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cdot \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| - \\ & - 2\pi \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_{4k}} \cdot \frac{\mu_{4k}^2 - 16v^2}{\mu_{4k}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cos \mu_{4k}(\zeta_1 + h) e^{-\mu_{4k}|\eta - \eta_1|} - i2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \times \\ & \times \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| = G_C^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) + iG_S^{(2)}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1), \end{aligned} \quad (12)$$

где μ_{40} — положительный корень уравнения: $4v = \mu_{40} \tan h(\mu_{40}h)$, а μ_{4k} — положительный корень уравнения: $-4v = \mu_{4k} \tan(\mu_{4k}h)$.

Для численного решения системы (7) применяется подход, предложенный В. Франком [13]. Контур представляется в виде последовательности соединенных между собой N линейных сегментов длиной s_j . Вследствие этого можно перейти к системе $2N$ связанных линейных алгебраических уравнений (13), где выполнена подстановка потенциала, учитывающего граничное условие на контуре, в выражение (8) в комплексном виде: $\phi_{C77}^{(2)} = \phi_{C77}^{(2)} + \phi_{S77}^{(2)}$

$$\begin{aligned} -2\pi\phi_{C77}^{(2)}(\eta_i, \zeta_i) + \sum_{j=1}^N \phi_{C77}^{(2)}(\eta_i, \zeta_i) I_{ij}^{(77)} - \sum_{j=1}^N \phi_{S77}^{(2)} J_{ij}^{(77)} &= \sum_{j=1}^N F_{77C}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) K_{ij}^{(77)} - \sum_{j=1}^N F_{77S}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) L_{ij}^{(77)} + \phi_{C771}(\eta_i, \zeta_i); \\ -2\pi\phi_{C77}^{(2)}(\eta_i, \zeta_i) + \sum_{j=1}^N \phi_{C77}^{(2)}(\eta_i, \zeta_i) I_{ij}^{(77)} - \sum_{j=1}^N \phi_{S77}^{(2)} J_{ij}^{(77)} &= \sum_{j=1}^N F_{77C}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) L_{ij}^{(77)} - \sum_{j=1}^N F_{77S}^{(2)}(\eta_j, \zeta_j) K_{ij}^{(77)} + \phi_{S771}(\eta_i, \zeta_i); \end{aligned} \quad (13)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$.

Коэффициенты I_{ij} , J_{ij} , K_{ij} , L_{ij} в условиях жидкости ограниченной глубины определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} I_{ij} &= \int_{s_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \times \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cdot \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| - \right. \\ &\quad \left. - 2\pi \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_{4k}} \cdot \frac{\mu_{4k}^2 - 16v^2}{\mu_{4k}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cos \mu_{4k}(\zeta_1 + h) e^{-\mu_{4k}|\eta - \eta_1|} \right\} ds; \end{aligned} \quad (14)$$

$$J_{ij} = - \int_{s_j} \left[n_{\eta_1} \frac{\partial}{\partial \eta_1} + n_{\zeta_1} \frac{\partial}{\partial \zeta_1} \right] \times \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cdot \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \cos \mu_{40}|\eta - \eta_1| \right\} ds; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} K_{ij} &= F_m(\eta_j, \zeta_j) \int_{s_j} \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cdot \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| - \right. \\ &\quad \left. - 2\pi \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_{4k}} \cdot \frac{\mu_{4k}^2 - 16v^2}{\mu_{4k}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cos \mu_{4k}(\zeta_1 + h) e^{-\mu_{4k}|\eta - \eta_1|} \right\} ds; \end{aligned} \quad (16)$$

$$L_{ij} = F_m(\eta_j, \zeta_j) \int_{s_j} \left\{ 2\pi \frac{1}{\mu_{40}} \cdot \frac{\mu_{40}^2 - 16v^2}{\mu_{40}^2 h - 16v^2 h + 4v} \cosh \mu_{40}(\zeta + h) \cdot \cosh \mu_{40}(\zeta_1 + h) \sin \mu_{40}|\eta - \eta_1| \right\} ds; \quad (17)$$

где $m = 7$;
 h — глубина жидкости.

Наибольшие трудности при определении нелинейных сил и моментов второго порядка представляет вычисление интеграла (13), учитывающего нелинейное граничное условие на свободной поверхности жидкости, связанное с осциллирующим характером функций на бесконечном удалении от контура.

Для их определения и корректного учета нелинейного граничного условия на свободной поверхности необходим специальный прием [6], согласно которому потенциалы ϕ_{771} и соответствующие функции тока ψ_{771} определяются на основании выражения:

$$\phi_{771} = A_{77}^{(2)} \left(A_{\phi} - \frac{i}{\pi} B_{\phi} \right) + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{M}_{77} - A_{77}^{(2)}) G_C^{(2)} dl + i \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{M}_{77} - A_{77}^{(2)}) G_S^{(2)} dl; \quad (18)$$

$$\psi_{771} = A_{77}^{(2)} \left(A_{\psi} - \frac{i}{\pi} B_{\psi} \right) + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{M}_{77} - A_{77}^{(2)}) \tilde{G}_C^{(2)} dl + \int_{-\infty}^{\infty} (\tilde{M}_{77} - A_{77}^{(2)}) \tilde{G}_S^{(2)} dl; \quad (19)$$

$$\text{где} \quad A_{\phi} = \frac{\cosh 2\mu_0(\zeta + h)(\cos 2\mu_0\eta + i \sin 2\mu_0\eta)}{\cosh 2\mu_0 h (2\mu_0 \tanh 2\mu_0 h - 4v)}; \quad (20)$$

$$B_{\phi} = \frac{1}{2\mu_0 \tanh 2\mu_0 h - 4v} \int_0^{\infty} \frac{\cosh k(\zeta + h) \cos k\eta}{k \tanh kh - 2\mu_0} dk + \frac{1}{2\mu_0 \tanh 2\mu_0 h - 4v} \int_0^{\infty} \frac{\cosh k(h - \zeta) \cos k\eta}{k \tanh kh - 2\mu_0} dk \quad (21)$$

$$A_{\psi} = \frac{\sinh 2\mu_0(\zeta + h)(-\sin 2\mu_0\eta + i \cos 2\mu_0\eta)}{\cosh 2\mu_0 h (2\mu_0 \tanh 2\mu_0 h - 4v)}; \quad (22)$$

$$B_{\Psi} = \frac{1}{2\mu_0 \tanh 2\mu_0 h - 4v} \int_0^{\infty} \frac{\sinh k(\zeta + h) \sin k\eta}{k \tanh kh - 2\mu_0} dk + \frac{1}{2\mu_0 \tanh 2\mu_0 h + 4v} \int_0^{\infty} \frac{\sinh k(h - \zeta) \sin k\eta}{k \tanh kh - 2\mu_0} dk \quad (23)$$

$$A_{77}^{(2)} = A_{77S}^{(2)} + A_{77A}^{(2)} = i \frac{g}{2\omega} \{ (3\mu_0^2 - 3v^2) e^{i2\mu_0\eta} (A_{7S}^2 e^{i2\delta_{7S}} + A_{7A}^2 e^{i2\delta_{7A}} + iA_{7S} e^{i\delta_{7S}} + iA_{7A} e^{i\delta_{7A}}) - (3\mu_0^2 - 3v^2) \cos 2\mu_0\eta + \} \quad (24)$$

$$+ i \frac{g}{2\omega} \{ (3\mu_0^2 - 3v^2) e^{i2\mu_0\eta} (A_{7S} e^{i2\delta_{7S}} + A_{7A} e^{i2\delta_{7A}}) + (6\mu_0^2 - 6v^2) A_{7S} A_{7A} \} e^{i(2\mu_0\eta + \delta_{7S} + \delta_{7A})} - (3\mu_0^2 - 3v^2) \sin 2\mu_0\eta.$$

где A_m — амплитуда;
 δ_m — фаза;
 v, μ_0 — волновое число.

После определения потенциалов второго порядка можно перейти к определению гидродинамических дифракционных сил и моментов.

При дифракции на контур действуют нелинейные силы и моменты [8]:

нелинейные горизонтальные силы:

$$F_{H77}^{(2)} = \rho e^{-i2\omega t} \int_{s_j} \left[-i2\omega(\phi_{77S}^{(2)} + \phi_{77A}^{(2)}) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{77S}^{(1)}}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \phi_{77A}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{77S}^{(1)}}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \phi_{77A}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right] \zeta' ds - 2\rho g \frac{\omega^2}{g^2} (\partial \phi_{77S}^{(1)} \partial \phi_{77A}^{(1)}) e^{-i2\omega t}, \quad (25)$$

нелинейные вертикальные силы:

$$F_{V77}^{(2)} = \rho e^{-i2\omega t} \int_{s_j} \left[-i2\omega(\phi_{77S}^{(2)} + \phi_{77A}^{(2)}) + \frac{1}{4} \left(\left(\frac{\partial \phi_{77S}^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{77A}^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{77S}^{(1)}}{\partial \zeta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{77A}^{(1)}}{\partial \zeta} \right)^2 \right) \right] \eta' ds - \quad (26)$$

$$- \rho g \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g^2} (\partial \phi_{77S}^{(1)2} + \partial \phi_{77A}^{(1)2}) e^{-i2\omega t} \operatorname{ctg} \alpha_1 - \rho g \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g^2} (\partial \phi_{77S}^{(1)2} + \partial \phi_{77A}^{(1)2}) e^{-i2\omega t} \operatorname{ctg} \alpha_2,$$

нелинейные моменты:

$$M_{X77}^{(2)} = -\rho e^{-i2\omega t} \int_{s_j} \left[-i2\omega(\phi_{77S}^{(2)} + \phi_{77A}^{(2)}) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{77S}^{(1)}}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \phi_{77A}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{77S}^{(1)}}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \phi_{77A}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right] (\eta\eta' + \zeta\zeta') ds + \quad (27)$$

$$+ \rho g b_1 \frac{\omega^2}{g^2} (\partial \phi_{77S}^{(1)} \partial \phi_{77A}^{(1)}) e^{-i2\omega t} \operatorname{ctg} \alpha_1 - \rho g b_2 \frac{\omega^2}{g^2} (\partial \phi_{77S}^{(1)} \partial \phi_{77A}^{(1)}) e^{-i2\omega t} \operatorname{ctg} \alpha_2.$$

В формулах (24) — (26) обозначено:

$$\operatorname{ctg} \alpha = d\eta/d\zeta; \quad \zeta' = \cos(n, y) = d\zeta/ds_j; \quad \eta' = -\cos(n, z) = d\eta/ds_j.$$

где η_1, ζ_1 — координаты шпангоутного контура;

b_1, b_2 — полуширина контура с правой и левой стороны;

α_1, α_2 — углы наклона сегмента шпангоутного контура с правой и левой стороны относительно горизонта.

$$\phi_{77S}^{(1)} = \phi_{0S} + \phi_{7A}^{(1)};$$

$$\phi_{77A}^{(1)} = \phi_{0A} + \phi_{7S}^{(1)}.$$

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

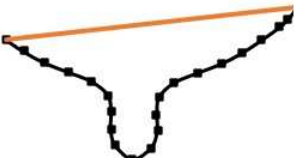
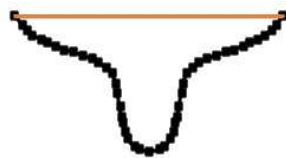
Для расчета нелинейных горизонтальных (F_H), вертикальных (F_V) сил и моментов (M), возникающих при дифракции волнения от шпангоутных контуров, разработаны четыре программы на основе:

- 1) классического метода интегральных уравнений для жидкости неограниченной глубины (КГ);
- 2) модифицированного метода интегральных уравнений для жидкости неограниченной глубины (МГ);
- 3) классического метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины при $h/T = 10$ (КМ);
- 4) модифицированного метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины при $h/T = 10$ (ММ).

Характеристики шпангоутных контуров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики шпангоутных контуров

№	Тип контура	B , м	T , м	δ	S , м ²
1		22,5	17	0,43	145
2		21	3	0,72	45,2
3		4,5	3,5	0,51	8,1
4		4,8	2	0,95	9,6
5		16,4	7	0,41	4,7
6		8,4	2,2	0,45	12

2.1 Анализ результатов расчета нелинейных сил второго порядка

Система координат представлена на рис. 1.

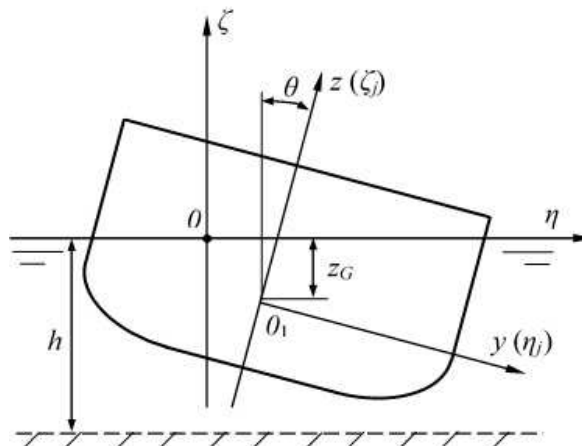


Рис. 1. Схема системы координат в задаче о колебаниях плоского контура

На рис. 2 — 4 приведены наиболее показательные результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов второго порядка четырьмя указанными выше методами.

Из представленных графиков видно, что результаты расчетов нелинейных сил и моментов, полученных на основании применения классического метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины (КМ), и результаты, полученные на основании применения модифицированного метода (ММ), имеют общие закономерности. Для глубоководных методов наблюдается аналогичная зависимость между методами.

Для зависимостей нелинейных горизонтальных, вертикальных дифракционных сил второго порядка и моментов, полученных на основании применения классических методов интегральных уравнений (КМ, КГ), характерно влияние «нерегулярных» частот, что требует дальнейшей аппроксимации результатов. Применение модифицированных методов (ММ, МГ) позволяет в большинстве случаев избежать негативного влияния «нерегулярных» частот.

На рис. 5 — 7 приведены наиболее показательные результаты расчетов нелинейных гидродинамических сил и моментов второго порядка модифицированным методом интегральных уравнений на мелководье (ММ) в зависимости от изменения относительной глубины h/T .

Анализ полученных результатов показывает, что для нелинейных дифракционных горизонтальных сил характерно увеличение амплитудных значений при уменьшении относительной глубины. Например, для контура 1 при частоте $\omega = 1,5$ нелинейная горизонтальная сила при $h/T = 1,5$ в 2 раза больше аналогичной силы, возникающей при $h/T = 5$, и в 3 раза больше, чем при относительной глубине $h/T = 10$ (рис. 5б).

Для нелинейных дифракционных вертикальных сил наибольшее влияние уменьшения относительной глубины также приводит к увеличению их амплитудных значений.

Нелинейные моменты, в свою очередь, имея аналогичную нелинейным силам тенденцию к уменьшению амплитудных значений при увеличении относительной глубины h/T от 1,5 до 10, лишены воздействия «нерегулярных» частот (рис. 7а).

Нелинейные силы и моменты для различных типов контуров при $h/T = 1,25$ могут быть в 6 раз больше соответствующих сил, имеющих место при $h/T = 10$ (рис. 5б, 6б). Для большинства контуров в зоне частот $\omega < 1$ влияние изменения относительной глубины h/T на нелинейные силы и моменты значительно уменьшается (рис. 5 — 7).

На рис. 8 — 10 приведены сравнительные результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов второго порядка, приведенных на рис. 5 — 7, в зависимости от изменения угла крена θ для постоянной величины относительной глубины h/T .

Из представленных результатов видно, что все нелинейные силы и моменты в большинстве случаев возрастают при увеличении угла крена. В некоторых случаях нелинейные силы, имеющие место при угле крена 30° в 5 — 6 раз больше соответствующих сил, имеющих место при угле крена 10° (рис. 9б, 10б).

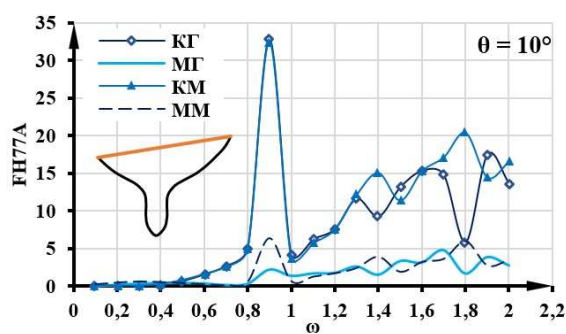


Рис. 2а. Асимметричная часть горизонтальных дифракционных сил второго порядка контура 1

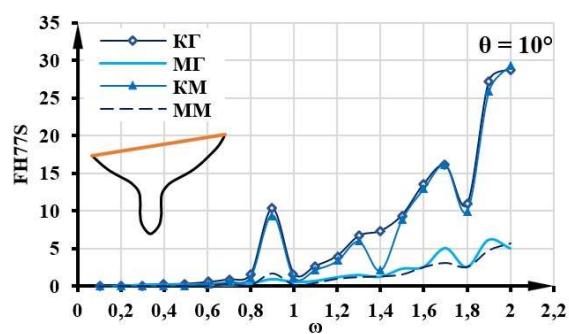


Рис. 2б. Симметричная часть горизонтальных дифракционных сил второго порядка контура 1

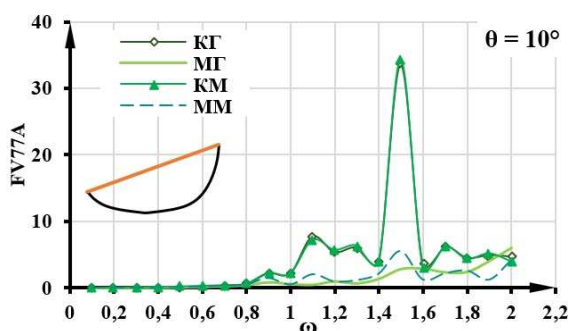


Рис. 3а. Асимметричная часть вертикальных дифракционных сил второго порядка контура 2

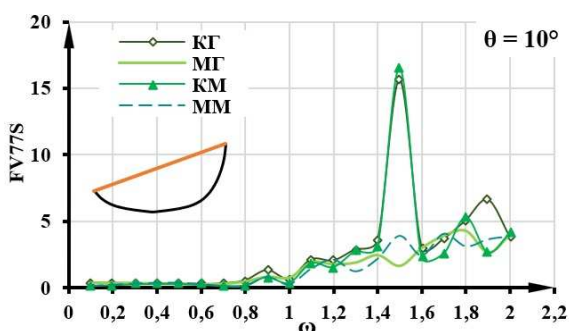


Рис. 3б. Симметричная часть вертикальных дифракционных сил второго порядка контура 2

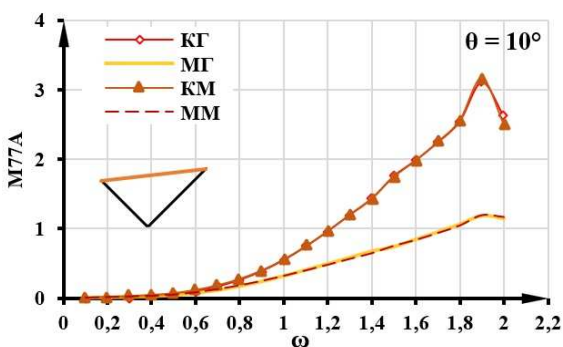


Рис. 4а. Асимметричная часть дифракционных моментов второго порядка контура 3

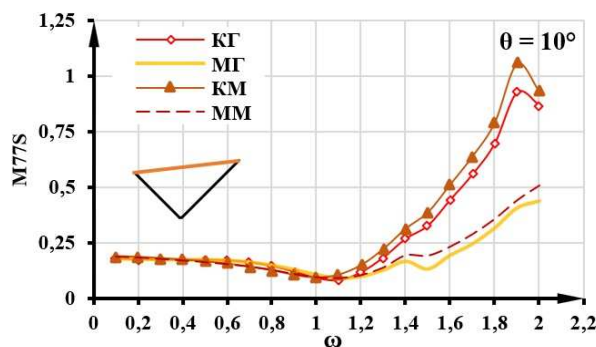


Рис. 4б. Симметричная часть дифракционных моментов второго порядка контура 3

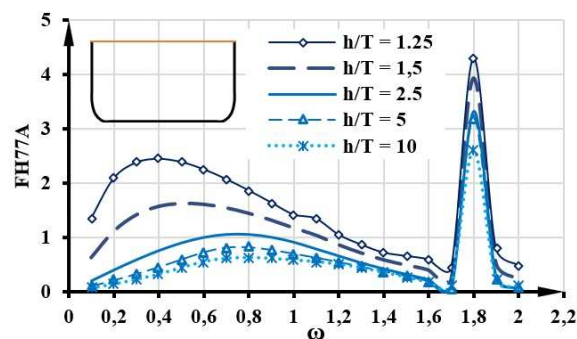


Рис. 5а. Асимметричная часть горизонтальных дифракционных сил второго порядка контура 4

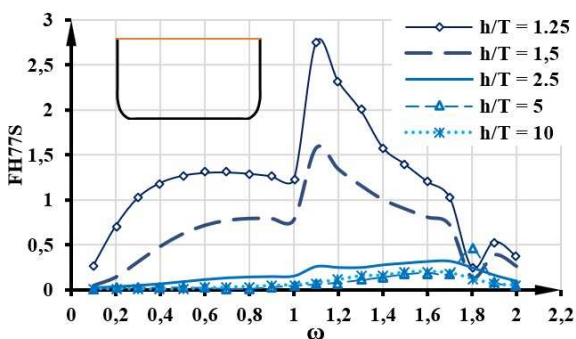


Рис. 5б. Симметричная часть горизонтальных дифракционных сил второго порядка контура 4

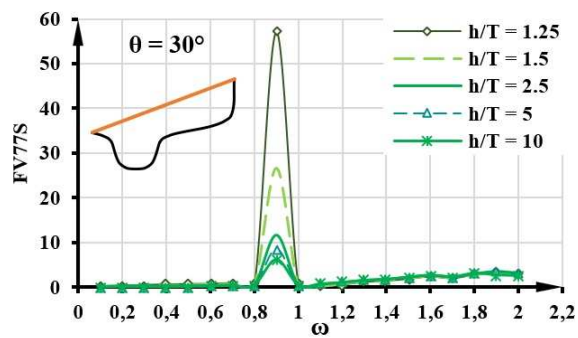


Рис. 6а. Асимметричная часть вертикальных дифракционных сил второго порядка контура 5

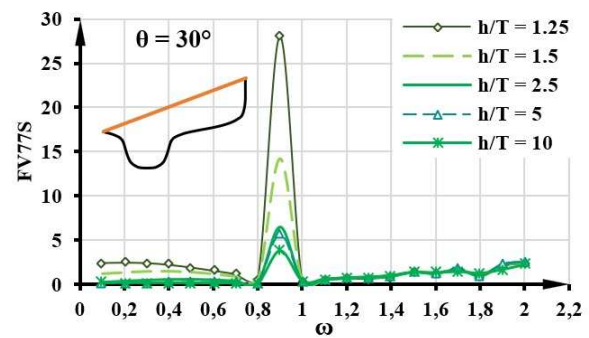


Рис. 6б. Симметричная часть вертикальных дифракционных сил второго порядка контура 5

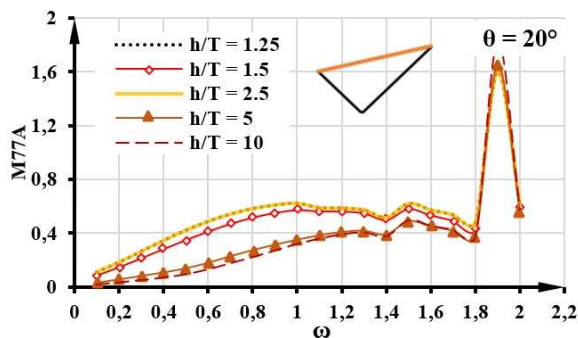


Рис. 7а. Асимметричная часть дифракционных моментов второго порядка контура 3

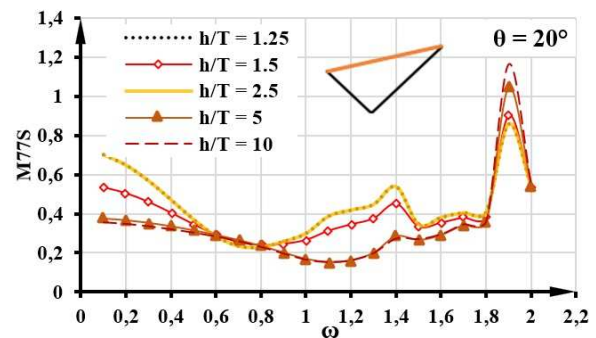


Рис. 7б. Симметричная часть дифракционных моментов второго порядка контура 3

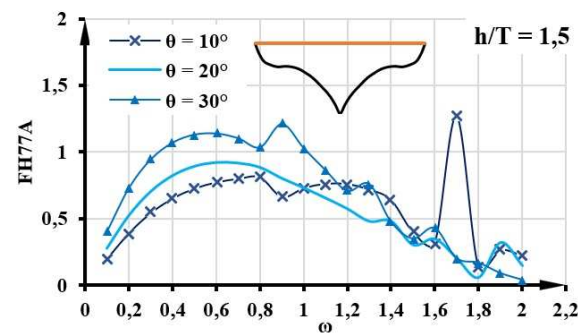


Рис. 8а. Асимметричная часть горизонтальных дифракционных сил второго порядка контура 6

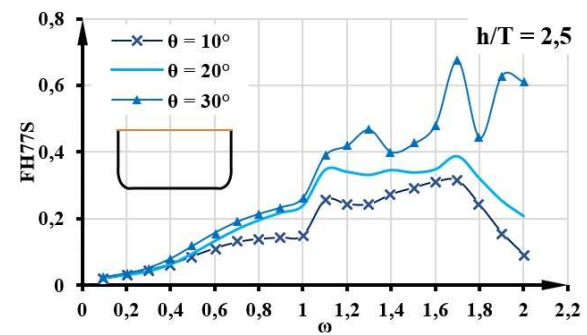


Рис. 8б. Симметричная часть горизонтальных дифракционных сил второго порядка контура 4

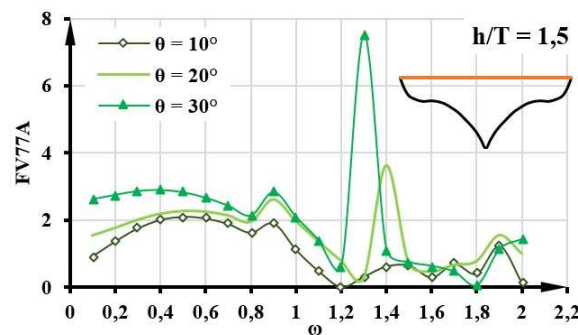


Рис. 9а. Асимметричная часть вертикальных дифракционных сил второго порядка контура 6

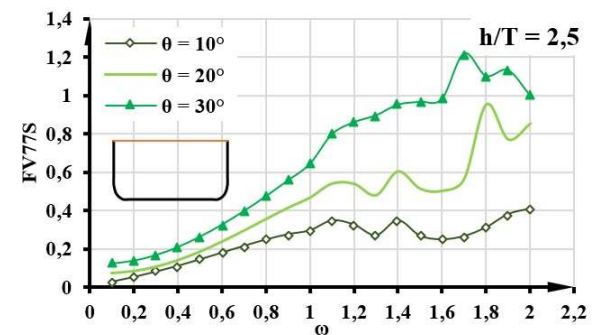


Рис. 9б. Симметричная часть вертикальных дифракционных сил второго порядка контура 4

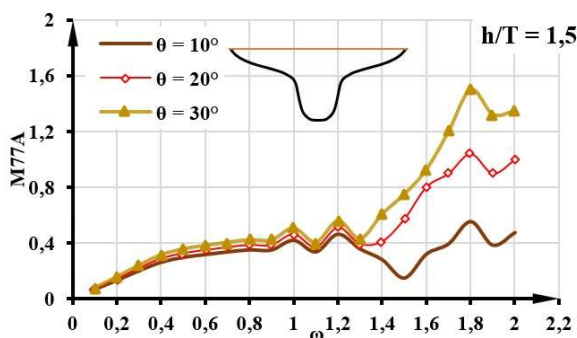


Рис. 10а. Асимметричная часть дифракционных моментов второго порядка контура 5

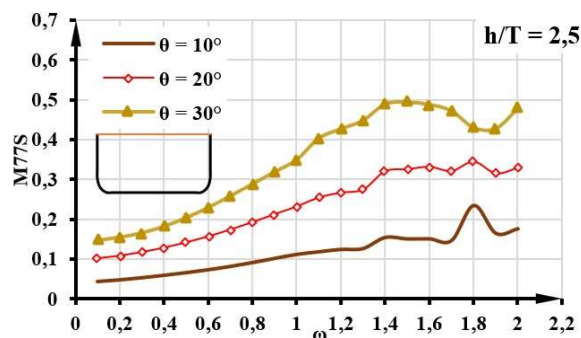


Рис. 10б. Симметричная часть дифракционных моментов второго порядка контура 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено влияние относительной глубины на нелинейные силы, обусловленные дифракцией волнения от шпангоутного контура. На основе произведенных расчетов получены следующие результаты:

- применение модифицированного метода интегральных уравнений для расчета нелинейных сил второго порядка позволяет избежать отрицательного влияния нерегулярных частот на значения данных величин, характерных для классического метода интегральных уравнений для жидкости ограниченной глубины;
- уменьшение относительной глубины h/T приводит к увеличению нелинейных сил и моментов при различных углах крена;
- увеличение угла крена при постоянной глубине также приводит к увеличению дифракционных нелинейных сил и моментов.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при расчете нелинейных сил и моментов второго порядка, действующих на накренные судна в условиях мелководья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Со Чжо Ту. Расчет нелинейной поперечной качки судна на мелководье / Со Чжо Ту, В.Ю. Семенова // Морские интеллектуальные технологии. — 2013. — № 2(20). — С. 28 — 33.
2. Элис Я.М. Присоединенные массы и демпфирование поперечных сечений накренного судна / Я.М. Элис // Труды КТИРПИХ. — Калининград, 1980. — Вып. 90.
3. Элис Я.М. Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при продольной качке судна с креном / Я.М. Элис // Труды КТИРПИХ. — Калининград, 1978. — Вып. 54.
4. Семенова В.Ю. Определение возмущающих сил и сил волнового дрейфа, возникающих при поперечной качке накренного судна / В.Ю. Семенова, И.К. Баканов, В.А. Голуб // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 3(45), т. 2. — С. 31 — 38.
5. Семенова В.Ю. Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости: дис. ... канд. техн. наук / В.Ю. Семенова; СПбГМТУ. — 1999.
6. Семенова В.Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов: дис. ... д-ра техн. наук / В.Ю. Семенова; СПбГМТУ. — 2005.
7. Lee C.M. The second-order theory of heaving cylinders in a free surface / C.M. Lee // Journal of Ship Research. — 1968. — Vol. 12. — P. 313 — 327.
8. Со Чжо Ту. Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье: дис. ... канд. техн. наук / Со Чжо Ту; СПбГМТУ. — 2014.
9. Со Чжо Ту. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечной качке контура на тихой воде в условиях мелководья / Со Чжо Ту, В.Ю. Семенова // Морские интеллектуальные технологии. — 2012 — № 2(16). — С. 22 — 26.
10. Potash R.L. Second-order theory of oscillating cylinders / R.L. Potash // Journal of ship research. — 1971. — Vol. 15, No. 4. — P. 295 — 324.
11. Семенова В.Ю. Использование модифицированного метода интегральных уравнений для определения нелинейных сил, возникающих при качке судна на мелководье / В.Ю. Семенова, В.А. Голуб // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — № 4, т. 2. — С. 46 — 55.
12. Семенова В.Ю. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях накренных шпангоутных контуров / В.Ю. Семенова, Н.В. Никитин, А.И. Динцер // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 2, т. 1. — С. 48 — 56.
13. Frank W.F. Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids. / Naval Ship Research and Development Center. Washington, D.C. — Rep. 2375. — Oct. 1967.

REFERENCES

1. So Chzho Tu, Semenova V.Yu. The calculation of the nonlinear transverse ship motions in the shallow water. *Marine intellectual technologies*. 2013. No. 2 (20). P. 28 — 33. (In Russ.)
2. Elis Ya.M. Prisoedinennye massy i dempfirovanie poperechnykh secheniy nakrenennogo sudna [Added mass and damping of heeled ship cross-sections]. Kaliningrad, 1980. (Trudy KTIRPiKh. Vyp. 90.)
3. Elis Ya.M. Gidrodinamicheskie davleniya, prisoedinennye massy i koeffitsienty dempfirovaniya prirodol'noy kachke sudna s krenom [Hydrodynamic pressures, added masses and damping coefficients during longitudinal ship motions with list]. Kaliningrad, 1978. (Trudy KTIRPiKh. Vyp. 54.)
4. Semenova V.Yu., Bakanov I.K., Golub V.A. The determination of the exciting forces and wave drift forces arising during lateral motions of the heeled ship. *Marine intellectual technologies*. 2019. No. 3 (45), vol. 2. P. 31 — 38. (In Russ.)
5. Semenova V.Yu. Issledovanie i razrabotka programm rascheta nelineynykh gidrodinamicheskikh sil, voznikayushchikh pri kolebaniyakh konturov korabel'noy formy na svobodnoy poverkhnosti zhidkosti: diss. kand. tekhn. nauk [Research and development of programs for calculating nonlinear hydrodynamic forces arises for oscillating ship's frame sections on the free surface of a liquid: PhD (Eng.) thesis] / SPbGMTU. 1999.
6. Semenova V.Yu. Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov: diss. dokt. tekhn. nauk [Development of a method for calculating nonlinear motions of ships: DSc thesis] / SPbGMTU. 2005.
7. Lee C.M. The second-order theory of heaving cylinders in a free surface. *Journal of ship research*. 1968. Vol. 12. P. 313 — 327.
8. So Chzho Tu. Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovod'e: diss. kand. tekhn. nauk [Development of a method for calculating nonlinear second-order forces arising during the motions of a ship in shallow water: PhD (Eng.) thesis] / SPbGMTU. 2014.
9. So Chzho Tu, Semenova V.Yu. Determination of nonlinear second-order forces acting on the cylinders performing transverse oscillations in the calm, shallow water. *Marine intellectual technologies*. 2012. No. 2 (16). P. 22 — 26. (In Russ.)
10. Potash R.L. Second-order theory on oscillating cylinders. *Journal of ship research*. 1971. Vol. 15, No. 4. P. 295 — 324.
11. Semenova V.Yu., Golub V.A. Application of the modified method of integral equations for determination of the non-linear forces resulting from motions of a ship in shallow water. *Marine intellectual technologies*. 2017. No. 4, vol. 1. P. 46 — 55. (In Russ.)
12. Semenova V.Yu., Nikitin N.V., Dintser A.I. Calculation of second-order non-linear forces acting on heeled frame sections for sway, heave and ship roll motions. *Marine intellectual technologies*. 2024. № 2, vol. 1. P. 48 — 56. (In Russ.)
13. Frank W.F. Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids / Naval Ship Research and Development Center. Washington, D.C. — Rep. 2375. — Oct. 1967.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.015
EDN KPHZEO

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ МЕМБРАННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Д.С. Ватолин, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: vatolinds@gumrf.ru

Появившиеся почти полвека назад мембранные системы хранения сжиженного природного газа оказали значительное влияние на морскую отрасль транспортировки углеводородов. Среди более чем 600 СПГ-танкеров, построенных на сегодняшний день, более 80 % оборудованы мембранными грузовыми системами. В данной статье производится анализ развития конструкции грузовых танков, построенных по мембранной технологии, с целью определения их дальнейших перспектив. В основу статьи положены материалы по опыту эксплуатации грузовых систем компании Gaz Transport & Technigaz (по сути, являющейся монополистом в данной отрасли на сегодняшний день), находящиеся в открытом доступе.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, мембранная грузовая система, СПГ-танкер, мембранная система хранения груза.

Для цитирования: Ватолин Д.С. Ретроспективный анализ развития судовых мембранных систем хранения сжиженного природного газа / Д.С. Ватолин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 62 — 69. — EDN KPHZEO.

A RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF MARINE MEMBRANE CARGO CONTAINMENT SYSTEMS FOR LIQUEFIED NATURAL GAS

D.S. Vatolin, PhD, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: vatolinds@gumrf.ru

Introduced nearly half a century ago, membrane cargo containment systems for liquefied natural gas have had an impact on the marine hydrocarbon industry. Of the more than 600 LNG-tankers built to date, more than 80 % are equipped with membrane cargo systems. This article presents an analysis of the development of membrane technology of cargo tanks to determine their progress. The article is based on the operating experience of Gaz Transport & Technigaz cargo systems published in open access.

Key words: liquefied natural gas, membrane cargo system, LNG tanker, membrane cargo containment system.

For citation: Vatolin D.S. A retrospective analysis of the development of marine membrane cargo containment systems for liquefied natural gas. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 62 — 69. EDN KPHZEO.

ВВЕДЕНИЕ

В 1963 г. было организовано совместное предприятие Gaz de France и NYK Line под названием Technigaz (TZ). Оно было создано для разработки новой технологии транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) с применением профилированной мембраны. Уже в 1964 г. экспериментальное судно «Pythagor» было оборудовано первой в мире мембранной системой хранения СПГ Mark I вместимостью 630 м³.

Также в 1963 г. Worms Group получили патент на криогенную мембрану, изготовленную из материала с низким коэффициентом температурных расширений, под торговой маркой Invar®. В 1965 г. Worms Group создают акционерное общество Gaztransport (GT) с целью проектирования и постройки криогенных грузовых систем — первым проектом стало экспериментальное судно для перевозки сжиженного пропана «Hippolyte Worms». В 1969 г. были введены в эксплуатацию СПГ-танкеры «Polar Alaska» и «Arctic Tokyo», оборудованные шестью призматическими танками GT No.82 вместимостью 71 500 м³.

Описанные выше события оказались важным шагом в развитии отрасли морской транспортировки природного газа. Согласно исследованиям компании Shell, мировая торговля СПГ в 2023 г. составила 404 миллиона тонн, а к 2040 г. ожидается ее увеличение более чем на 50 %. На сегодняшний день построено более 600 СПГ-танкеров, и более 80 % из них оборудованы мембранными системами хранения груза.

За последние 60 лет мембранные грузовые системы претерпели значительные изменения в конструкции, что связано с повышением безопасности и эффективности транспортировки природного газа. Целью данной статьи является анализ опыта эксплуатации существующих судовых мембранных систем хранения СПГ для определения основных факторов их дальнейшего развития.

1. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОТ СЛОШИНГА

Особенность мембранных грузовых систем заключается в том, что они не являются самонесущей конструкцией. Внутренней поверхностью грузового танка является тонкая мембрана, которая крепится к первичной теплоизоляции, — вместе они образуют первичный барьер. В соответствии с Международным кодексом постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекс МГК), если температура груза при атмосферном давлении ниже –10 °С, должен быть предусмотрен полный вторичный барьер [1]. Вторичный барьер также образуется из изолирующей мембраны и изоляции и находится между внутренней частью корпуса судна и первичным барьером (рис. 1). В конечном итоге первичный барьер крепится ко вторичному, а уже вторичный барьер крепится к жесткому корпусу судна.

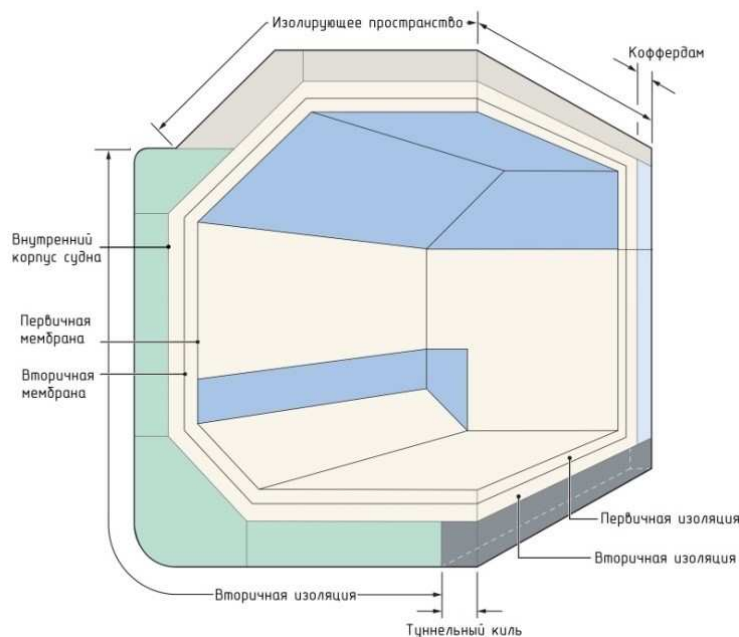


Рис. 1. Принципиальная схема мембранной грузовой системы

Толщина же самой мембраны составляет от 0,7 мм до 1,5 мм у различных грузовых систем (см. табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики существующих судовых мембранных систем хранения СПГ

	BOR*	Первичная мембрана	Первичный барьер	Вторичная мембрана	Вторичный барьер
GT NO96 L03+	0,10 %	Invar® — 0,7 мм	Минеральная вата и полиуретановая пена — 230 мм	Invar® — 0,7 мм	Минеральная вата и полиуретановая пена — 300 мм
Mark III Flex+	0,07 %	SUS304L — 1,2 мм	Полиуретановая пена — 100 мм	Triplex®	Полиуретановая пена — 380 мм
KC-1	0,12 %	SUS304L — 1,5 мм	Фанера — 12 мм	SUS304L — 1,5 мм	Полиуретановая пена — 256,6 мм
*Скорость образования отпарного газа выражают коэффициентом BOR (англ. boil-off rate) [2]					

Основными положительными свойствами данного дизайна являются снижение времени и стоимости постройки грузовой системы, а также уменьшение необходимого времени для захлаживания грузовых танков (ГТ) по сравнению с толстостенными системами типа MOSS. Главным негативным фактором для рассматриваемых систем является образование большой свободной поверхности груза, что может привести к повреждению тонкой мембраны и теплоизоляции в результате слошинга.

Слошингом называют интенсивные колебания свободной поверхности жидкости, которые возникают в емкости при качке. В результате колебаний на поверхности жидкости образуются волны, которые ударяют в стенки емкости и приводят к возникновению нагрузок. Термин происходит от английского слова sloshing — «плескание», «выплескивание» [3].

Впервые с эффектом слошинга столкнулись в 1969 г. во время первого балластного перехода СПГ-танкера «Polar Alaska». ГТ № 1 оставался заполненным приблизительно на 20 % для захлаживания остальных пяти танков перед следующей погрузкой. Возник резонанс между частотами перемещения в пространстве судна и движения жидкости, в результате чего произошли сильнейшие удары по стенкам танка в продольном направлении. Герметичность первичной мембраны ГТ № 1 была нарушена. При последующей инспекции танка было выявлено, что образовавшееся волнение внутри танка привело к повреждению грузового насоса, отколовшиеся элементы которого пробили мембрану в нескольких местах.

Спустя два года во время 29-го балластного перехода однотипное судно «Arctic Tokyo» с аналогичным количеством груза в ГТ № 1 попало в два последовательных тайфуна. В результате сильных ударных нагрузок образовалось четыре локальные деформации теплоизоляции под первичной мембраной. Все четыре деформации были расположены на высоте свободной поверхности жидкости в углах у кормовой стенки танка. Одна из деформаций разрушила 15-миллиметровый сварочный шов первичной мембраны.

Описанные выше случаи привели к появлению первых требований по допустимой высоте взлива груза, так как период собственных колебаний жидкости в ГТ (T) зависит от высоты заполнения танка (h) следующим образом [4]:

$$T = 2\pi \sqrt{(l/\pi g) \times (l/th(\pi h/l))}, \quad (1)$$

где l — характерная длина свободной поверхности (равная длине ГТ в случае продольного резонанса и ширине ГТ в случае поперечного резонанса), м;
 g — ускорение свободного падения м/с².

Также было произведено несколько дополнительных стендовых исследований. Стенд (так называемый гексапод) представляет собой уменьшенную модель грузового танка, заполненного подкрашенной жидкостью, которая установлена на платформу с шестью степенями свободы, способную симулировать качку заданной интенсивности. По результатам этих испытаний классификационные общества рекомендовали ГТ изменить верхние фаски грузовых танков в поперечном сечении, уменьшив их с ~9,0 м по высоте (как это было реализовано в предыдущем поколении грузовых систем) до ~3,0 м и расположив под наклоном в 45°. Данные требования были реализованы в грузовой системе GT No 85.

Опыт эксплуатации судов с грузовой системой GT No 85 показал, что поперечное воздействие груза на танки с малыми фасками может быть более сильным, чем продольное. В 1978 г. во время планового докования судна «Larbi Ben M'Hidi» были обнаружены множественные деформации теплоизоляции под первичной мембраной во всех пяти грузовых танках. В общей сложности было повреждено 45 ящиков с

изоляции в верхней части грузовых танков: в ГТ № 1 — 12 шт., в ГТ № 2 — 11 шт., в ГТ № 3 — 13 шт., в ГТ № 4 — 3 шт. и в ГТ № 5 — 6 шт. По результатам данного инцидента был произведен анализ профиля грузовых танков, который показал, что в результате уменьшения верхних фасок уровень воздействия свободной поверхности при заполнении грузового танка на 95 % от его общей высоты оказывается значительно выше, чем при его заполнении на 20 % [5]. Для грузовой системы GT No 85 данная проблема была решена применением усиленных ящиков с теплоизоляцией, а новые поколения грузовых систем получили увеличенные верхние фаски грузовых танков (рис. 2).

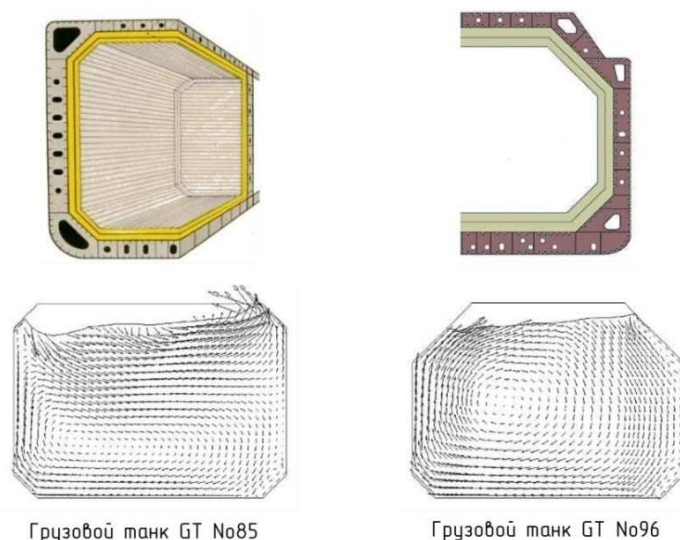


Рис. 2. Характер влияния геометрии поперечного сечения на поле скоростей жидкости [3]

Следующим этапом решения проблем, связанных с явлением слошинга, стал инцидент, произошедший в 2006 г. на борту судна «Catalunya Spirit», оснащенного грузовой системой GT No 96 вместимостью 138 000 м³. Во время внепланового докования (из-за проблем с одним из грузовых насосов) проводилась инспекция грузовых танков. В трех грузовых танках из четырех были обнаружены повреждения теплоизоляции под первичной мембраной в районе чуть выше нижних фасок (рис. 3).

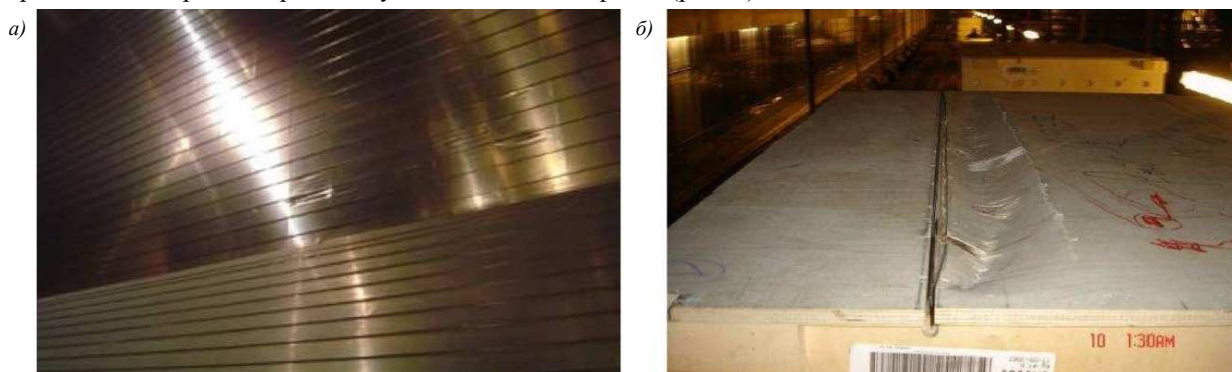


Рис. 3. Повреждения грузовых танков в результате слошинга на танкере-газовозе «Catalunya Spirit» [3]:
а — общий вид деформаций; б — поврежденный короб с теплоизоляцией

Компании Gaztransport и Technigaz, объединившиеся в 1994 г. в одно предприятие (Gaztransport & Technigaz — GTT), провели дополнительные исследования в области воздействия свободной поверхности на внутренние поверхности грузовых танков. Проведенный анализ множественных стендовых симуляций и компьютерных моделей показал, что наибольшему воздействию подвержены бортовые стенки танка на уровне от 20 % до 30 % от общей высоты танка. Как следствие, классификационные общества потребовали включения в Сертификат о соответствии судна для перевозки сжиженных газов наливом ограничений заполнения грузовых танков по слошингу для газовозов, оборудованных мембранными системами.

Для современных СПГ-танкеров безопасные пределы, как правило, составляют от 0 % по высоте танка до 10 % и от 70 % по высоте танка и выше. Промежуточное заполнение от 10 % по высоте танка до 70 % допускается только при нахождении судна в акватории порта.

В случае аварийного выхода СПГ-танкера из терминала или расхождения судов во время STS-операций (Ship-to-Ship — STS), при заполнении танков вне безопасных пределов, перераспределение груза до безопасной кондиции (рис. 4) должно произойти в кратчайшие сроки. Операторы плавучих накопителей требуют наличия заранее подготовленных планов перераспределения груза для кондиций загрузки судна, посчитанных с интервалом в 3 часа от начала грузовых операций. В грузовых системах, разработанных GTT, ГТ № 1 в два раза меньше по объему, чем остальные танки, что позволяет консолидировать груз в безопасных пределах погрузки из любой первоначальной кондиции в течение не более чем 8 часов.

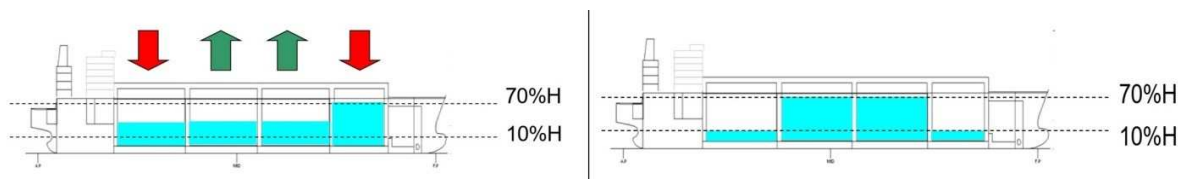


Рис. 4. План перераспределения груза для достижения безопасных кондиций

Крайне специфичной задачей является прогнозирование поведения свободной поверхности груза в условиях ледовой навигации. При проектировании грузовой системы для танкера-газовоза класса Arc7, GTT дополнительно прорабатывали инерционное воздействие груза на внутренние поверхности танков в результате вхождения судна в лед (рис. 5). Сила инерции определялась для различных начальных скоростей с учетом динамических характеристик корпуса судна. Полученные результаты моделирования показали, что потребуются усиление коробов теплоизоляции. Таким образом, грузовая система GTT No 96 GW получила модификацию SLNG (Strength LNG).

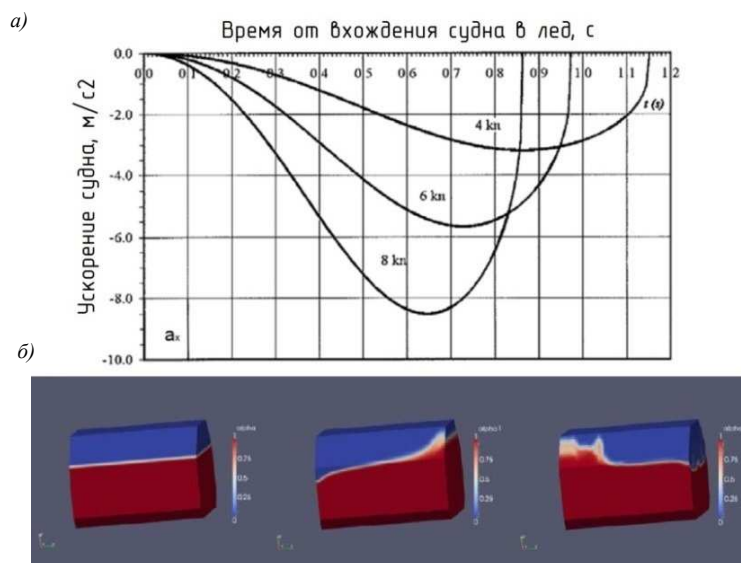


Рис. 5. Результаты моделирования воздействия свободной поверхности груза на внутренние поверхности танка в условиях ледовой навигации [6]:

а — профили ускорения свободной поверхности груза; б — визуализация гидродинамической модели

В 2015 г. компания GTT и ее дочернее предприятие Cryovision (на сегодняшний день поглощено дочерним предприятием GTT Ascenz Marorka) реализовали проект по установке системы SloShield® на СПГ-танкере «Gaslog Singapore». Система SloShield® в режиме реального времени анализирует сигнатуры всплескивания груза, полученные с датчиков, расположенных вокруг грузовых танков. Модель поведения груза, натренированная на данных, предоставленных GTT, предсказывает возможное возникновение слошинга и позволяет экипажу заблаговременно принять меры по его предотвращению. Также система SloShield® постоянно просчитывает план перераспределения груза на случай аварийного прекращения грузовых операций.

2. КОНСТРУКЦИЯ БАРЬЕРОВ

Как уже говорилось ранее, в соответствии с Кодексом МГК для грузовых систем хранения СПГ требуется наличие двух полноценных барьеров. Основной задачей барьеров является защита корпуса судна от экстремально низких температур перевозимого груза. При повреждении первичного барьера вторичный барьер должен удерживать утечку жидкого груза в течение 15 суток.

Конструкции барьеров постоянно развиваются, так как их эффективность, помимо безопасности удержания груза, напрямую влияет на суточный BOR. Снижение количества естественного испарения груза ведет к увеличению коммерческой эффективности грузовой системы. Грузовая система GTT Mark III, разработанная в 1969 г., имела толщину первичного и вторичного барьеров 100 мм и 170 мм соответственно, а суточный BOR составлял 0,125 — 0,15 %. Ее новое поколение Mark III Flex, разработанное в 2011 г., имело толщину барьеров 100 мм и 300 мм при суточном BOR 0,085 — 0,1 %. Последнее поколение грузовой системы Mark III Flex+ оборудовано барьерами толщиной 100 мм и 380 мм, а суточный BOR составляет 0,07 %. При этом материалы, из которых изготавливаются барьеры, остались прежними: полиуретановая пена и фанера. Несколько другим путем пошли разработчики грузовой системы GTT No 96: все ее вариации имеют толщину первичного и вторичного барьеров 230 мм и 300 мм соответственно. Для уменьшения суточного BOR происходило изменение материалов термоизоляции: оригинальная No 96 оборудовалась фанерными коробами с перлитной засыпкой — BOR составлял 0,15 %; No 96 GW оборудуется фанерными коробами, наполненными минеральной ватой, — BOR составляет 0,125 %; грузовые системы No 96 L03 и No 96 L03+ также оснащены фанерными коробами, а основными изоляционными материалами являются минеральная вата и полиуретановая пена — BOR составляет 0,11 % и 0,1 % соответственно; в разработанной в 2021 г. грузовой системе No 96 Super+ коробка изготавливаются не из фанеры, а из усиленной полиуретановой пены (основные изоляционные материалы как и у No 96 L03) — суточный BOR составляет 0,085 %.

Разработчики корейской грузовой системы KOGAS KC-1, пытаясь составить конкуренцию монополисту индустрии производства судовых мембранных систем хранения СПГ в лице GTT, сделали ставку на уменьшение стоимости постройки за счет упрощения конструкции первичного барьера. KOGAS попытались разработать вторичный барьер, который будет выполнять все термоизолирующие функции; в результате получилась грузовая система, у которой первичный барьер полностью сконструирован из фанерных панелей и имеет суммарную толщину 12 мм, а вторичный барьер — из фанерных панелей и полиуретановой пены суммарной толщиной 256,6 мм с заявленным BOR 0,12 %. Данное решение оказалось неудачным, так как неидеальность исполнения вторичного барьера приводит к серьезным промерзаниям корпуса (рис. 6), что существенно влияет на его прочность и является недопустимым для эксплуатации. Два СПГ-танкера «SK Serenity» и «SK Spica» грузоместимостью 174 000 м³ каждый готовятся к утилизации спустя 6 лет после постройки, так и не сделав ни одного полноценного коммерческого рейса, а верфь Samsung Heavy Industries несет значительные расходы на оплату неустоек перед судовладельцем.



Рис. 6. Промерзания корпуса СПГ-танкера «SK Serenity»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате более чем полувекового опыта эксплуатации судовых мембранных грузовых систем были определены оптимальные форма грузовых танков и толщина барьеров. Отсутствие центральной перегородки в грузовых танках уменьшает их сроки и стоимость постройки, однако приводит к возможности образования большой свободной поверхности. Для существующих грузовых систем определены уровни расположения верхних и нижних фасок, а также безопасные уровни заполнения танков. Для предотвращения повреждения грузовых мембранных систем от появления слошинга сейчас активно развиваются системы интеллектуальной поддержки типа SloShield®. Помимо предотвращения потенциально опасных ситуаций, анализ поведения свободной поверхности груза позволяет увеличить коммерческую эффективность мембранной системы. Latsco Shipping Limited и Ascenz Marorka заключили договор на оборудование восьми судов цифровым ассистентом планирования рейса. Данный цифровой ассистент прогнозирует изменение суточного BOR в зависимости от скорости судна, его курса и погодных условий, тем самым способствуя уменьшению его потерь от естественного испарения.

Для предотвращения промерзаний корпуса судна и также для увеличения коммерческой эффективности мембранной грузовой системы суммарная толщина барьеров должна составлять приблизительно 500 мм (табл. 2). Попытки увеличить привлекательность грузовой системы для потенциальных покупателей за счет упрощения ее конструкции могут повлечь за собой крайне негативные последствия. Неудача с первым поколением собственных мембранных грузовых систем не остановила KOGAS, и на данный момент уже получила реализацию система KC-2, однако подробной информации по ней производитель пока не раскрывает.

Таблица 2

Основные изменения в конструкции барьеров мембранных грузовых систем

Грузовая система Поколение	№ 96	Mark III	KC-1
Первое поколение	Толщина барьера: 530 мм = 230 + 300 Материалы: фанера, перлит BOR: 0,15 %	Толщина барьера: 270 мм = 100 + 170 Материалы: фанера, полиуретановая пена	Толщина барьера: 270 мм = 13,4 + 256,6 Материалы: фанера, полиуретановая пена BOR: 0,12 %
Второе поколение (№ 96 GW, Mark III Flex)	Толщина барьера: 530 мм = 230 + 300 Материалы: фанера, минеральная вата BOR: 0,125 %	BOR: 0,125 — 0,15 % Толщина барьера: 400 мм = 100 + 300 Материалы: фанера, полиуретановая пена BOR: 0,085 — 0,11 %	—
Третье поколение (№ 96 L03/L03+, Mark III Flex+)	Толщина барьера: 530 мм = 230 + 300 Материалы: фанера, полиуретановая пена BOR: 0,1 — 0,11 %	Толщина барьера: 480 мм = 100 + 380 Материалы: фанера, полиуретановая пена BOR: 0,07 %	—
Четвертое поколение (№ 96 Super+)	Толщина барьера: 530 мм = 230 + 300 Материалы: полиуретановая пена, минеральная вата BOR: 0,085 %	—	—

В ближайшее время на рынке мембранных грузовых систем должны появиться еще две компании: корейская Hanwha Ocean (ранее DSME) с их разработкой Solidus и отечественная компания «ГТИ» с системой ГТИ-1. Обе имеют принципиальное одобрение от национальных классификационных обществ, но более подробную информацию пока не распространяют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекс МКГ) резолюция MSC.370(93). — СПб.: ЦНИИМФ, 2020. — 480 с.
2. Бойко М.С. Расчет теплового потока в корпусе судна-газовоза на основе аналитических методов теории теплообмена / М.С. Бойко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 88 — 100. — EDN DIFTRC.
3. Бойко М.С. Основы мембранной технологии хранения сжиженного природного газа на судне: уч. пос. / М.С. Бойко. — СПб.: СПбГМТУ, 2023. — 232 с.
4. Gavory T. Sloshing in membrane LNG carriers and its consequences from a designer's perspective / T. Gavory, P.E. de Seze // Proceedings of the 19th International offshore and polar engineering conference, Osaka, Japan, June 21 — 26, 2009. — Vol. III. — P. 13 — 20.
5. Zalar M. Partial filling of membrane type LNG carriers / M. Zalar, P. Cambos, P. Besse, B. le Gallo, Z. Mravak; Bureau Veritas / Marine Division // Proceedings of the 21st GASTECH Conference, Bilbao, Spain, 2005. — 22 p.
6. Bolognese R. Application of membrane tanks in Arctic conditions / R. Bolognese // Arctic Passion Seminar 2020. — 31 p.

REFERENCES

1. MSC.370(93). International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC Code) resolution MSC.370(93). St. Petersburg: CNIIMF, 2020. 480 p.
2. Boyko M.S. Calculation of heat flow in gas carrier structure based on analytical methods of heat exchange theory. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 88 — 100. — EDN DIFTRC. (In Russ.)
3. Boyko M.S. Osnovy membrannoi tekhnologii khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza na sudne: ucheb. posobie [Basics of membrane technology for storing liquefied natural gas on a ship: textbook]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2023. 232 p.
4. Gavory T., de Seze P.E. Sloshing in membrane LNG carriers and its consequences from a designer's perspective. *Proceedings of the 19th International offshore and polar engineering conference, Osaka, Japan, June 21 — 26, 2009*. — 2009. Vol. III. P. 13 — 20.
5. Zalar M. Partial filling of membrane type LNG carriers / M. Zalar, P. Cambos, P. Besse, B. le Gallo, Z. Mravak; Bureau Veritas / Marine Division // Proceedings of the 21st GASTECH Conference, Bilbao, Spain, 2005. — 22 p.
6. Bolognese R. Application of membrane tanks in Arctic conditions / R. Bolognese // Arctic Passion Seminar 2020. — 31 p.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 621.791.14
EDN NUQPCY

ТРЕБОВАНИЯ РЕГИСТРА К ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е.А. Алифиренко, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: npek129@crism.ru

В.Е. Никулин, инженер 1 кат., НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: npek129@crism.ru

А.Е. Демченко, инженер 1 кат., НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: npek129@crism.ru

Н.Н. Барахтина, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49, e-mail: npek129@crism.ru

С.М. Кордонец, главный специалист-эксперт, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: kordonets.sm@rs-class.org

А.В. Кучапов, старший эксперт, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: kuchapov.av@rs-class.org

Рассмотрено применение сварки трением с перемешиванием (СТП) в судостроении, включая изготовление сварных крупногабаритных облегченных панелей (СКО-панелей) при строительстве скоростных судов и специальной морской техники. Сопоставлены прочностные свойства сварных соединений при аргонодуговой сварке и СТП для сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Si, применяемых в судостроении. Проанализированы особенности действующих стандартов и подходы к одобрению технологического процесса СТП и аттестации сварщиков-операторов. Предложены дополнительные требования к одобрению технологического процесса сварки, аттестации сварщиков-операторов и обеспечению качества сварных соединений, выполненных СТП.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, СКО-панели, сплав Al-Mg, сплав Al-Mg-Si, контрольные сварные пробы, одобрение технологии сварки, аттестация сварщиков.

Для цитирования: Алифиренко Е.А. Требования Регистра к технологии сварки трением с перемешиванием судовых конструкций / Е.А. Алифиренко, В.Е. Никулин, А.Е. Демченко, Н.Н. Барахтина и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 70 — 79. — EDN NUQPCY.

REGISTER REQUIREMENTS FOR FRICTION STIR WELDING OF SHIP STRUCTURES

E.A. Alifirenko, PhD, NRC "Kurchatov Institute" — CRISM "Prometey", 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul. 49, e-mail: npek129@crism.ru

V.E. Nikulin, 1 cat. Engineer, NRC "Kurchatov Institute" — CRISM "Prometey", 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul. 49, e-mail: npek129@crism.ru

A.E. Demchenko, 1 cat. Engineer, NRC "Kurchatov Institute" — CRISM "Prometey", 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul. 49, e-mail: npek129@crism.ru

N.N. Barakhtina, Lead Engineer, NRC "Kurchatov Institute" — CRISM "Prometey", 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul. 49, e-mail: npek129@crism.ru

S.M. Kordonets, Principal Specialist-Expert, Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kordonets.sm@rs-class.org

A.V. Kuchapov, Senior Expert, Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kuchapov.av@rs-class.org

The application of friction stir welding (FSW) in shipbuilding, including the manufacture of large-sized lightweight welded panels (LLW panels) for the construction of high-speed vessels and specialized marine equipment, is considered. The mechanical properties of welded joints in both MIG/MAG welding and FSW, applied to Al-Mg and Al-Mg-Si alloys commonly used in shipbuilding, are compared. The specific features of the current standards, and the approaches to FSW process approval and certification of welding operators, as well as to the qualification tests for welder-operators are analyzed. Furthermore, the article introduces supplementary criteria for the weld procedure specification, the welder performance qualification record, and the quality of welded joints produced through FSW.

Key words: friction stir welding, WSL-panels, Al-Mg alloys, Al-Mg-Si alloys, welding test samples, weld procedure specification, welder performance qualification record.

For citation: Alifirenko E.A., Nikulin V.E., Demchenko A.E., Barakhtina N.N. et al. Register requirements for friction stir welding of ship structures. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 70 — 79. EDN NUQPCY.

ВВЕДЕНИЕ

Сварка трением с перемешиванием (СТП) или friction stir welding (FSW) позволяет получать соединения без расплавления металла за счет интенсивных пластических деформаций разогретого металла свариваемых кромок в процессе перемещения вращающегося сварочного инструмента вдоль линии соединения. Сварка в твердой фазе позволяет исключить целый ряд проблем, свойственных сварке плавлением [1 — 5]. Процесс СТП был изобретен в СССР еще в 1965 г. (патент SU195746). В 1991 г. в Великобритании институт TWI (Technological Welding Institute) также запатентовал данный метод сварки (Patent Application No. 91259788), который позднее был сертифицирован многими классификационными обществами, включая РМРС, РКО, ABS, BV, DNV, GL, Lloyds and RINA.

По мнению ведущих мировых экспертов, процесс СТП является революционным в области сварки листовых материалов, и с 1999 г. его начинают активно применять в судостроении при строительстве скоростных кораблей и судов различного назначения, в частности при сварке алюминиевых сборных панелей и профилей, переборок, межэтажных перекрытий, надстроек, а также вертолетных посадочных площадок для прибрежных и морских сооружений [6]. По причине востребованности применения СТП на объектах РМРС появилась необходимость внесения соответствующих требований в Правила Регистра, в связи с чем в НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» была выполнена НИР, результаты которой отражены в настоящей статье.

1. ПРИМЕНЕНИЕ СТП В СУДОСТРОЕНИИ

С 2001 г. норвежским концерном Hydro Marine Aluminium освоена технология производства широких алюминиевых панелей с применением СТП, что позволило на 15 % сократить трудоемкость при строительстве корпусных конструкций высокоскоростных паромов, круизных судов (рис. 1а) и надстроек для морских нефтяных платформ [7,8]. По данным норвежской фирмы Fjellstrand [7], использование готовых СТП-панелей позволяет сократить цикл производства корпуса катамарана длиной 60 м с 10 до 6 месяцев, что соответствует 40%-ному увеличению производительности и товарооборота верфи. Организация Stig Oma, входящая в Fjellstrand, заявила о суммарной экономии затрат производства примерно на 10 % за счет улучшения конструкции судна и модернизации технологии сборки с применением сборных СТП-панелей толщиной полотна от 1,8 до 12 мм и с максимальными размерами до 16 × 20 м [9].

Начиная с 2001 г. на предприятиях Norsk Hydro UK, Ltd, Aluminium Shipbuilders, Ltd и Griffon Hovercraft (Великобритания) с помощью СТП строят суда на воздушной подушке Griffon 8000TD (рис. 1б) [10]. В Японии в 2005 г. на предприятиях Tamano Mitsui Engineering & Shipbuilding (MES) способ СТП был использован для строительства грузопассажирского судна с максимальной скоростью 42,8 уз «Super Liner Ogasawara» (рис. 1в).

В Китае (г. Пекин) с 2006 г. запущено производство крупногабаритных панелей из алюминиевых сплавов для строительства высокоскоростных судов. Внедрение метода СТП в судостроение Китая позволило значительно снизить объем сварки плавлением, рассматривать и проектировать новые конструкции, увеличить экспорт производимых судов. Так, с применением СТП было освоено серийное производство высокоскоростных кораблей нового поколения ВМС КНР «Type 022 Houbei» (рис. 1г) [8]. Nichols Brothers (г. Фрилэнд, США) применила СТП для сварки алюминиевых панелей прибрежного военного корабля класса X-Craft, названного «Sea Fighter» (рис. 1д).



а) Круизный лайнер «The World» (Норвегия)



б) Судно на воздушной подушке «Griffon 8000TD» (Великобритания)



в) Пассажирский лайнер «Super Liner Ogasawara» (Япония)



г) Серийный высокоскоростной корабль ВМС «Type 022 Houbei» (Китай)



д) Прибрежное военное судно «Sea Fighter» (США)

Рис. 1. Суда, построенные с применением СТП в мире

В России научно-исследовательскими работами в области создания технологических процессов и специализированного оборудования для применения СТП в судостроении занимается НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей». В период с 2004 по 2023 г. в «ЦНИИ КМ «Прометей» был выполнен ряд научно-исследовательских работ по тематике СТП алюминиевых сплавов.

В 2016 — 2017 гг. «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» при участии ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» разработал технологию сварки, создал и ввел в эксплуатацию первый в России опытный автоматизированный комплекс сварки трением с перемешиванием «Габарит-А» (ОАК СТП «Габарит-А», рис. 2) для получения нового типа сварных крупногабаритных облегченных панелей (СКО-панелей) из алюминиевых сплавов практически с любыми характеристиками полотна и набора (рис. 3). Разработаны и согласованы с КБ и судостроителями уже весьма востребованные в отечественном судостроении типоразмеры СКО-панелей взамен цельнопрессованным.

В 2018 г. разработана и внесена глава 5.4, посвященная новому конструкционному материалу, — «Сварные крупногабаритные облегченные панели из деформируемых алюминиевых сплавов, изготовленные методом сварки трением с перемешиванием» в Часть XIII «Материалы» Правил Российского морского регистра судоходства.



Рис. 2. ОАК СТП «Габарит-А»

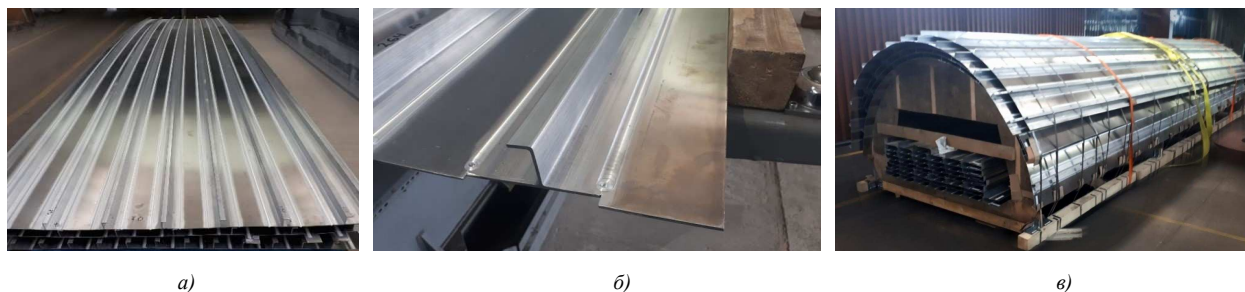


Рис. 3. СКО-панели (а, б), подготовленные к поставке (в)

С 2019 по 2023 г. в НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» было изготовлено более 15 т СКО-панелей различной геометрии до 5000 мм в ширину и 8000 мм в длину для строительства судна на воздушной подушке «Хаска-10» (рис. 4а) [11, 12], высокоскоростного катера особого назначения, а также высокоскоростных катамаранов проекта HSC150B (рис. 4б). За это время накоплена обширная статистика влияния параметров сварки и степени их отклонений на качество сварных соединений, а также значительный опыт по применению различных методов контроля и выявлению дефектов сварных соединений. В период с 2022 по 2023 г. в НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» получены свидетельства о признании изготовителя СКО-панелей в РМРС и ФАУ «Российское классификационное общество» (РКО).



а) Судно на воздушной подушке СПВГС «Хаска-10» (Россия)



б) Высокоскоростной катамаран проекта HSC150B (Россия)

Рис. 4. Суды, построенные с применением СТП- и СКО-панелей

2. ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТП-СОЕДИНЕНИЙ

В настоящее время в зарубежном судостроении метод СТП широко применяют как для изготовления тонкостенных облегченных панелей из катаных листов и прессованных профилей сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Si, так и при сборке корпусов скоростных судов и паромов.

Применение СТП взамен сварки плавлением MIG и TIG позволяет повысить прочность сварных соединений, исключить сварочные деформации, получать крупногабаритные секции судовых конструкций с высокой степенью завершенности, благодаря чему существенно снижается трудоемкость сборочно-сварочных работ и затраты на сборку. Прочностные свойства соединений Al-Mg и Al-Mg-Si, включая отношение временного сопротивления основного металла к металлу сварного соединения $K = \sigma_{\text{ом}} / \sigma_{\text{св}}$, после дуговой сварки и СТП представлены в таблице. Материалы получены из опыта НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» при сварке СКО-панелей, а также из источников [13 — 21] и Правил РМРС.

Т а б л и ц а

Прочностные свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов
толщиной от 3 до 5 мм из сплавов систем Al-Mg и Al-Mg-Si

Марка сплава, состояние поставки	$\sigma_{\text{в}}^{\text{ом}}$, МПа	Сварка плавлением MIG/TIG		СТП	
		$\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, МПа	$K_{\text{св.пл}}$	$\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, МПа	$K_{\text{стп}}$
1561 O/H111/H112	335	305	0,91	335	1,00
1565ч O/H111/H112	330	305	0,92	330	1,00
1575 O/H111/H112	400	360	0,90	400	1,00
1581 O/H112	345	320 — 345	0,93 — 1,00	345	1,00
5083 O/H111/H112/H116/H321	275 — 331	275 — 297	0,83 — 1,00	275 — 331	0,83 — 1,00
5086 O/H111/H116/H321	240 — 275	240 — 269	0,87 — 1,00	240 — 270	0,87 — 1,00
6061 T6	280 — 310	143 — 186	0,46 — 0,66	245 — 260	0,79 — 0,92
6082 T6	280 — 330	190 — 217	0,58 — 0,78	221 — 247	0,79 — 0,88

Обеспечение промышленного внедрения технологии СТП в отечественное судостроение было неразрывно связано с необходимостью разработки требований к процессу сварки, требований к аттестации сварщиков-операторов и одобрению технологического процесса сварки на основании прочностных характеристик сварных соединений, анализа дефектов, требований к контролю качества и другим особенностям СТП. Разработанные в процессе научно-исследовательской работы соответствующие требования вошли в Правила РС.

3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СТП

За рубежом накоплен значительный опыт применения СТП при разработке нормативно-технической документации в TWI (Великобритания); NASA, Lockheed-Martin Corp., Boeing, Wisconsin Center for Space Automation & Robotics, Oak Ridge National Laboratory MTS Systems Corporation, Thompson Friction Welding (США); Imhof Hartchrom GmbH и Klaus Raiser GmbH (Германия); Hidetoshi Fujii и исследовательский центр JWRI при Университете Осаки (Япония); Shanghai puda friction welder co. Ltd., а также в одобрении технологии сварки (Weld Procedure Specification — WPS).

В 2011 г. разработан и введен в действие европейский стандарт по СТП алюминиевых сплавов: ISO 25239:2011 «Friction stir welding — Aluminium» в 5 частях. В 2011 г. в ABS (American Bureau of Shipping) подготовлено руководство [22] к одобрению WPS и аттестации сварщиков-операторов СТП. В 2018 г. разработан и введен в действие европейский стандарт по точечной сварке трением алюминиевых сплавов в 5 частях ISO 18785 «Friction stir spot welding — Aluminium» [23]. В 2020 г. классификационным обществом Lloyd's Register в Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials введены требования к проведению и аттестации технологии и операторов СТП [16]. В 2020 г. переиздан и дополнен европейский стандарт по СТП алюминиевых сплавов ISO 25239:2020 в 5 частях [24]. Так же в 2020 г. в России введен в действие стандарт ГОСТ ISO 25239 в 5 частях «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий» [25], подготовленный НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, являющийся переводом европейского стандарта 2011 г.

По введенным в действие стандартам, правилам и руководствам [16, 22 — 25] можно было выявить ряд неточностей в требованиях к процессу аттестации сварщиков-операторов и самой процедуры сварки — WPS, а также существенные различия и противоречия в самих требованиях. Приведем наиболее существенные. В [24, 25] не учитываются особенности и различия технологии СТП, возникающие при сварке различных толщин, сплавов и типов полуфабрикатов, а также способы контроля сварных соединений и требования к сварщику-оператору при изменении технологии СТП.

Так, согласно п. 4.2.4 и п. 4.2.5 ISO 25239-3 [25] при успешном испытании одного сварного шва результаты аттестации сварщика распространяются на все сплавы, толщины, типы сварных соединений. Очевидно, что такой подход направлен в первую очередь на упрощение и ускорение процедуры аттестации, но не гарантирует воспроизводимость технологии и качество выполнения сварных швов в требуемом диапазоне толщин, сплавов и типов соединений.

Стандартное испытание образцов при СТП и испытание образца сварной продукции включает проведение разрушающих испытаний на статическое растяжение и статический изгиб с растяжением корневой и лицевой поверхности сварного соединения, а также металлографические исследования сварного соединения. Указанные испытания позволяют гарантированно выявить возможные внутренние дефекты в металле шва (трещины, несплошности) и наличие непровара в корне шва в случае нарушения технологии сварки.

Однако далее в стандарте [24, 25] допускают замену механических испытаний на неразрушающий контроль: рентгенографический (РК) и ультразвуковой (УЗК) методы. При изготовлении СКО-панелей установлено, что чувствительность указанных методов НК к отдельным видам дефектов не позволяет выявлять их, что делает невозможным подтверждение качества технологии СТП. Кроме того, в стандарте отсутствуют количественные требования к допустимым отклонениям параметров сварки, которые определяют качество сварного соединения и являются основной причиной образования дефектов.

Отдельно следует отметить представленную в стандарте [25] информацию о дефектах, возникающих в соединениях СТП и методах их контроля. Согласно ISO 25239-1, а также Приложению А в ISO 25239-5 2020 в сварных соединениях могут возникать внутренние дефекты в виде пор, крюков, а также поверхностные дефекты: непровар, провис, грат, линейное смещение, неполное заполнение, неравномерная ширина шва, неровная поверхность. В соответствии с рекомендациями стандарта для выявления дефектов приводят визуально-измерительный контроль (ВИК) и металлографический анализ. Информация о применении рекомендованных в части 3 УЗК или РК для выявления каких-либо дефектов не представлена.

В целом, стандарт [25] содержит достаточно большой объем общих терминов и определений процесса СТП в части технологий стыковой сварки и сварки внахлест. Стандартом установлен порядок аттестации сварщиков и одобрения процедуры сварки, прилагаются формы сертификатов соответствия. Однако требования, предлагаемые в [25] к испытаниям и нормам одобрения технологии сварки, не обеспечивают достаточный уровень верификации технологии сварки и, учитывая традиционно высокие требования к качеству сварных соединений в изделиях морской техники, не могут быть применены для одобрения технологии сварки и аттестации сварщиков-операторов.

В рассмотренных разделах Правил Lloyd's Register [16], определяющих требования к СТП, есть ссылки на требования, определенные международным (европейским) стандартом [24], при этом Правила [16] существенно дополняют имеющийся стандарт по СТП. Дополнения касаются:

- области распространения одобрения технологии. Применение технологии СТП распространяется только на те толщины, марки сплавов и типы соединений, которые ранее подвергались испытаниям при процедуре одобрения технологии сварки;
- контроля качества продукции. При получении сварных соединений вводится обязательный контроль параметров сварки, ведение архива данных, регламентируется минимальный объем разрушающих и неразрушающих испытаний готовой продукции;
- требований к проведению производственных испытаний с целью подтверждения воспроизводимости процесса сварки;
- требований к механическим свойствам, дефектам, критериям и нормам их оценки. Помимо данных, обозначенных в Приложении А Части 5 стандарта [25], в Правилах [16] на СТП-соединения распространяются общие требования к сварным соединениям из алюминиевых сплавов, выполненных сваркой плавлением. Однако специальные требования к механическим свойствам сварных соединений, выполненных СТП, не устанавливаются.

В целом, рассмотренные Правила Lloyd's Register [16] в достаточной степени определяют требования к процессу СТП и с некоторыми дополнениями могут быть рекомендованы для аттестации процессов сварки изделий судостроения и морской техники методом СТП.

Из всех имеющихся зарубежных стандартов Правила ABS [22] наиболее широко описывают требования к проведению технологии СТП, аттестации оборудования и операторов сварки. В Правилах [22] требования к одобрению технологии и оператора-сварщика содержат 28 параметров, регламентирующих оборудование и технологию сварки, включая операции сборки и подготовки свариваемых кромок. Для целого ряда параметров вводится конкретный диапазон допустимых отклонений, что, по сравнению с другими стандартами, безусловно обеспечивает лучшую воспроизводимость качества и практически исключает появление дефектов, связанных с отклонением от аттестованного режима сварки. По результатам накопленного опыта при СТП СКО-панелей, указанные при этом требования к предельным отклонениям параметров при всей избыточности не являются достаточными для гарантирования воспроизводимости качества. Приведенные допустимые отклонения могут иметь в совокупности неудачные сочетания, способствуя отклонению режима сварки за пределы оптимального диапазона.

В Правилах ABS [22], так же как и в других рассмотренных стандартах, отсутствует детальное описание дефектов сварки, причина их появления, возможности их устранения и оценка ремонтпригодности изделия после СТП в зависимости от типа дефекта. Критичным является отсутствие информации о взаимосвязи размеров дефектов и чувствительности к их обнаружению стандартными средствами неразрушающего контроля. Описанный подход к проведению неразрушающего контроля сварных соединений после СТП носит зачастую формальный характер, увеличивая при этом объем контроля.

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АТТЕСТАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ СТП

Рассмотренные стандарты, материалы публикаций и опыт применения СТП при изготовлении СКО-панелей позволяют заключить, что для сварных соединений, выполненных классической СТП (conventional FSW), характерно незначительное снижение толщины сварного шва, наличие незначительного грат и следов от уступа (запечика) сварочного инструмента, не превышающих допускаемых отклонений толщины полуфабриката, значений шероховатости и не являющихся дефектами.

Поверхностные дефекты — грат, снижение толщины шва, подрез корня шва, недостаточное заполнение, смещение свариваемых кромок, задиры и неравномерная ширина сварного шва — могут быть определены при помощи ВИК. Несплошности и другие внутренние дефекты в поперечном сечении шва выявляются неразрушающими методами контроля (РК, УЗК), а также механическими испытаниями.

Наиболее опасными дефектами являются дефекты типа непровар с неполным перемешиванием (kissing bond) (рис. 5.). Дефект является протяженным и значительно снижает прочностные свойства всего сварного соединения. На основании имеющегося опыта к основным причинам возникновения непровара можно отнести: недостаточное осевое усилие при сварке, неправильный выбор или износ сварочного инструмента.

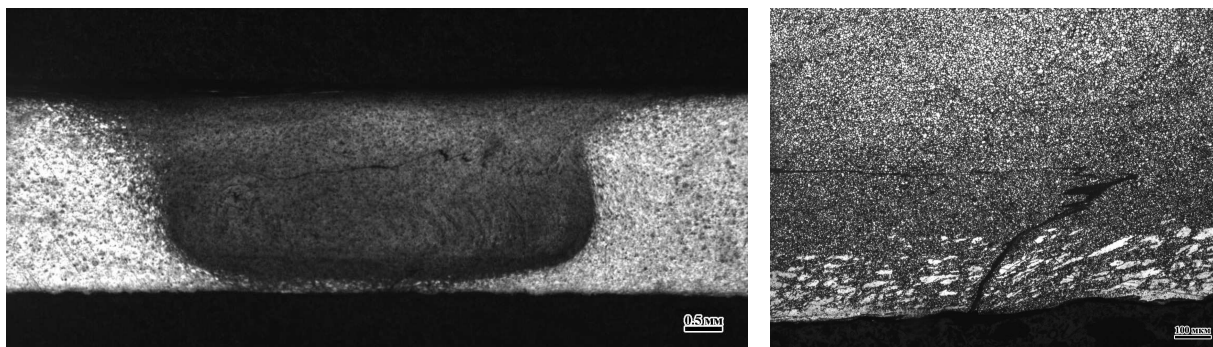


Рис. 5. Дефект типа непровар с неполным перемешиванием в корне шва при СТП

Данный тип дефекта не выявляется УЗК и РК методами неразрушающего контроля. Ультразвуковые способы выявления дефектов, включая методы дифракционно-временной (TOFD) и фазированных решеток, неприменимы при работе на толщинах менее 4 мм. В результате пластических деформаций при сварке искривленная форма дефекта затрудняет возможность его выявления. Ширина раскрытия непровара изменяется в диапазоне от нескольких микрон до 50 мкм и находится вне диапазонов разрешающей способности большинства средств неразрушающего контроля.

Таким образом, учитывая возможность обеспечения высокой степени автоматизации и мониторинга процесса СТП, а также вероятность появления опасных дефектов в процессе классической СТП, которые невозможно выявить неразрушающими методами контроля, наиболее целесообразным представляется проведение операционного контроля, а также изготовление и испытание контрольных сварных проб.

При этом сварку контрольных сварных проб проводят:

- после изменения технологии СТП;
- после замены оснастки;
- после ремонта или модификации оборудования;
- после обнаружения отклонений от оптимальных параметров СТП;
- при выявлении дефектов методами неразрушающего контроля;
- после выполнения сварных швов суммарной протяженностью более 100 м;
- в течение одной смены с максимальным интервалом между испытаниями 8 ч.

На основании вышеуказанного были предложены и обоснованы следующие ключевые требования к одобрению технологии сварки и методам обеспечения качества сварного соединения, распространяющиеся в том числе и при аттестации сварщиков-операторов.

1) Одобрение технологии СТП и операторов-сварщиков должно ограничиваться конкретным сварочным оборудованием, маркой алюминиевого сплава и состоянием поставки, диапазоном толщин полуфабрикатов свариваемой партии, типом соединения и конфигурацией сварочного инструмента.

2) При СТП должен проводиться операционный контроль и запись параметров сварки в автоматизированном режиме.

3) Качество сварного соединения и воспроизводимость технологии сварки как на этапе одобрения, так и на этапе промышленного производства должны определяться операционным контролем при СТП и испытаниями контрольных сварных проб, включающими металлографические исследования и механические испытания на статический изгиб и растяжение сварных образцов.

4) В Правила РМРС были внесены требования к механическим свойствам стыковых сварных соединений, полученных СТП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный опыт применения технологии СТП, стандартов и правил позволили сформулировать дополнительные требования к одобрению технологических процессов сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, аттестации сварщиков-операторов. Требования, указанные в п. 5 настоящей статьи, были включены в 4.4.7, 7.6 части III «Техническое наблюдение за изготовлением материалов» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов [26] и 2.10, 3.3.10, 3.5.5 части XIV «Сварка» Правил классификации и постройки морских судов [27]. Внедрение дополнений в нормативные документы позволило применить указанный процесс сварки при строительстве объектов, поднадзорных РМРС, с соответствующим уровнем качества и, как следствие, расширить область технического наблюдения РМРС для обеспечения надлежащего уровня безопасности при постройке судов и другого оборудования, а также для повышения безопасности мореплавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епифанов К.И. Современное развитие сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в промышленности (обзор) / К.И. Епифанов // Сварочное производство. — 2022. — № 5. — С. 41 — 53.
2. Сизова О.В. Влияние основных параметров сварки трением с перемешиванием на дефектность структуры сварного соединения / О.В. Сизова, А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев, А.А. Заикина и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2017. — № 4 (77). — Р. 19 — 29.
3. Попович А.А. Сварка трением с перемешиванием алюминий-литиевого сплава В-1469-Т / А.А. Попович, О.В. Панченко, А.А. Наумов, А.В. Свиридов и др. // Авиационные материалы и технологии. — 2019. — № 4 (57). — С. 11 — 17.
4. Боровков А.И. Роль сварки трением с перемешиванием в производстве изделий ракетно-космической промышленности / А.И. Боровков, В.А. Быченко, В.Е. Прохорович, А.В. Федоров и др. // Сварка и диагностика. — 2022. — № 3. — С. 36 — 42.
5. Павлова В.И. Исследование температурно-временных условий сварочного нагрева, структуры и свойств металла стыковых соединений из алюминиево-магниевого сплава, выполненных сваркой трением с перемешиванием / В.И. Павлова, Е.А. Алифиренко, Е.П. Осокин // Вопросы материаловедения. — 2009. № 4 (60). — С.74 — 88.
6. Friction Stir Welding — the ESAB Way. — 53 p.
7. Halverson B. Friction Stir Welding (FSW) of Littoral Combat Ship Deckhouse Structure / B. Halverson, J.F. Hinrichs // Journal of Ship Production (J Ship Prod). — 2007. — Vol. 23 (3). — P. 161 — 163.
8. Kallee S.W. Industrial applications of friction stir welding / S.W. Kallee // Friction Stir Welding. 2010. P. 118 — 163.
9. Göran L. Friction Stir Welding. New technology changing the rules of the game in Al construction / L. Göran, R. Larsson // Svetsaren. — 2001. № 2 — 3. — P. 3 — 6.
10. Cater S. Friction Stir Welding for Marine Construction. TWI Ltd, 43 p.
11. Алифиренко Е.А. Создание новых сварных крупногабаритных облегченных панелей повышенной прочности из алюминиево-магневых сплавов для строительства скоростных судов нового типа для эксплуатации в условиях Заполярья / Е.А. Алифиренко, Н.Н. Барахтина, Е.В. Малов // Вопросы материаловедения. — 2021. — № 3. — С. 263 — 273.
12. Алифиренко Е.А. Перспективы снижения веса корпусных и надстроечных конструкций при использовании сварных крупногабаритных облегченных панелей, полученных методом сварки трением с перемешиванием / Е.А. Алифиренко, Е.А. Шишенин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — S1. — С. 49 — 52.
13. Birsan D. Behaviour simulation of aluminium alloy 6082-T6 during friction stir welding and Tungsten Inert Gas welding / D. Birsan, E. Scutelnicu, D.Visan // Recent Advances in Manufacturing Engineering. — WSEAS Press, 2011. — P. 103 — 108.
14. Gungor B. Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys / B. Gungor, E. Kaluc, E. Taban, A. Sik // Materials and Design. — 2014. — № 56. — P. 84 — 90.
15. Ivanov S.Yu. Comparative Analysis of Non-Uniformity of Mechanical Properties of Welded Joints of Al-Mg-Si Alloys During Friction Stir Welding and Laser Welding / S.Yu. Ivanov, O.V. Panchenko, V.G. Mikhailov // Metal Science and Heat Treatment. — 2018. — Vol. 60. — P. 393 — 398.
16. Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials. Chapter 13. Requirements for welded construction / Lloyd's Register. July 2020.
17. Morozova Iu. Impact of impulses on microstructural evolution and mechanical performance of Al-Mg-Si alloy joined by impulse friction stir welding / Iu. Morozova, A. Obrosof, A. Naumov, A. Królicka et al. // Materials. — 2021. — № 14. — P. 1 — 16.
18. Mathers G. The welding of aluminum and its alloys / G. Mathers. — Cambridge: Elsevier Science, 2002. — 248 p.
19. Ericsson M. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG / M. Ericsson, R. Sandstrom // International Journal of Fatigue. — 2003. — Vol. 25. — P. 1379 — 1387.
20. Jamshidi Aval H. Theoretical and experimental investigation into friction stir welding of AA 5086 / H. Jamshidi Aval, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 52. — P. 531 — 544.
21. Hirata T. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy / T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, Ts. Tanaka et al. // Materials Science and Engineering A. 2007. Vol. 456 (1 — 2). P. 344 — 349.
22. Guide for the approval of friction stir welding in aluminum / American Bureau of Shipping. — 2011. — 18 p.
23. ISO 18785 Friction stir spot welding — Aluminum (Parts 1 — 5). 2018.
24. ISO 25239 Friction stir welding — Aluminum (Parts 1 — 5). 2020
25. ГОСТ ISO 25239 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. (Части 1 — 5). М.: Стандартинформ, 2020.
26. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.
27. Правила классификации и постройки морских судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.

REFERENCES

1. Epifanov K.I. Sovremennoe razvitiye svarki treniem s peremeshivaniem alyuminievykh splavov v promyshlennosti (obzor) [Modern development of friction stir welding of aluminium alloys in industry (review)]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2022. No. 5. P. 41 — 53.
2. Sizova O.V., Kolubaev A.V., Kolubaev E.A., Zaikina A.A., Rubtsov V.G. Vliyanie osnovnykh parametrov svarki treniem s peremeshivaniem na defektnost' struktury svarnogo soedineniya [Influence of main parameters of friction stir welding on imperfection of welded joint structure]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2017. No. 4 (77). P. 19 — 29.
3. Popovich A.A., Panchenko O.V., Naumov A.A., Sviridov A.V. et al. Friction stir welding of aluminum-lithium alloy V-1469-T. *Aviation Materials and Technologies*. 2019. No. 4 (57). P. 11 — 17. (In Russ.)
4. Borovkov A.I., Bychenok V.A., Prokhorovich V.E., Fedorov A.V. et al. The role of friction stir welding with stirring in the production of products of the rocket and space industry. *Welding and diagnostics*. 2022. No. 3. P. 36 — 42. (In Russ.)
5. Pavlova V.I., Alifirenko E.A., Osokin E.P. Research of temperature-time conditions of welding heating, structure and properties of metal for edges joints of aluminium-magnesium alloy fulfilled with welding by friction with hashing. *Voprosy Materialovedeniya*. 2009. No. 4(60). P. 74 — 88. (In Russ.)
6. Friction Stir Welding — the ESAB Way. 53 p.
7. Halverson B., Hinrichs J.F. Friction Stir Welding (FSW) of Littoral Combat Ship Deckhouse Structure. *Journal of Ship Production (J Ship Prod)*. 2007. Vol. 23 (3). P. 161 — 163.
8. Kallee S.W. Industrial applications of friction stir welding. *Friction Stir Welding*. 2010. P. 118 — 163.
9. Göran L., Larsson R. Friction Stir Welding. New technology changing the rules of the game in Al construction. *Svetsaren*. 2001. № 2 — 3. P. 3 — 6.
10. Cater S. Friction Stir Welding for Marine Construction. TWI Ltd, 43 p.
11. Alifirenko E.A., Barakhtina N.N., Malov E.V. Creation of large-scale thin-walled welded panels of high strength from aluminum-magnesium alloys for construction of high-speed vessels of a new type for operation in the Arctic. *Voprosy Materialovedeniya*. 2021.No. 3(107). P. 263 — 273. (In Russ.)
12. Alifirenko E.A., Shishenin E.A. Weight production prospects of the vessel's hulls and superstructures by using large-size light-weight FSW welded panels. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. S1. P. 49 — 52.
13. Birsan D., Scutelnicu E., Visan D. Behaviour simulation of aluminium alloy 6082-T6 during friction stir welding and Tungsten Inert Gas welding. *Recent Advances in Manufacturing Engineering*. WSEAS Press, 2011. P. 103 — 108.
14. Gungor B., Kaluc E., Taban E., Sik A. Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys. *Materials and Design*. 2014. № 56. P. 84 — 90.
15. Ivanov S.Yu., Panchenko O.V., Mikhailov V.G. Comparative analysis of non-uniformity of mechanical properties of welded joints of Al-Mg-Si alloys during friction stir welding and laser welding. *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. Vol. 60. P. 393 — 398.
16. Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials. Chapter 13. Requirements for welded construction / Lloyd's Register. July 2020.
17. Morozova Iu., Obrosova A., Naumov A., Królicka A. et al. Impact of impulses on microstructural evolution and mechanical performance of Al-Mg-Si alloy joined by impulse friction stir welding. *Materials*. 2021. No. 14. P. 1 — 16.
18. Mathers G. The welding of aluminum and its alloys. Cambridge: Elsevier Science, 2002. 248 p.
19. Ericsson M., Sandstrom R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue*. 2003. Vol. 25. P. 1379 — 1387.
20. Jamshidi Aval H., Serajzadeh S., Kokabi A.H. Theoretical and experimental investigation into friction stir welding of AA 5086. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 52. P. 531 — 544.
21. Hirata T., Oguri T., Hagino H., Tanaka Ts. et al. Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 456 (1 — 2). P. 344 — 349.
22. Guide for the approval of friction stir welding in aluminum / American Bureau of Shipping. 2011. 18 p.
23. ISO 18785 Friction stir spot welding — Aluminum (Parts 1 — 5). 2018.
24. ISO 25239 Friction stir welding — Aluminum (Parts 1 — 5). 2020.
25. GOST ISO 25239 Svarka treniem s peremeshivaniem. Alyuminiy. (Chasti 1 — 5) [Friction stir welding. Aluminum (Parts 1 — 5)]. Moscow: Standartinform, 2020.
26. Rules for Technical Supervision during Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.
27. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ*

УДК 629.5.01
EDN PVOKDG

ФОРМИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДНА

А.Н. Суслов, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

О.В. Одегова, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: osah@mail.ru

Д.В. Сафронов, студент, зав. лабораторией, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: denis.safronov328@gmail.com

В рамках проекта создания российской независимой системы автоматизированного проектирования судов актуальным вопросом является представление геометрических данных в структурированном виде. Целью научно-прикладного исследования, результаты которого изложены в статье, является систематизация и расширение знаний о формализации информации по геометрии поверхности судна и его помещениям для выполнения проектных расчетов и операций моделирования с использованием наработанного ранее опыта проектирования и существующих расчетных методик. Для достижения указанной цели решается задача представления схемы формирования помещений для системы автоматизированного проектирования судна. Излагается подход, подразумевающий преемственность данных на любой стадии проектирования, основанный на концепции «рассекающих» поверхностей. Для указания «граничных» поверхностей помещения предлагается применять интерактивный метод, то есть, определять поверхности в пространственной модели судна с помощью указания на них компьютерной мышью на экране монитора. Описываются ограничивающие плоскости для такого способа задания. Подчеркивается преимущество формализации данных по геометрии, связанное с тем, что при его реализации работоспособность и преемственность системы автоматизированного проектирования судна будет сохраняться в любой момент ее развития, а цифровая непрерывность проектирования будет обеспечена.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, помещение, рассекающая плоскость, экспорт данных.

Для цитирования: Суслов А.Н. Формирование помещений в системах автоматизированного проектирования судна / А.Н. Суслов, О.В. Одегова, Д.В. Сафронов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 80 — 86. — EDN PVOKDG.

* Изображение из открытого источника сети интернет: <https://topwar.ru/>

APPROACHES FOR COMPARTMENTS MODELING IN SHIP CAD SOFTWARE

A.N. Suslov, DSc, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: suslov-smtu@yandex.ru

O.V. Odegova, Ph.D., Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: osah@mail.ru

D.V. Safronov, student, Head of Laboratory, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: denis.safronov328@gmail.com

As part of the project to create a Russian independent computer-aided design system for ships, the presentation of geometric data in a structured form is an urgent issue. The article presents the scientific and applied research, which systematize and expand knowledge about the formalization of information on the geometry of the vessel surface and its premises for performing design calculations and modeling operations using previous design experience and existing calculation techniques. The task of presenting a scheme for the formation of premises for a ship's computer-aided design system has been solved to achieve this purpose. A presented approach bases on the concept of "dissecting" surfaces, which implies the continuity of data at any stage of design. To indicate the "boundary" surfaces of the room, is possible to use an interactive method, that is, to determine the surfaces in the spatial model of the vessel by pointing at them on the monitor screen. The bounding planes for this type of assignment are described. The advantage of formalizing geometry data is the operability and continuity of the ship's computer-aided design system that will be maintained at any moment of its development, and digital continuity of design will be ensured.

Key words: CAD, rooms, dissecting plane, data export.

For citation: Suslov A.N., Odegova O.V., Safronov D.V. Approaches for compartments modeling in ship CAD software. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 80 — 86. EDN PVOKDG.

ВВЕДЕНИЕ

Заявка «Объединенной судостроительной корпорации» (ОСК) на поддержку проекта «Доработка и внедрение отечественной судостроительной системы автоматизированного проектирования тяжелого класса как среды проектирования и конструкторско-технологической подготовки производства» в январе 2023 г. получила одобрение Минцифры России [1].

Согласно этому проекту система автоматизированного проектирования для судостроения должна охватывать весь жизненный цикл судна с наполнением и уточнением данных электронной модели судна на всех его этапах, обеспечивая «цифровую непрерывность» информации.

В настоящий момент российские проектно-конструкторские бюро вынуждены использовать зарубежные судостроительные или непрофильные машиностроительные САПР, которые не могут в полной мере обеспечить процесс проектирования ввиду ограниченного доступа, рисков потери лицензии или того, что системы не ориентированы на решение специфических задач судостроения.

Основой любой системы автоматизированного проектирования является распределенная база знаний о предмете проектирования. Для судов знаковыми являются вопросы форматов представления данных по геометрии поверхности судна и его помещениям в таком виде, чтобы было возможно выполнять моделирование и проектные расчеты с максимально возможным использованием наработанного ранее опыта проектирования и существующих методик [2, 3].

Поэтому одной из важнейших задач в системе автоматизированного проектирования судна (далее САПР-С) является задача формирования помещений и определение геометрических характеристик сформированных помещений проектируемого судна [4].

На основе решения данной задачи производится оценка остойчивости, непотопляемости и общей прочности проектируемого судна при различных вариантах загрузки. Совокупность указанных расчетов позволяют сформировать буклеты начальной и аварийной остойчивости, которые являются обязательными в комплекте проектной и судовой документации.

Кроме этого, исходя из концепции использования единой электронной модели судна на протяжении всего жизненного цикла, информация о помещениях в электронном виде должна быть доступна в системах эксплуатации судна (системы управления грузовыми операциями, грузовые компьютеры, приборы оценки начальной и аварийной остойчивости и проч.) [5].

Следует подчеркнуть, что информация о геометрии сформированных помещений должна передаваться в модули САПР-С, ориентированные на формирование конструкции корпуса судна как на этапе технического проекта, так и на этапе рабочего проектирования судна [6].

Целью исследования, связанного с представлением данных по геометрии пространственной модели в САПР-С, результаты которого изложены в статье, является разработка способа формализации геометрических данных в виде, оптимальном для выполнения моделирования и проектных расчетов. Для выполнения поставленной цели предлагается алгоритм задания «рассекающих» поверхностей, ограничивающих помещения судна.

1. СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Формализованное представление геометрической модели судна — это массив данных, содержащий координаты точек, определяющих форму корпуса и его структурных составляющих в пространстве и в плане (в проекции на плоскость) [7].

С учетом положений ГОСТ Р ИСО 10303-21-2022 для обеспечения возможности передачи данных между различными системами [8] в качестве перспективной схемы формирования помещений в разрабатываемой САПР-С предлагается использовать концепцию, основанную на формировании ряда «рассекающих» поверхностей, которые используются для формирования помещений и конструкции судна (рис. 1).

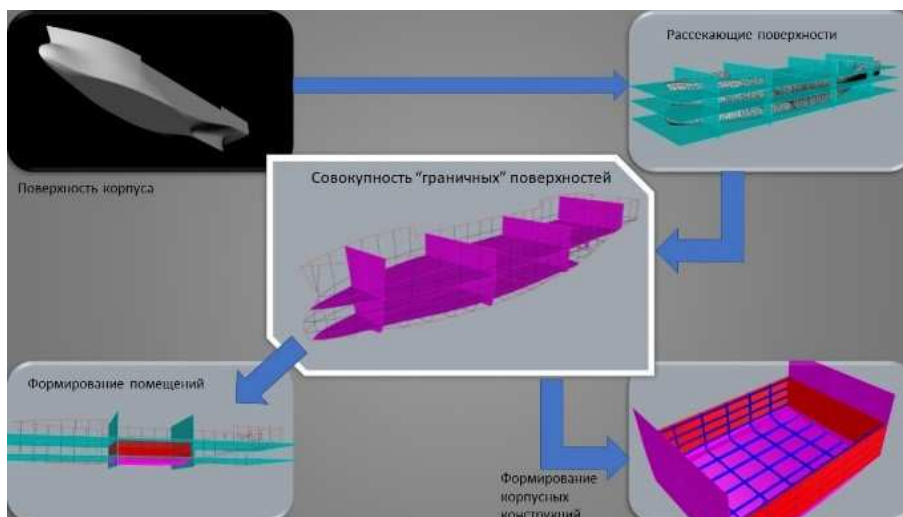


Рис. 1. Формирование рассекающих плоскостей

Каждая из «рассекающих» поверхностей может быть сформирована следующим образом:

- стандартными имеющимися методами САПР-С (например, произвольно расположенной пространственной плоскостью);
- вспомогательными параметрическими поверхностями (например, для задания геометрии главной палубы могут быть использованы параметрические цилиндрические поверхности, которые имеют параметры координат полилинии палубы в диаметральной плоскости и параметры погиби бимса в плоскости мидель-шпангоута);
- конкретной параметрической поверхностью (например, «неограниченная» поперечная переборка, которая может быть определена параметром абсциссы переборки).

При реализации предлагаемого подхода важно соблюдать следующий принцип: работоспособность и преемственность системы должны сохраняться в любой момент ее развития, то есть по мере развития системы количество параметрических «граничных» поверхностей будет возрастать, но в любой момент использования системы должна сохраняться возможность сформировать произвольную «граничную» поверхность стандартными имеющимися методами САПР-С [9].

Например, для формирования гофрированной поперечной переборки (рис. 2) логично добавить в автоматизированную систему проектирования функцию, согласно которой необходимо и достаточно задать совокупность параметров, которые автоматически сформируют граничные поверхности указанной кон-

струкции. К таким параметрам будут относиться абсцисса или ордината переборки, параметры геометрии гофр, параметры геометрии «стульев» и проч.



Рис. 2. Вид гофрированной поперечной переборки

2. АЛГОРИТМ С «РАССЕКАЮЩИМИ ПЛОСКОСТЯМИ»

После формирования «рассекающих» поверхностей алгоритм создания помещений и сохранения информации о них может выглядеть следующим образом:

- определить ID (идентификатор) «элементарного» помещения,
- зафиксировать «граничные» поверхности помещения,
- при необходимости, используя булевы операции, сформировать сложные помещения на основе комбинации простых помещений,
- проверить замкнутость помещения,
- визуализировать и оценить корректность геометрии помещения.

Для указания «граничных» поверхностей помещения в автоматизированной системе проектирования целесообразно использовать интерактивный метод, то есть определять поверхности в пространственной модели судна с помощью указания на них компьютерной мышью на экране монитора.

Дополнительно для задания геометрии «элементарных» помещений можно использовать уже известный опыт, применяемый в существующих системах автоматизированного проектирования [5], когда используется «словесное» описание ограничивающих плоскостей — по две (рис. 3) на каждую из осей координат.

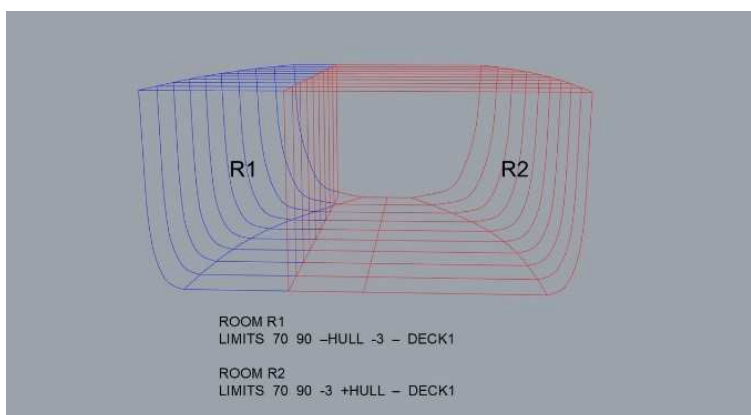


Рис. 3. Пример описания ограничивающих плоскостей

В качестве указания на ограничивающую плоскость в этом случае может выступать

- координата,
- номер практического шпангоута,
- идентификатор ранее определенной поверхности.

На рис. 4 видно, что по оси X вновь формируемый объем (в качестве примера рассмотрен объем, сформированный в системе NAPA) ограничен гофрированной переборкой (СВН) и поперечной плоскостью с абсциссой 40, по оси Y указаны продольная плоскость с ординатой 0 и поверхность корпуса, по оси Z указаны горизонтальные плоскости с аппликатами $Z1 = 1$ м и $Z2 = 8$ м.

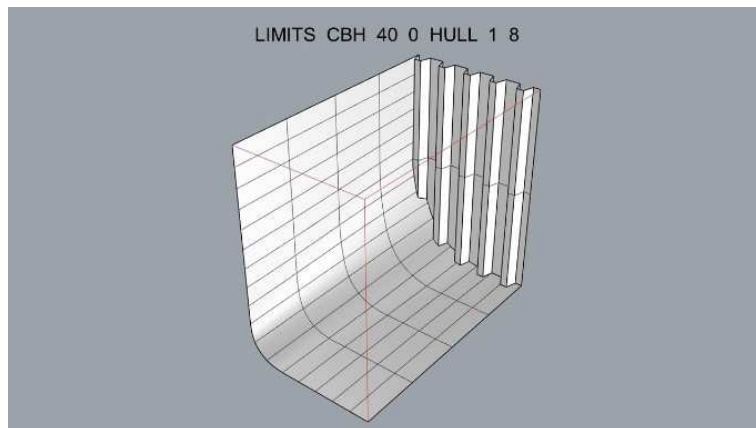


Рис. 4. Задание помещения в системе NAPA

Наличие и сохранение в базе знаний САПР-С таких записей позволит оперативно корректировать геометрию помещений, а также быстро перестраивать всю модель судна при изменении геометрических данных отдельных поверхностей.

Перспективным направлением операции формирования помещений является использование булевых операций твердотельного моделирования.

Например, при задании неограниченной поперечной переборки может быть сформирован высекающий параллелепипед (рис. 5), который разделит геометрическую модель судна и определит геометрические твердотельные модели отдельных частей судна.

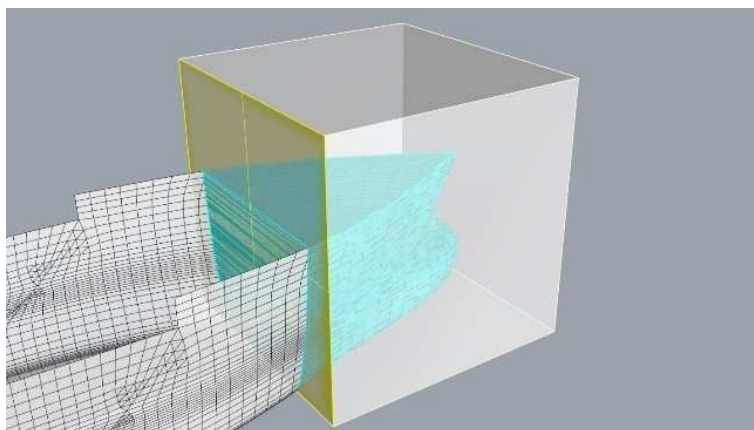


Рис. 5. Пример высекающего параллелепипеда при задании неограниченной поперечной переборки

3. ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Суммируя рассмотренные подходы, можно определить перспективный сценарий формирования помещений для использования в САПР-С (рис. 6):

- на основе поверхностной модели теоретического чертежа (рис. 6), построенной выше высоты борта, и данных о линии палубы в диаметральной плоскости (поз. 1), а также параметрически заданной линии погниби бимса (поз. 2) определяется замкнутая судовая поверхность;
- поверхности форпиковой и ахтерпиковой переборки определяются с использованием параметрического задания неограниченной поперечной переборки (например, задавая номер практического шпангоута #16#134) (рис. 6с);
- контуры сечений необходимых помещений (например, грузового танка в двух сечениях (рис. 6d)) формируются с использованием вспомогательных линий (поз. 3 и поз. 4, определяющих контуры сечений);
- граничные поверхности (S1, S2, S3, S4...) определяются на основе полученных граничных точек. При этом продольная гофрированная переборка может быть задана параметрически на основе ранее предложенного подхода;
- в итоге все граничные поверхности, определяющие замкнутый объем определяемого помещения (рис. 6d), фиксируются.

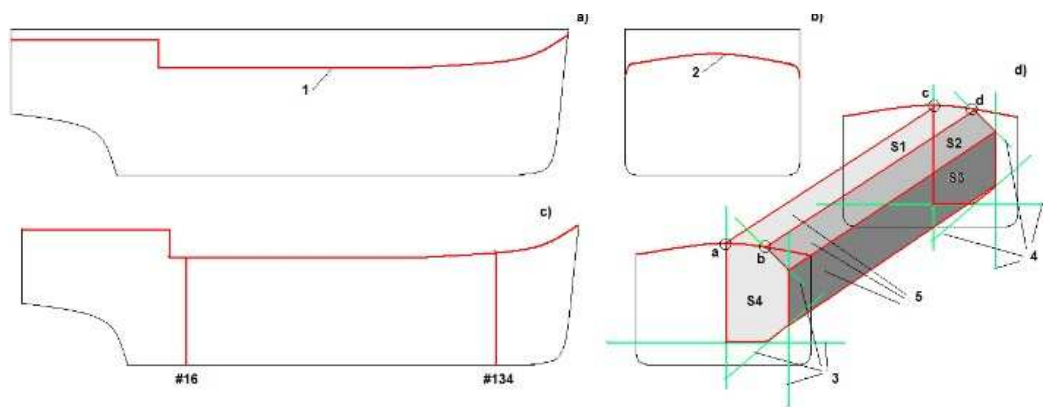


Рис. 6. Перспективный сценарий формирования помещений в САПР-С

4. ЭКСПОРТ ДАННЫХ

Следует отметить, что для решения задач калибровки цистерн, оценки остойчивости и непотопляемости, а также визуализации модели судна с помещениями, важно иметь возможность экспортировать геометрические модели помещений из САПР-С в иные расчетные программы и компьютерные системы. Это определяется тем, что решение локальных задач происходит на компьютерах, не связанных напрямую с высокопроизводительными компьютерами, на которых реализуется САПР-С.

Особенно актуальна возможность экспорта модели помещений (и судовой поверхности) в программы оценки остойчивости и непотопляемости, установленные на бортовых компьютерах судов. Такие компьютеры обычно имеют ограничения по производительности, памяти, интернет-связи, административному обслуживанию и проч., при этом точность выполняемых расчетов оценки безопасных режимов мореплавания напрямую зависит от адекватности задания модели поверхности и помещений судна.

В качестве возможного промежуточного варианта экспорта данных о помещениях является передача в другие компьютерные системы информации о совокупности линий, формирующих контуры сечения помещений с определенным шагом по оси абсцисс (рис. 3) с учетом соблюдения требований кибербезопасности [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате исследования, целью которого являлась формализация представлением данных по геометрии пространственной модели в САПР-С, может быть рекомендовано использование концепции «рассекающих» поверхностей, благодаря которой в интерактивном режиме формируются как простые, так и сложные помещения судна. В рамках алгоритма работы с «рассекающими» плоскостями фиксируется идентификатор элементарного помещения и его граничные поверхности, что дает возможность далее формировать более сложные помещения путем комбинаций помещений простых.

Дополнительным преимуществом является возможность экспорта данных в связанные компьютерные системы без потери точности.

Изложенные подходы являются перспективным сценарием формирования помещений в САПР-С, так как они обеспечивают цифровую непрерывность и возможность пополнения данных электронной модели, а также адекватное использование ее данных в иных рабочих расчетах, связанных с различными этапами жизненного цикла судна, в том числе и с расчетными программами, обеспечивающими безопасность мореплавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доработка и внедрение отечественной судостроительной САПР тяжелого класса как среды проектирования и конструкторско-технологической подготовки производства. [Электронный ресурс] URL: https://rfrit.ru/2022_oz4 (дата обращения 11.11.2024).
2. Кожина Е.В. Ключевые проблемы на пути цифровой трансформации российского судостроения / Е.В. Кожина, Е.Р. Счисляева // BENEFICIUM. 2023. № 1(46). С. 28 — 35. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2023.1(46).28-35
3. Пашин В.М. Еще раз о роли и задачах теории проектирования судов / В.М. Пашин // Судостроение. — 2012. — № 2. — С. 9 — 14.
4. Suslov A. Application of the ship's electronic data model developed by the shipyard, during subsequent stages of the ship's life / A. Suslov, O. Shulyakovsky // Proceedings of 11th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Malmo, 2002.
5. Кутейников М.А. Оценка параметров остойчивости на ранних стадиях проектирования с использованием баз знаний по судну / М.А. Кутейников, В.С. Одегов // Морской вестник. — 2015. — № 1 (53). — С. 19 — 23.
6. Рюмин С.Н. Реализация методов и алгоритмов геометрического и конструктивного моделирования в задачах параметрического проектирования конструкций корпуса судна / С.Н. Рюмин, В.Н. Тряскин // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4, т. 2. — С. 159 — 179.
7. [NAPA Designer Software: электронный ресурс] URL: <https://www.napa.fi/software-and-services/ship-design/software/napa-designer/> (дата обращения 11.11.2024).
8. ГОСТ Р ИСО 10303-21-2022 — Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 21. Методы реализации. Кодирование открытым текстом структуры обмена. М., 2022.
9. Суслов А.Н. Перспективные направления развития и наполнения электронной базы знаний по проектированию судов / А.Н. Суслов, О.В. Одегова, Ван Фэн, Лян Янь, Сунь Тяньши // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Спец. вып. 1. — С. 131 — 136.
10. Окунев В.А. Нормативные документы по обеспечению кибербезопасности и киберустойчивости морских судов / В.А. Окунев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 79 — 82.

REFERENCES

1. Dorabotka i vnedrenie otechestvennoi sudostroitel'noi SAPR tyazhelogo klassa kak sredy proektirovaniya i konstruktorsko-tehnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Refinement and Implementation of the Domestic Computer-Aided Design (CAD) of Heavy Classes as a Design and Production Preparation Environment]. URL: https://rfrit.ru/2022_oz4 (accessed 11.11.2024). (In Russ.)
2. Kozhina E.V., Schislyayeva E.R. Key problems on the way of digital transformation of Russian shipbuilding. BENEFICIUM. 2023. Vol. 1 (46). P. 28 — 35. (In Russ.) DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2023.1(46).28-35
3. Pashin V.M. Eshche raz o roli i zadachah teorii proektirovaniya sudov [Once again on the role and challenges of ship design theory]. *Sudostroenie*. 2012. No. 2. P. 9 — 14.
4. Suslov A., Shulyakovsky O. Application of the ship's electronic data model developed by the shipyard, during subsequent stages of the ship's life. *Proceedings of 11th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Malmo, 2002*.
5. Kuteynikov M.A., Odegov V.S. Estimation of the stability parameters at the early stages of design using the ship-related knowledge base // *Morskoy vestnik*. 2015. № 1 (53). P. 19 — 20. (In Russ.)
6. Ryumin S.N., Tryaskin V.N. Implementation of methods and algorithms for geometric and structural modeling in the problems of parametric design of a ship's hull structure. *Marine intellectual technologies*. 2021. № 4, t. 2. P. 159 — 179.
7. [NAPA Designer Software] URL: <https://www.napa.fi/software-and-services/ship-design/software/napa-designer/> (accessed 11.11.2024).
8. GOST R ISO 10303-21-2022 Industrial automation systems and integration. Product data representation and exchange. Part 21. Implementation methods. Clear text encoding of the exchange structure (In Russ.)
9. Suslov A.N., Odegova O.V., Yan L., Tianshi S., Fen V. Promising directions for the development and population of electronic knowledge bases on ship design. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Edition 1. P. 131 — 136. (In Russ.)
10. Okunev V.A. Regulatory documents on cybersecurity and cyber resilience of sea-going ships. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 79 — 82. (In Russ.)

УДК 629.54, 622.276.042
EDN RHHZWL

ПРОВЕРКА ЗАВИСИМОСТИ МАССЫ ВЕРХНИХ СТРОЕНИЙ ОТ ДОБЫЧНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОРСКИХ ПЛАТФОРМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А.В. Судаков, аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: sudakov.ant@gmail.com

И.Г. Чеснокова, канд. хим. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: irene750@mail.ru

В статье приведены результаты анализа зависимости массы верхних строений морских платформ от совокупного объема добычи нефти и газа. В качестве базы исследования собраны данные по массе верхних строений 128 платформ преимущественно судового типа корпуса (FPSO). В статье рассмотрен результат работы, в ходе которой проанализированы факторы, влияющие на массу верхних строений, построена диаграмма рассеяния и на основании регрессионного анализа модели сформировано уравнение линейной регрессии. В работе также представлена зависимость массы верхних строений от производительности платформ по добыче углеводородов, а также приведены результаты корреляционно-регрессионного анализа, на основании которого сформирована статистическая модель массы верхних строений. Практическая ценность заключается в возможности использования модели для оценки массы верхних строений на ранних стадиях проектирования в зависимости от заданной производительности платформы типа FPSO как по добываемой нефти, так и по попутному газу.

Ключевые слова: масса верхних строений, статистическая зависимость, добыча углеводородов, морские платформы, корреляционный анализ.

Для цитирования: Судаков А.В. Проверка зависимости массы верхних строений от добычной производительности морских платформ с применением статистической модели / А.В. Судаков, И.Г. Чеснокова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 87 — 93. — EDN RHHZWL.

VERIFICATION OF THE TOPSIDE WEIGHT DEPENDENCE ON THE PRODUCTIVITY OF OFFSHORE PLATFORMS USING A STATISTICAL MODEL

A.V. Sudakov, postgraduate student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: sudakov.ant@gmail.com

I.G. Chesnokova, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, email: irene750@mail.ru

The paper covers the dependence of the upper structures' masses of offshore oil and gas production platforms on the total production volume. For research purposes, the authors collected an array of data on the masses of 128 platforms' topsides, mainly of the ship's hull type. The article analyzes the factors, which affect topside weight of the platform. The authors formed a scattering diagram and a linear regression equation, based on the regression analysis of the model. The paper presents the dependence of the masses of the upper structures on the performance of hydrocarbon production platforms, as well as a correlation and regression analysis, which became a base for a statistical model of topsides' weights. The practical value lies in the possibility of using the model to estimate the mass of the upper structures at the early stages of design, depending on the specified performance of the FPSO platform for both produced oil and associated gas.

Keywords: topsides weights, statistical dependence, hydrocarbon production, offshore platforms, correlation analysis.

For citation: Sudakov A.V., Chesnokova I.G. Verification of the topside weight dependence on the productivity of offshore platforms using a statistical model. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 87 — 93. EDN RHHZWL.

ВВЕДЕНИЕ

Масса верхнего строения плавучего завода по добыче, переработке, хранению и отгрузке углеводородов (далее — FPSO) во многом определяет облик будущего строения, а также нагрузки, которые будет испытывать сооружение при эксплуатации [1]. Достаточно точно оценив ее на ранних этапах проектирования, проектант способен более верно рассчитать капитальные затраты и сроки строительства. В настоящее время оценка массы верхнего строения (далее — ВС) на ранних этапах проектирования стала доступнее благодаря достаточному количеству реализованных проектов, на основании данных о массе верхних строений которых можно построить зависимость массы от производительности по добыче нефти и попутного газа, выраженной в миллионах Британских Термических Единиц (далее — ММВТУ). Существует несколько методов оценки массы ВС, таких как метод оптимизаций, метод базового копирования, метод машинного обучения, которые применялись в ряде научных работ, посвященных теме оценки массы ВС на ранних этапах проектирования [2, 3]. Статистический метод основан на предположении, что масса верхнего строения может быть рассчитана на основании суперпозиции ряда параметров, таких как производительность, конфигурация, тип используемых модулей и др. [4]. Одной из задач статьи поставлено оценить практическую ценность модели для оценки масс ВС, а главной целью статьи — продемонстрировать применимость статистического метода оценки массы ВС на основании массива данных о массах и производительности реализованных проектов.

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ

Для возможности составления уравнения зависимости массы верхнего строения от производительности была сформирована база данных по 128 реализованным проектам. При обработке информации учитывались такие факторы, как масса верхнего строения и производительность, год постройки, тип (новострой или конверсия), глубина моря на месте добычи. Производительность рассматривалась по нефти вместе с попутным газом, поэтому все значения были приведены к общей единице измерений — ММВТУ.

Сформированная база данных позволяет предположить существование линейной зависимости. В результате регрессионного анализа с применением пакета Excel [5], языка программирования Python и библиотеки NumPy были получены коэффициенты уравнения линейной регрессии, которое в результате приняло вид, показанный в формуле:

$$y = 0,209x - 2036.$$

В результате была сформирована диаграмма рассеяния [6], совмещенная с графиком линейного тренда зависимости массы верхнего строения от производительности FPSO (см. рис. 1).

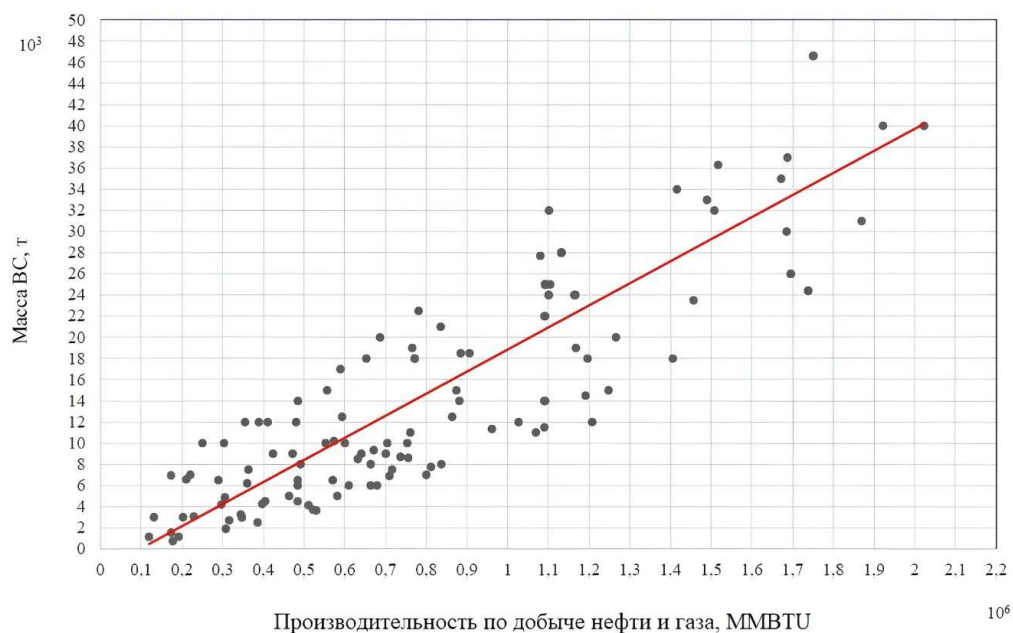


Рис. 1. Диаграмма рассеяния и график линейного тренда зависимости массы ВС от производительности FPSO

Для того чтобы определить прогностическую силу модели, необходимо вычислить коэффициент детерминации (R^2). Коэффициент детерминации принимает значения от 0 до 1, где значение 1 означает, что модель полностью объясняет вариацию в данных, а значение 0 означает, что модель не объясняет вариацию в данных. Чем ближе коэффициент детерминации к 1, тем лучше модель соответствует данным. При помощи пакета Excel было получено значение $R^2 = 0,77$. Оценить полученное значение можно используя шкалу Чеддока, приведенную в табл. 1.

Таблица 1

Шкала Чеддока

Качественная мера тесноты связи	Качественная характеристика силы связи
0,1 — 0,3	слабая
0,3 — 0,5	умеренная
0,5 — 0,7	заметная
0,7 — 0,9	высокая
0,9 — 1	весьма высокая

Исходя из данных табл. 1 сделан вывод, что прогностическая сила модели высока, однако регрессионный анализ не является достаточным для оценки модели.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Для убеждения в статической значимости зависимости проводится корреляционный анализ: он является мощным инструментом статистического анализа, который позволяет изучать связь между двумя переменными. Существует несколько видов коэффициентов корреляции: Спирмена, Пирсона и Кенделла [7]. Однако перед их использованием стоит убедиться в нормальности распределения выборок производительности и массы верхних строений, так как коэффициент Пирсона не может применяться в случае, если выборка не подчиняется нормальному закону.

Для того чтобы проверить выборки на нормальность распределения, стоит провести несколько тестов. Так как выборка является довольно большой ($n = 128$), было принято решение использовать как визуальную, так и статистическую оценку на нормальность. Проведение всех тестов происходило при помощи языка программирования Python и встроенных библиотек NumPy и SciPy. Первым является построение гистограммы распределения значений выборки и ожидаемой нормальной кривой. Результаты теста для выборки по производительности FPSO и теста для выборки по массе верхних строений FPSO представлены соответственно на рис. 2 и 3.

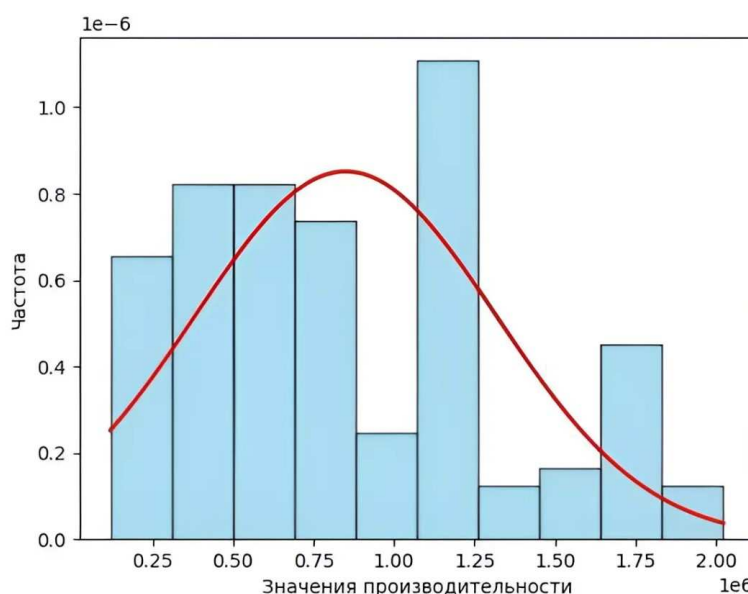


Рис. 2. Гистограмма распределения значений производительности FPSO и ожидаемой нормальной кривой

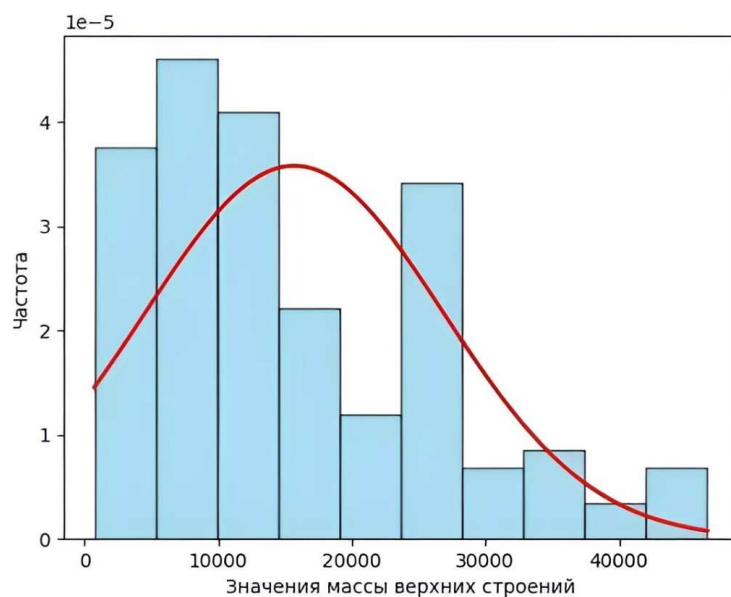


Рис. 3. Гистограмма распределения значений массы верхних строений FPSO и ожидаемой нормальной кривой

Данные не следуют нормальному распределению: на гистограммах можно наблюдать явные отклонения от ожидаемой симметричной колоколообразной формы нормального распределения.

Также были построены квантиль-квантиль графики выборок. На подобных графиках сравниваются квантили (процентные точки) наблюдаемых данных с квантилями, которые ожидаемо имеются в теоретическом распределении. Если точки на графике лежат близко к прямой, это указывает на сходство между выборочным и теоретическим распределением. Если точки значительно отклоняются от прямой, это говорит о несоответствии данных предполагаемому распределению. Результат построения квантиль-квантиль графика для выборки по производительности FPSO и графика для выборки по массе верхних строений представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

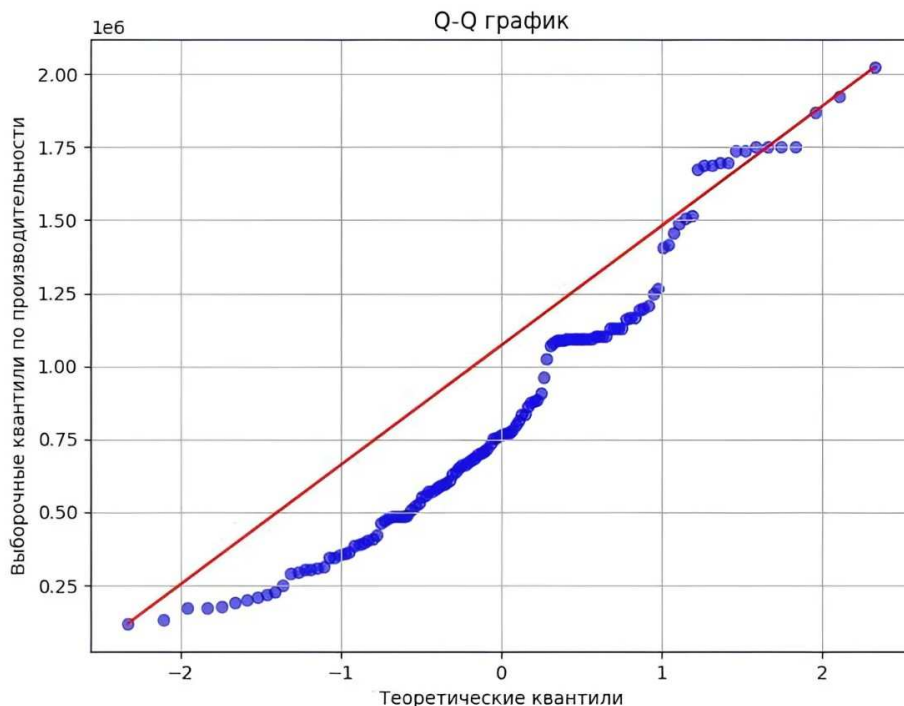


Рис. 4. Квантиль-квантиль график выборки по производительности FPSO

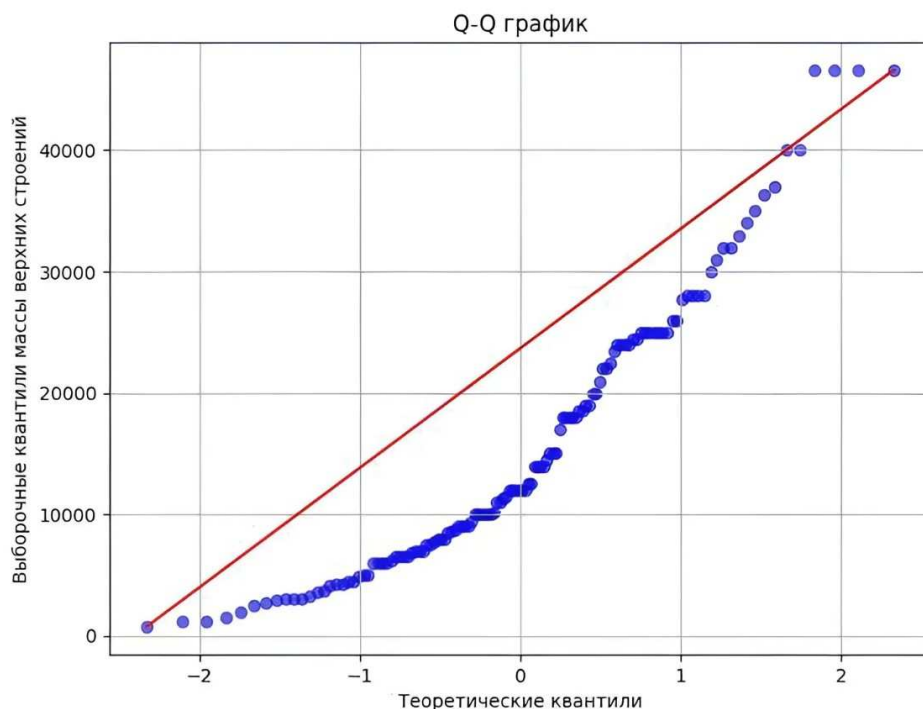


Рис. 5. Квантиль-квантиль график выборки по массе верхних строений FPSO

Последний тест, который необходимо провести, — статистический тест Колмогорова — Смирнова [8]. Для его проведения требуется сформулировать две гипотезы: 1) нулевая гипотеза (H_0) — распределение выборки соответствует нормальному распределению; 2) альтернативная гипотеза (H_1) — распределение выборки не соответствует нормальному распределению.

Также необходимо выбрать уровень значимости α : так как выборка достаточно большая, желание избежать ошибки первого рода более предпочтительно (ситуация, когда отвергнута верная нулевая гипотеза), и выбранный уровень значимости будет равен $\alpha = 0,05$. Подобный уровень значимости является достаточно консервативным в статистических исследованиях.

Интерпретация результатов теста Колмогорова — Смирнова заключается в следующем: если p -значение больше выбранного уровня значимости, то нет оснований отвергать нулевую гипотезу, и можно считать, что выборка соответствует нормальному распределению; если p -значение меньше выбранного уровня значимости, то нулевая гипотеза отвергается в пользу альтернативной гипотезы, и можно считать, что выборка не соответствует нормальному распределению. Результаты теста Колмогорова — Смирнова представлены в табл. 2.

Таблица 2

Выборка	P-значение
Производительности FPSO	0,02104
Массы ВС FPSO	0,00099

Таким образом, ни одна из выборок не подчиняется нормальному закону, так как оба p -значения меньше уровня значимости $\alpha = 0,05$, и поэтому применение коэффициента Пирсона для оценки статистической значимости представленных выборок становится невозможным. Тогда для корреляционного анализа будут использоваться коэффициенты Спирмена и Кендалла. В итоге были получены значения коэффициентов, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Результаты тестов Спирмена и Кендалла

Коэффициент корреляции	Значение корреляции	P-значение
Спирмена	0,87	$1,45 \cdot 10^{-40}$
Кендалла	0,69	$4,86 \cdot 10^{-30}$

Для оценки полученных коэффициентов будем использовать шкалу Чеддока, как и в случае с коэффициентом детерминации. Полученные данные по тесту Спирмена указывают на высокую положительную связь между переменными. Также p -значение $= 1,45 \cdot 10^{-40}$, которое меньше уровня значимости $\alpha = 0,05$, говорит о высокой степени статистической значимости коэффициента Спирмена.

Полученные данные по тесту Кендалла также означают наличие связи между переменными. Как и в случае с коэффициентом Спирмена, присутствует ярковыраженная статистическая значимость коэффициента Кендалла, поскольку p -значение $= 4,86 \cdot 10^{-30}$ значительно меньше вышеупомянутого уровня значимости $\alpha = 0,05$ [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были представлены результаты проверки зависимости массы верхних строений морских платформ от их добычной производительности с применением статистической модели. В ходе исследования были собраны данные по массе верхних строений 128 платформ преимущественно судового типа корпуса (FPSO).

Построенная диаграмма рассеяния и проведенный регрессионный анализ позволили сформировать уравнение линейной регрессии, которое описывает зависимость массы верхних строений от производительности платформ.

Корреляционно-регрессионный анализ подтвердил высокую степень зависимости массы верхних строений от объема добычи углеводородов. Разработанная статистическая модель предоставляет возможность оценки массы верхних строений на ранних стадиях проектирования платформ типа FPSO, что имеет значительную практическую ценность для нефтегазовой отрасли.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что применение статистической модели позволяет более точно прогнозировать массу верхних строений морских платформ в зависимости от их производительности, что способствует более эффективному и экономичному проектированию и эксплуатации таких объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьева О.А. Применение нормативных документов Российского морского регистра судоходства при определении внешних нагрузок на сооружения континентального шельфа России / О.А. Григорьева, М.А. Кутейников, А.С. Большев, С.А. Фролов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 117 — 127. — EDN JPRVYH.
2. Ha S. A structural weight estimation model of FPSO topsides using an improved genetic programming method / T.S. Um, M.I. Roh, H.K. Shin // Ships and Offshore Structures. — 2015. — Vol. 12. — No. 1. — P. 43 — 55.
3. Yao Ch. Machine Learning Based FPSO Topsides Weight Estimation for a Project on an Early Stage / Ch. Yao, X. Ren, D.M. Valiveti, S.H. Ryu et al. // Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023. — DOI: 10.4043/32304-MS
4. Ha S. Simplified nonlinear model for the weight estimation of FPSO plant topside using the statistical method / S. Ha, S.-H. Seo, M.-I. Roh, H. Shin // Ships and Offshore Structures. — 2016. — Vol. 11, No. 6. — P. 603 — 619.
5. Кеткина О.С. Возможности MS Excel для регрессионного анализа / О.С. Кеткина. — Екатеринбург, 2020. — 43 с.
6. Метод наименьших квадратов. [Электронный ресурс] URL: http://mathprofi.ru/metod_naimenshih_kvadratov.html (дата обращения: 12.03.2024).
7. Ревенко Д.С. Статистическая оценка динамических процессов с неопределенными данными / Д.С. Ревенко, В.М. Вартамян, Ю.А. Романенков // Економіка та управління підприємствами машинобудівної галузі. — 2008. — № 4 (4). — С. 53 — 63.
8. Метод Колмогорова-Смирнова. [Электронный ресурс] URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods10.html> (дата обращения: 24.02.2024).
9. Академия НАФИ: Корреляционный анализ. [Электронный ресурс] URL: https://nafi.ru/upload/spss/Lecture_6.pdf (дата обращения: 12.03.2024).

REFERENCES

1. Grigorieva O.A., Kuteynikov M.A., Bolshhev A.S., Frolov S.A. Application of normative documents of the Russian Maritime Register of Shipping in determining external loads on structures of the continental shelf of Russia // Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. 2023. No. 70/71. P. 117 — 127. — EDN JPRVYH.
2. Ha S., Um T.S., Roh M.I., Shin H. K. A structural weight estimation model of FPSO topsides using an improved genetic programming method // Ships and Offshore Structures. 2015. Vol. 12. No 1. P. 43 — 55.
3. Yao Ch. Machine Learning Based FPSO Topsides Weight Estimation for a Project on an Early Stage / Ch. Yao, X. Ren, D.M. Valiveti, S.H. Ryu et al. // Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023. DOI: 10.4043/32304-MS
4. Ha S., Seo S.-H., Roh M.-I., Shin H. Simplified nonlinear model for the weight estimation of FPSO plant topside using the statistical method. *Ships and Offshore Structures*. 2016. Vol. 11. No. 6. P. 603 — 619.
5. Ketkina O.S. Vozmozhnosti MS Excel dlya regressionnogo analiza [Features of MS Excel for regression analysis]. Ekaterinburg, 2020. 43 p.
6. Metod naimen'shikh kvadratov [The least squares method]. URL: http://mathprofi.ru/metod_naimenshih_kvadratov.html (accessed 12.03.2024).
7. Revenko D.S., Vartanyan V.M., Romanenkov Yu.A.: Statisticheskaya otsenka dinamicheskikh protsessov s neopredelennymi dannymi [Statistical evaluation of dynamic processes with uncertain data] // Економіка та управління підприємствами машинобудівної галузі. 2008. No. 4 (4). P. 56 — 64.
8. Metod Kolmogorova-Smirnova [Kolmogorov-Smirnov method]. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods10.html> (accessed 24.02.2024).
9. Akademiya NAFI: Korrelyatsionnyy analiz [Correlation analysis]. URL: https://nafi.ru/upload/spss/Lecture_6.pdf (accessed 12.03.2024).

УДК 629.12
EDN TJHRFI

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕМЕНТАМ ОСТЕКЛЕНИЯ МАЛЫХ СУДОВ И ЯХТ

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

В статье рассмотрены вопросы совершенствования требований к остеклению яхт и малых судов. Приведены сведения о материалах остекления и общие закономерности расчета толщин. На примере широко применяемых зарубежных стандартов и правил классификационных обществ проанализированы подходы к установке остекления в различных зонах и его характеристикам. Для судна длиной 24 м выполнены сравнительные расчеты по различным методикам. Статья проиллюстрирована практическими примерами конструктивных решений остекления и закрытий на судах зарубежной постройки. Затронута идеология Конвенции о грузовой марке, выявлены различия с современными стандартами, даны рекомендации по совершенствованию отечественной нормативной базы.

Ключевые слова: остекление, окна, малые суда, яхты.

Для цитирования: Назаров А.Г. Совершенствование требований к элементам остекления малых судов и яхт / А.Г. Назаров, С.А. Королев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 94 — 104. — EDN TJHRFI.

IMPROVEMENT OF REQUIREMENTS TO GLAZING ELEMENTS ON SMALL CRAFT AND YACHTS

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

The paper discusses the issues of improving the requirements for the glazing of yachts and small craft. The data on glazing materials and general patterns of thickness calculation are given. Based on the example of widely used foreign standards and rules of classification societies, approaches to the use of glazing in various zones and its characteristics are analyzed. Comparative calculations were performed for a craft with a length of 24 m using various methods. The article is illustrated with practical examples of structural solutions for glazing and closures on foreign-built ships. The ideology of the Load lines code is touched upon, differences with modern standards are identified, and recommendations are made to improve the domestic regulatory framework.

Key words: glazing, windows, small craft, yachts.

For citation: Nazarov A.G., Korolev S.A. Improvement of requirements to glazing elements on small craft and yachts. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 94 — 104. EDN TJHRFI.

ВВЕДЕНИЕ

Конкуренция на рынке рекреационных судов (т. е. длиной корпуса $LH \leq 24$ м, используемых для спорта и отдыха по Европейской директиве 2013/53/EU), малых коммерческих судов и яхт заставляет проектировщиков и судостроителей искать новые решения в дизайне и обеспечении комфорта. В последние годы можно отметить тенденции к установке на них остекления большой площади: как в надстройках, так и в бортах судов. Сродни «береговой» архитектуре, на воде остекление позволяет создавать привлекательные для потребителей пространства и обеспечивает эффект простора интерьеров.

Ведущие классификационные общества (КО) выработали технические требования к решениям по остеклению, позволяющие обосновать их безопасное использование. Учитывая сравнительную новизну требований для малых судов и яхт в нормативном поле РФ, является актуальным изучение опыта иностранных КО и стандартов. В настоящей статье авторами поставлены задачи проанализировать действующие подходы к оценке элементов остекления рекреационных судов и яхт, включая коммерческие малые суда, и обосновать предложения для корректировки отечественных норм.

СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ОСТЕКЛЕНИЯ

На рис. 1 и 2 представлены характерные черты современных рекреационных судов, встречающиеся в большинстве зарубежных проектов. Так, практически всегда с кроватей в каютах должно быть видно воду, что обуславливает применение бортового остекления большой площади. Кроме того, специально для врезки в остекление выпускаются модели иллюминаторов, которые выглядят заподлицо стеклу и позволяют обеспечить естественную вентиляцию на стоянке. Характерная черта палубы — это формирование единого пространства с салоном, для чего кормовая дверь выполняется сдвижной, большой площади и практически без комингса. Вместо этого стандартом ISO 11812 предусмотрены ниши-водосборники (foot basin) перед дверями, размер и глубина которых рассчитывается согласно стандарту; в этом случае привычный «комингс» отсутствует. Дополняют картину функционального судна палубные люки с нулевым комингсом (применены дренажные каналы с уплотнителями), что не только максимизирует полезное пространство (например, для раскладной палубной мебели), устраняет риск споткнуться, но и позволяет получить доступ к кладовым в неиспользуемых объемах корпуса. Как можно заметить, архитектура и подходы к безопасности и функциональности малых судов и яхт существенно отличаются от предписанных КГМ [2].



Рис. 1. Катamarаны проектов H48 (а) и SG14 (б) с бортовым остеклением большой площади и сдвижными дверями салона; оба судна сертифицированы для коммерческой перевозки 36 пассажиров по NSCV [1]¹

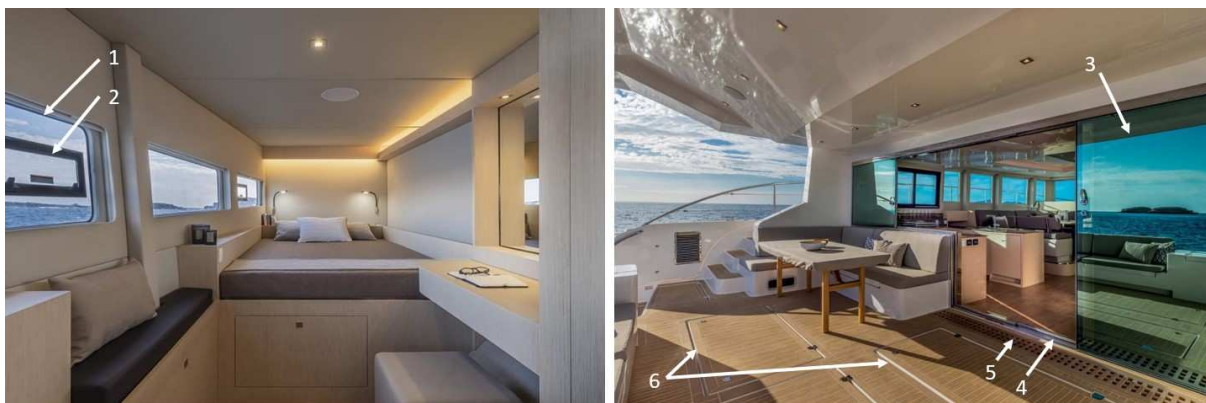


Рис. 2. Каюта и кормовая палуба яхты-катamarана SY60, категория А по RCD:

1 — бортовое остекление; 2 — открывающийся иллюминатор, врезанный в остекление; 3 — сдвижная дверь большой площади; 4 — минимальный «комингс» в виде рельса сдвижной двери; 5 — ниша-водосборник; 6 — палубные люки с нулевым комингсом

¹ Все использованные в статье иллюстрации предоставлены авторами.

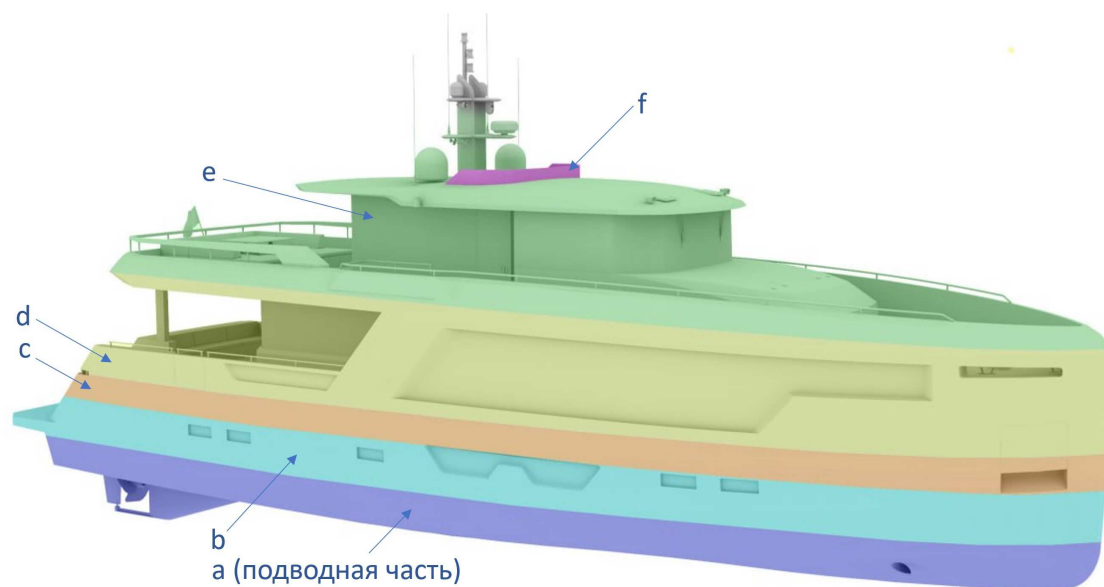


Рис. 3. Пример зонирования корпуса и надстроек яхты длиной 24 м

ЗОНИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОСТЕКЛЕНИЯ

Из выполненного авторами анализа применяемых в современных проектах малых судов и яхт решений, а также нормативных документов, можно выделить следующие основные зоны остекления:

a. остекление подводной части корпуса — окна для наблюдения за обитателями моря, подводные светильники и т.д.;

b. остекление надводной части борта ниже лимитирующей линии — бортовые иллюминаторы, окна, эвакуационные люки парусных яхт;

c. остекление борта выше предельной линии — бортовые иллюминаторы и окна, а также палубные люки главной палубы;

d. остекление надстроек и рубок нижнего яруса;

e. остекление надстроек и рубок верхних ярусов;

f. остекление незамкнутых объемов — ветровое остекление флайбриджа или рулевой консоли и т.д.

Для установки и сертификации устройств зоны «*a*» применяются прямые расчеты или испытания, а также конструктивные мероприятия для ограничения затопления в случае повреждения устройств, например колодцы или водонепроницаемые «стаканы».

Устройства для зон «*b*» и «*c*» существенно ограничены в «большом» судостроении, но широко представлены (в т.ч. большой площадью остекления и открывающимися устройствами) на судах малого размера (включая рекреационные и коммерческие ограниченных районов плавания), а также на яхтах длиной более 24 м. Например, для зоны «*b*» на рынке существуют модели люков или разбиваемых стекол, устанавливаемых в области тоннеля парусных катамаранов в соответствии с ISO 12217-2 для выхода из корпуса в случае опрокидывания судна (рис. 4).

Устройства для зон «*d*» и «*e*» могут включать глухие, открывающиеся или сдвижные устройства, и при этом для рассматриваемых типов судов обычно не используются какие-либо постоянно закрепленные штормовые крышки.

Устройства для зоны «*f*» не должны обеспечивать непроницаемость и обычно не регламентируются, а их исполнение определяется конструктивными соображениями.

Различия в требованиях большинства далее рассматриваемых КО заключаются в определении положения лимитирующей линии и формулах для расчета толщин остекления, а также в допуске тех или иных элементов остекления в соответствующих зонах.



Рис. 4. Эвакуационный люк категории водонепроницаемости 1 по ISO 12216 на катамаране IS410, установлен в помещении санузла. Судно серийное, имеет сертификат CE на категорию A (8 человек), а на категории C и D — на 28 человек на борту

МАТЕРИАЛЫ ОСТЕКЛЕНИЯ И ПОДХОДЫ К РАСЧЕТАМ

Для остекления применяется ряд материалов, приведенных в табл. 1 наряду с их прочностными характеристиками; также используется ламинированное стекло, состоящее из нескольких слоев указанных в таблице материалов.

Таблица 1

Свойства материалов остекления по данным ISO 12216, ABS и BV

Материал	Предел прочности при изгибе, σ_u , МПа			Модуль упругости при изгибе, E , МПа		
	ISO	ABS	BV	ISO	ABS	BV
Полиметилметаакрилат (ПММА)	100	110	—	3000	3000	—
Поликарбонат (PC)	90	93	—	2400	2345	—
Термоупрочненное стекло (TTG)	200	119	150	72600	7300	—
Химически упрочненное стекло (CTG)	300	—	200	72600	—	—

Значительный разброс свойств стекла (присутствующий и в спецификациях поставщиков) обусловлен влиянием микродефектов на прочностные характеристики, а также различиями в методиках тестирования. Указанный разброс вынуждает использовать высокие коэффициенты запаса (>3) при проектировании конструкций из стекла.

В теории пластин толщина стекла t определяется из условия прочности и иногда дополнительно — из условия жесткости (или допустимого прогиба). Первое условие можно обобщенно записать как

$$t = b \sqrt{P/\sigma} \times \prod k_i \geq t_{\min}, \quad (1)$$

где b — меньший размер стекла;

$\prod k_i$ — коэффициенты, зависящие от материала, соотношения сторон стекла, места установки и т.д.;

P — расчетное давление на конструкции в месте расположения стекла;

σ — допускаемое напряжение.

Величина $t_{\min}$ назначается директивно в зависимости от типа материала, длины судна и т.д.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ЗАРУБЕЖНЫХ КО И СТАНДАРТОВ

1. Суда длиной менее 24 м.

Пожалуй, методика GL [3] в настоящее время имеет лишь историческую ценность (в связи с упразднением этого КО); формула для толщины остекления t выглядит как:

$$t = n\sqrt{(F \times F_b)/y}, \quad (2)$$

где F — площадь поверхности стекла;
 F_b — надводный борт;
 y — высота центра окна над плоскостью действующей ватерлинии;
 n — коэффициент, учитывающий материал и категорию судна.

В приведенной формуле отсутствует размер стекла b , поэтому можно предположить, что она получена для иллюминаторов и окон с соотношениями сторон, близкими к единице.

Наиболее распространенным на сегодняшний день для малых судов является стандарт ISO 12216 [4]; он подразумевает категории судов А — D и содержит следующие группы требований:

- устанавливает зонирование частей судна (I, IIa, IIb, III и IV);
- устанавливает степени непроницаемости закрытий (1 — 4) и соответствующие им зоны судна;
- содержит требования к устройствам в каждой зоне;
- содержит методику расчета прочности закрытий (в т.ч. остекления);
- содержит методику испытаний закрывающих устройств.

Стандартом накладываются ограничения на использование остекления в зоне I: открывающиеся устройства должны располагаться не ближе 200 мм к КВЛ и иметь неподкрепленный размер остекления не более 300 мм (указанные требования не применяются для эвакуационных люков). Лимит зоны I проходит по минимальной «высоте заливания», составляющей $L_H/17$ с плавным подъемом к носовой части судна на 20 %. В остальных зонах остекление применять можно без существенных ограничений как глухое, так и открывающееся. Сами формулы для оценки толщины остекления имеют вид (1) с учетом категории, прочностных характеристик, коэффициентов запаса и т.д. Отличия от других методик заключаются в учете кривизны панели, а также фактора снижения давления (аналог применяемого в расчете прочности для слеминговых нагрузок). Основной идеей стандарта ISO 12216 является равнопрочность остекления конструкции, в которой оно устанавливается.

Австралийский стандарт NSCV [1] для коммерческих судов предполагает 5 категорий судов от А до Е. В части остекления австралийские требования для судов длиной до 24 м привязаны к ISO 12216, категория А по [4] сопоставлена с категорией В по NSCV [1], а категория D — категории Е по NSCV. Основные положения NSCV для судов длиной до 24 м (включая пассажирские) при установке элементов остекления ниже уровня водонепроницаемой палубы следующие:

- прочность элементов остекления эквивалентна прочности основных конструкций;
- предусматривается защита от повреждения при контакте/навале;
- разрешены глухие окна или иллюминаторы на высоте не менее 500 мм от ватерлинии в полном грузу для категорий А, В, С и 200 мм — для D и Е;
- разрешены открывающиеся иллюминаторы ниже уровня палубы для категорий С, D, Е на высоте не менее 750 мм для судов длиной до 12 м и 1000 мм для остальных судов;
- при этом открывающиеся устройства не должны быть расположены в носовой четверти корпуса и в помещениях с высокой пожарной опасностью;
- снабжены табличками «закрывать в море»;
- для судов категории С требуются постоянно закрепленные штормовые крышки открывающихся устройств.

Дополнительных ограничений по остеклению надстроек в NSCV не содержится, в том числе нет требований к штормовым крышкам и т.д. Стандарт содержит Приложение С, в котором приведен метод расчета толщины t рубочных стекол:

$$t = \sqrt{10\beta H b^2 / \sigma},$$

где β — коэффициент соотношения сторон;
 H — расчетный напор, принимаемый по [1] в зависимости от длины судна и расположения элемента;
 b — ширина панели;
 σ — расчетное напряжение, принимаемое по [1] в зависимости от материала стекла.

Дополнительно к условию прочности проверяется также условие жесткости при допустимой величине прогиба $1/100$ от пролета короткой стороны стекла.

В рамках рассматриваемой темы интересны также требования NSCV к комингсам дверей и люков верхней палубы, поскольку эти устройства зачастую выполняются с остеклением. Для люков и дверей судов длиной менее 24 м (в т.ч. пассажирских) категорий А — Е предписывается установка комингсов высотой до 100 — 300 мм (включая съемные комингсы дверей) в зависимости от категории судна и расположения устройства. При этом для всех категорий, для дверей и люков, обычно закрытых в море (что допускает открытие устройств на короткое время), разрешены нулевые комингсы люков и дверей, при условии наличия уплотнителя и предупредительных надписей. Аналогичные требования применяются к судам длиной более 24 м, однако в этом случае предписываемая высота комингсов увеличивается до 300 — 600 мм для высших категорий А — С и 150 — 300 мм для всех остальных; возможность использования решений без комингсов также сохранена.

Стандарт DNV0342 [5] для коммерческих судов $L_H < 24$ м не использует зонирование в явном виде, а толщина остекления t определяется как

$$t = \frac{b}{K} \sqrt{\beta P},$$

где b — меньший размер стекла;
 K — коэффициент, зависящий от материала, принимаемый 225 для СТГ и ТТГ, 190 для РММА и РС;
 β — коэффициент, зависящий от соотношения сторон стекла;
 P — расчетное давление на конструкции в месте расположения стекла.

Рассчитанная таким образом толщина может быть уменьшена на 25 % в местах, не подверженных нагрузкам от воздействия моря. Допускается установка стекол в рамках или методом приклейки, а в местах, где стекла не испытывают давление, — с использованием резиновых профилей, при условии увеличении толщины стекла на 20 %. Для стекол из РММА и РС ширина участков опорного контура должна быть не менее $0,03b$. Касательно комингсов дверей и люков, при ряде условий по DNV0342 допускается применение люков без комингсов и дверей со съемными комингсами.

Китайское КО CCS [6] имеет требования для яхт как длиной до 24 м, так и большей длины. Для судов до 24 м применение остекления в бортах и надстройках не ограничено, в том числе и для открывающихся устройств. Для открывающихся иллюминаторов, расположенных ниже лимитирующей линии 500 мм от КВЛ, требуются штормовые крышки, закрываемые в море. Для оценки толщины остекления применяется формула типа (1), а также предлагается расчетная формула для ширины приклейки стекол. Аналогичные требования содержатся в правилах CCS [7] для малых морских судов длиной до 20 м, причем интересной особенностью является наличие четко сформулированных требований к расчету смотровых окон в подводной части судна.

2. Суда (яхты) длиной более 24 м.

Для рассматриваемых в статье типов судов, интерес представляют правила Регистра Ллойда для специальных судов и их раздел по яхтам [8]. На первый взгляд, правила довольно консервативны, но допускают установку любых застекленных устройства по особому рассмотрению и согласованию с администрацией флага судна. В частности, в [8] предусмотрены иллюминаторы и окна (устанавливаемые не ниже 500 мм от КВЛ); смотровые стекла в подводной части, скайлайты, стеклянные двери и «переборки» и с недавних пор — стеклянные балюстрады. Требования к наличию штормовых крышек дифференцированы; в частности, для ламинированного стекла таковые необязательны. Толщина стекла в бортах определяется как

$$t = 0,005b\sqrt{\beta P},$$

где b — ширина стекла;
 β — коэффициент соотношения сторон;
 P — расчетное давление.

Для рассматриваемых типов судов правила ABS [9] содержат требования для яхт (длиной 24 — 90 м) и для высокоскоростных судов. В редакции 2022 г. разрешенная площадь иллюминаторов и окон ниже водонепроницаемой палубы увеличена с 0,16 до 0,85 м² при условии выполнения испытаний, а также введен ряд послаблений: например, для яхт, не требующих свидетельства о грузовой марке, не требуются штормовые крышки.

Минимальная толщина остекления рубочных окон t определяется из условий прочности и жесткости по тем же зависимостям, что используются и для пластин обшивки:

$$t = s\sqrt{pk/(1000\sigma_f)}; \quad t = s^2\sqrt{pk_1/(20E)},$$

где s — меньший размер стекла;

p — расчетное давление;

k, k_1 — коэффициенты, зависящие от соотношения сторон остекления;

σ_f, E — предел прочности и модуль упругости материала при изгибе.

Минимальная толщина бортовых иллюминаторов круглой формы определяется как $(0,025 — 0,05)d$, прямоугольной — $(0,045 — 0,091)sk^{0,5}$; при этом для расположенных в корпусе высокоскоростных судов ограниченного района плавания иллюминаторов предусмотрено снижение толщин на 15 — 20 %.

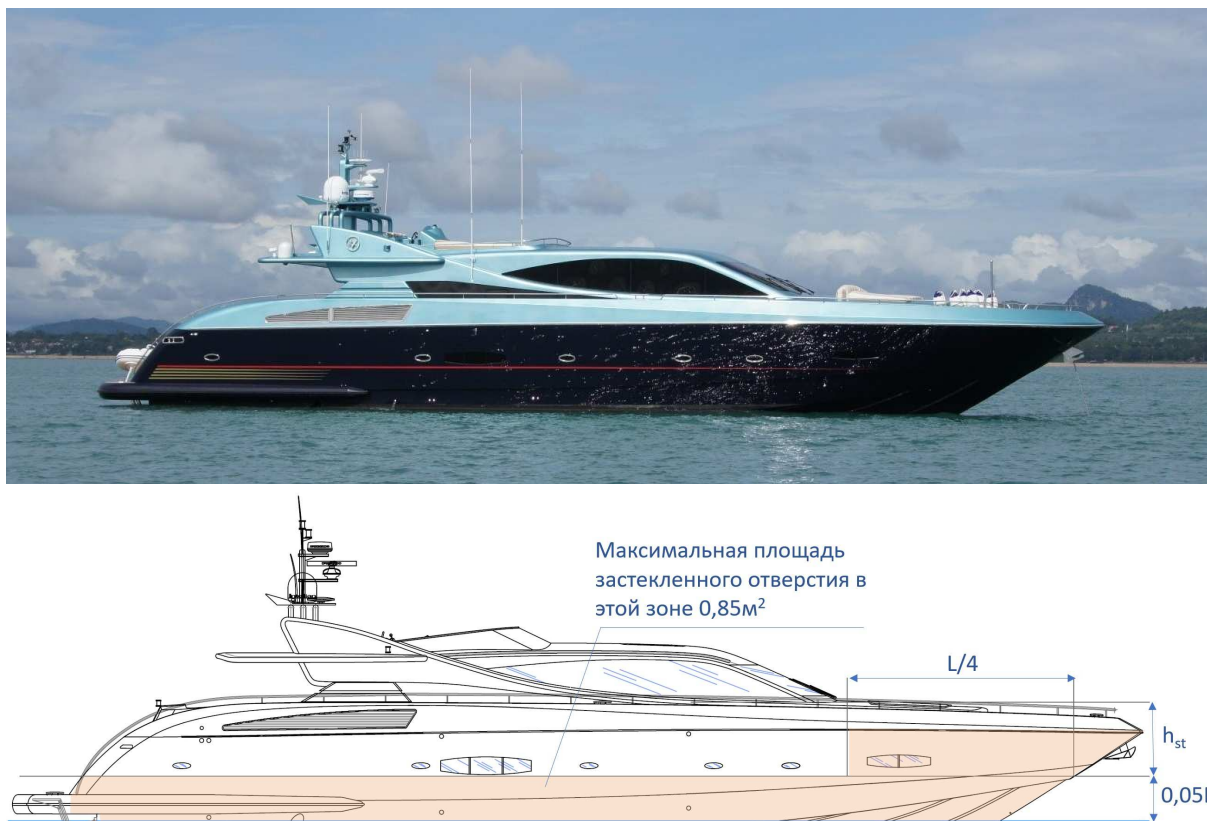


Рис. 5. Установка остекления для яхты пр. SB90 длиной 27 м по ISO 11336-1

Стандарт ISO 11336-1 [10] для «больших яхт» (так указано в названии стандарта) предлагает методы оценки толщины остекления на основе формул типа (1); там же предусмотрен метод оценки характеристик ламинированного стекла и указания по размещению остекления (рис. 5, 6). Правила DNV для яхт [11] в расчете остекления ссылаются на стандарт ISO 11336-1.

Правила BV [12] для яхт рассматривают два типа закрепления остекления: свободно опертое и защемленное; формулы имеют вид (1) с корректирующими факторами на тип закрепления.

CCS [6] для яхт длиной более 24 м допускают установку окон и иллюминаторов в бортах при высоте не менее 500 мм или $0,025B$ от КВЛ; размеры стекол не ограничиваются; устройства могут быть открывающимися, но должны быть закрыты в море. Толщина стекла в бортах определяется соответственно для круглых и прямоугольных устройств по формулам, внешне идентичным LR [8]. Для остекления надстроек используется формула (1), как для судов длиной до 24 м. Установка штормовых крышек (съёмных или постоянно закрепленных) для всех иллюминаторов ниже палубы надводного борта и носовых и боковых окон нижнего яруса надстройки, кроме судов низших категорий или в случае использования многослойного либо ламинированного стекла.

РОССИЙСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Правила ГИМС [13] для маломерных судов уже на момент создания не отражали имевшийся уровень развития техники и являются анахронизмом.

Требования РМРС [14] для прогулочных судов содержат зонирование из ISO 12216, однако при этом и большое количество заимствований из КГМ [2], не согласующихся с реальностью современного малого судостроения. Например, в [14] иллюминаторы в наружной обшивке корпуса судна, установленные ниже палубы надводного борта, должны быть глухими круглой формы; предписываются штормовые крышки на иллюминаторах и остеклении главного уровня палубы, и др. Формула (2) толщин остекления заимствована из правил GL издания 2003 года (т.е. еще до введения ISO 12216) и не учитывает форму стекла. По мнению авторов, правила РМРС [14] для современных прогулочных судов подлежат переработке на основе ISO 12216.

Российские требования для яхт длиной более 24 м [15] введены сравнительно недавно и содержат ссылки на правила по оборудованию РМРС [16], которые предписывают типы остекления и устройств (включая их размещение), не привлекательные для владельцев современных яхт. Для остекления рубок у РМРС [16] имеется формула, предполагающая лишь один материал — стекло:

$$t = 0,32kb\sqrt{p},$$

где b — меньший из размеров в свету рубочного окна;

p — условная нагрузка;

k — коэффициент, определяемый в зависимости от соотношения сторон окна.

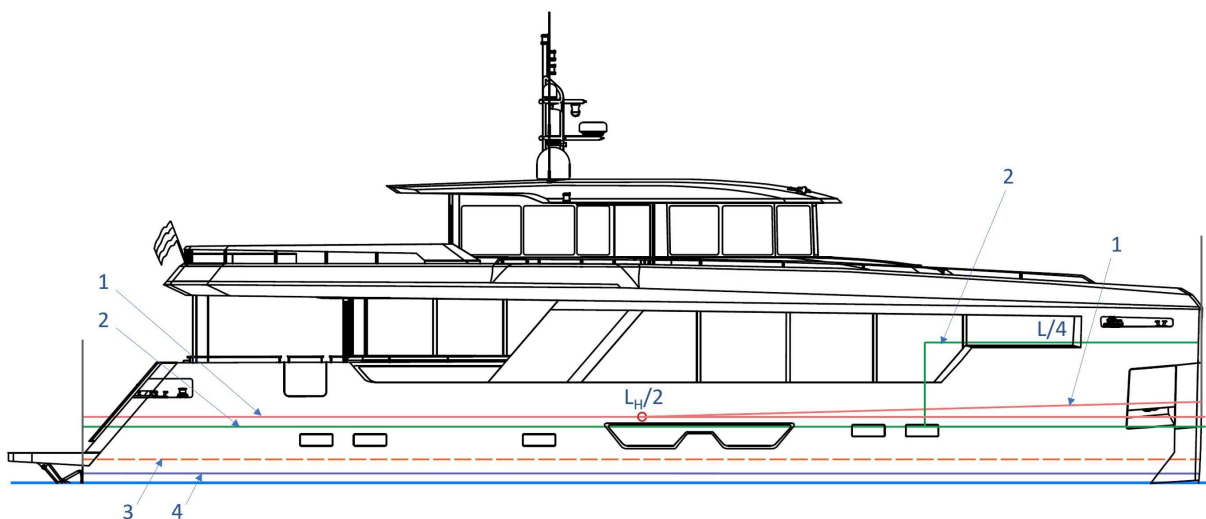


Рис. 6. Зонирование судна при размещении элементов остекления на яхте пр. К24 длиной 24 м по разным правилам:

1 — граница зоны I по ISO 12216 $L_H/17$ с подъемом 20 % в носу;

2 — граница зоны ограничения вырезов $0,85 \text{ м}^2$ по ISO 11336-1 $0,05L$;

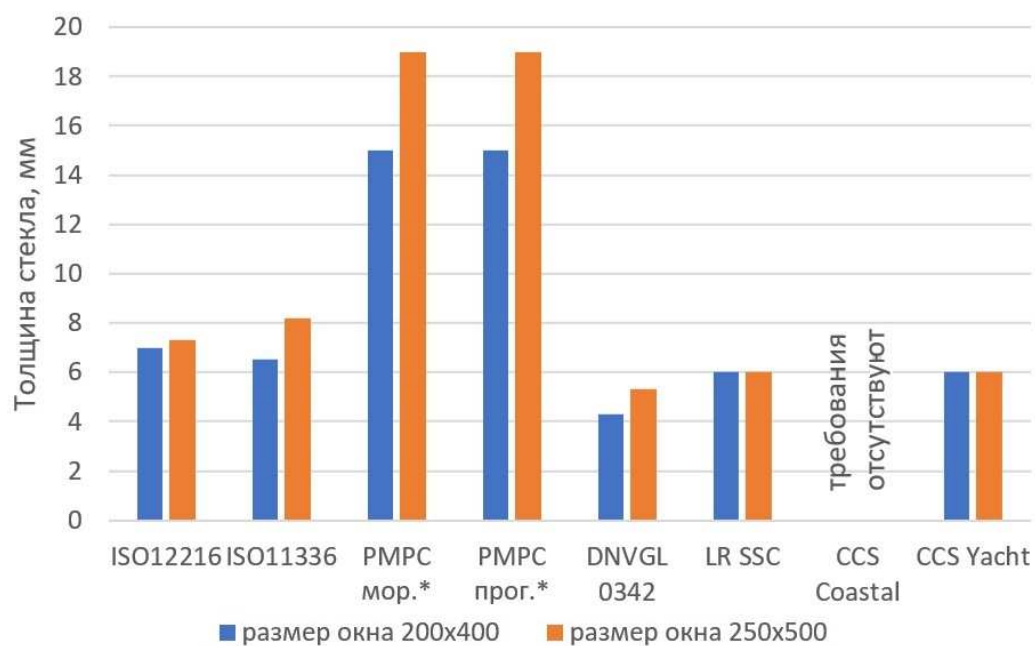
3 — зона 500 мм от КВЛ; 4 — зона 200 мм от КВЛ для открывающихся отверстий по ISO 12216

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕМЕНТОВ ОСТЕКЛЕНИЯ

В рамках настоящего исследования выполнены серийные расчеты толщин (рис. 7, 8) для бортовой панели и рубочной панели остекления яхты длиной 24 м (показана на рис. 3, 6); длина принята для универсальности применения правил. Для всех расчетов принята высшая категория, предусмотренная рассматриваемыми документами.

Результаты расчетов показывают, что для бортового остекления требования РМРС для судов рассматриваемого типа завышены по сравнению с другими широко применяемыми нормативами. Для остекления надстройки наиболее высокими являются требования ISO [5] и LR SSC [8], что, вероятно, связано со стремлением избежать использования штормовых крышек. Стандарт DNV0342 [10] дает самые низкие значения толщин, что можно объяснить его применением только для судов ограниченных категорий.

Сравнивая формулы для толщины остекления разных КО и преобразуя их к единому виду, можно получить зависимости вида $t = kbP^{0.5}$, где $k = 0,0035$ для CCS, $0,0039$ для PMPC, $0,0039$ для LR SSC и $0,0034$ для DNV0342.



* - по правилам PMPC принимались круглые иллюминаторы диаметром 350 и 400мм

Рис. 7. Толщина стекла окна (иллюминатора) в борту ниже палубы надводного борта

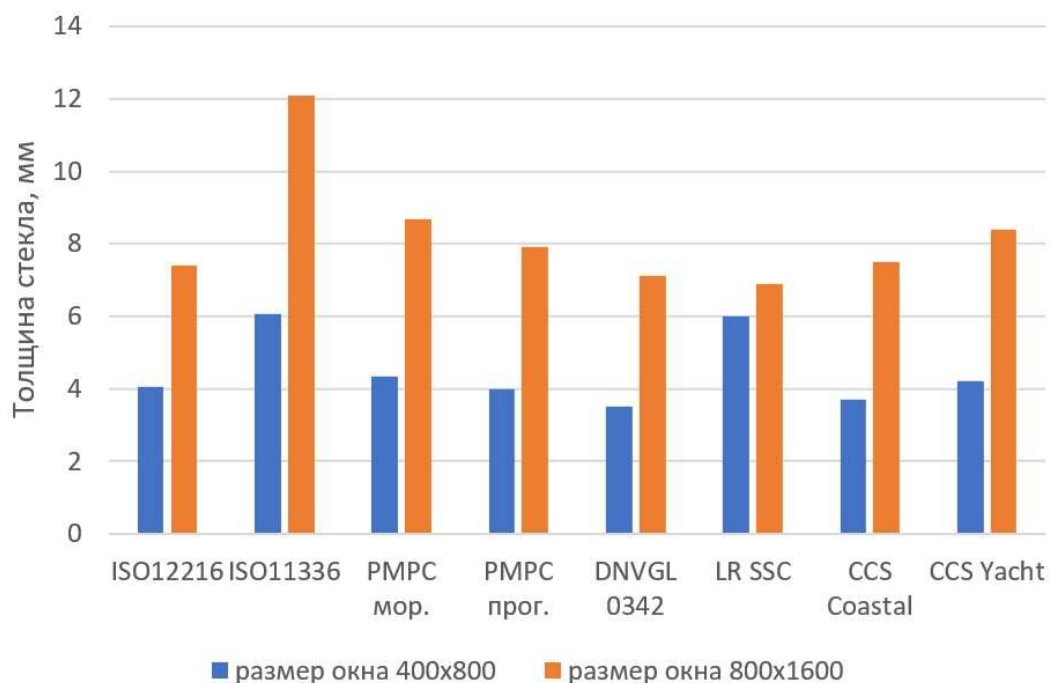


Рис. 8. Толщина стекла окна в боковой стенке рубки второго яруса

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПОДХОДЫ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НОРМАТИВОВ

При разработке отечественных требований к остеклению яхт и малых судов нельзя не учитывать необходимость повышения потребительских качеств судов [17]; в конце концов, именно для потребителя они и проектируются/строятся. По мнению авторов, при оценке остекления — окон, люков, дверей и т.д. — имеют место противоречия в идеологии КГМ [2] (которая закладывалась в 1930-х гг. и даже ранее, при соответствующем уровне развития техники — см. [18]) и современных ожиданиях потребителей, выраженных в нормативах ISO [4, 10] (табл. 2). Для судов прогулочного назначения комфортная среда и визуальная привлекательность напрямую определяют возможность реализации продукта (будь то продажа судов или туристических услуг) на отечественном и мировом рынке.

Таблица 2

Сравнение подходов КГМ [2] и ISO [4,10]

	Конвенция о грузовой марке [2]	Стандарты ISO [4,10]
Миссия	Обеспечить безопасность	Обеспечить безопасность Повысить потребительские свойства судна
Стратегия	Минимизировать или исключить точки заливания	Обеспечить равнопрочность и водонепроницаемость закрытий
Средства	Закрытия, комингсы, штормовые крышки и т.д., включая крышки люков из дерева и брезента	Современные технические решения в части закрытий, уплотнений, материалов, многослойное остекление и т.д.
Архитектура судна	Директивная – водонепроницаемая палуба и находящиеся на ней надстройки	Свободная – нет навязываемых компоновочных ограничений
Эксплуатация	Самообеспечение – невозможность избежать тяжелых условий	Эквивалентная безопасность – электронные средства судовождения, способность быстро достичь убежища, более легкие условия эксплуатации

Удобство судна, в частности удобство перемещения по палубе, освещение помещений, высоты комингсов и т.д., а также предотвращение связанного с этим травматизма имеют не менее важное значение, чем предотвращение риска заливания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В части остекления, в современном яхтостроении активно внедряются последние достижения автомобилестроения и архитектуры в области материалов и дизайнерских решений, что оправдано в том числе с учетом более легких условий эксплуатации современных судов из-за оснащенности электронным оборудованием и способности быстро достичь убежища. Тем не менее при глобальном характере рынка, в частности больших яхт, единообразия в требованиях КО нет. Очевидно, общие подходы следует искать в имплементации ISO 12216 и ISO 11336 [1, 11], в которых наблюдается последовательность требований и отсутствие характерных для КО «рудиментов» КГМ.

Для внедрения в нормативную практику РФ рекомендуются следующие подходы:

- для судов до 24 м прогулочного назначения — использование ISO 12216;
- для судов длиной до 24 м коммерческого назначения — использование австралийского опыта NSCV [1] со ссылками на ISO 12216 [4];
- для яхт длиной более 24 м — использование ISO 11336 [10] при одновременной адаптации указанного стандарта для ледовых условий и судов внутреннего и смешанного плавания;

• для всех рассматриваемых групп судов (малые суда, яхты длиной более 24 м) правила должны допускать применение альтернативных инновационных решений, как это сделано в большинстве зарубежных документов.

В течение предыдущих десятилетий малые суда и яхты с классом отечественных КО по понятным причинам практически не строились, что влияло на востребованность правил для них. Однако в настоящее время тематика проектирования и строительства малых судов и яхт является актуальной для РФ, что подтверждается постоянной работой РМРС по созданию и актуализации нормативов для этих типов судов. На основе озвученных выше подходов, авторами сформулированы и направлены в РМРС нормативные предложения к элементам остекления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NSCV (National Standard for Commercial Vessels). Australian Maritime Safety Authority, 2016.
2. Международная конвенция о грузовой марке. (КГМ-66/88) (с изменениями 2016 года).
3. Rules for Classification and Construction of Special Craft. — Yachts and Boats up to 24 m. German Lloyd, 2003/2012.
4. ISO 12216:2020 Small craft. Windows, portlights, hatches, deadlights and doors. Strength and watertightness requirements.
5. DNV-GL Standard 0342 – Craft, 2016.
6. CCS Rules for construction and classification of yachts, 2020.
7. CCS Rules for construction of coastal boats. Beijing, 2005.
8. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Lloyd's Register, 2022.
9. ABS Rules for Building and Classing. Yachts. 2023.
10. ISO 11336-1:2012 Large yachts — Strength, weathertightness and watertightness of glazed openings — Part 1: Design criteria, materials, framing and testing of independent openings.
11. DNV Rules for classification. Yachts, 2021.
12. BV Rules for the classification and the certification of yachts, NR500, 2022.
13. Правила классификации, постройки и обеспечения эксплуатационной безопасности морских судов, поднадзорных ГИМС РФ. — М., 2004.
14. Правила классификации и постройки морских прогулочных судов. НД № 2-020101-110 / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2018.
15. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XX. Дополнительные требования к яхтам. НД 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023.
16. Правила по оборудованию морских судов. НД № 2-020101-171 / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2023.
17. Draft Regulatory Impact Statement, National Standard for Commercial Vessels — Watertight and Weathertight Integrity, NMSC, August 2010.
18. Новиков А.И., Зиньковский-Горбатенко В.Г. Грузовая марка морских судов: уч. пос. / А.И. Новиков, В.Г. Зиньковский-Горбатенко. — Севастополь: Кручинин Л.Ю., 2015. — 160 с.

REFERENCES

1. NSCV (National Standard for Commercial Vessels). Australian Maritime Safety Authority, 2016.
2. Mezhdunarodnaya konvenciya o gruzovoj marke. (in Russian). [The international convention on load lines]. (KGM-66/88), (s izmeneniyami 2016 goda).
3. Rules for Classification and Construction of Special Craft. — Yachts and Boats up to 24m. German Lloyd, 2003/2012.
4. ISO 12216:2020 Small craft. Windows, portlights, hatches, deadlights and doors. Strength and watertightness requirements.
5. DNV-GL Standard 0342 – Craft, 2016.
6. CCS Rules for construction and classification of yachts, 2020.
7. CCS Rules for construction of coastal boats, Beijing, 2005.
8. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Lloyd's Register, 2022.
9. ABS Rules for Building and Classing. Yachts, 2023.
10. ISO 11336-1:2012 Large yachts — Strength, weathertightness and watertightness of glazed openings — Part 1: Design criteria, materials, framing and testing of independent openings.
11. DNV Rules for classification. Yachts, 2021.
12. BV Rules for the classification and the certification of yachts, NR500, 2022.
13. Pravila klassifikacii, postrojki i obespecheniya ekspluatacionnoj bezopasnosti morskikh sudov, podnadzornykh GIMS RF [Rules of classification, construction and operational safety of seagoing vessels under survey of GIMS RF]. Moscow, 2004.
14. Rules for the classification and construction of pleasure craft ND No. 2-020101-110-E / Russian Maritime Register of Shipping. — St. Petersburg, 2018.
15. Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part XX. Additional Requirements for Yachts. ND No. 2-020101-174-E / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023.
16. Rules for the equipment of sea-going ships. Part V. Navigational Equipment. ND No. 2-020101-171- E / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023.
17. Draft Regulatory Impact Statement, National Standard for Commercial Vessels — Watertight and Weathertight Integrity, NMSC, August 2010.
18. Novikov A.I., Zin'kovskij-Gorbatenko V.G. Gruzovaya marka morskikh sudov [Load line of seagoing vessels: textbook]. Sevastopol: Kruchinin L.Yu., 2015. 160 p. (In Russ.)



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 536.24
EDN TNIELF

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ СУДОВОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ю.Г. Володин, канд. техн. наук, доцент, Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева — Казанский филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 420108 Россия, Республика Татарстан, Казань, Портовая ул., 19, e-mail: yu.g.volodin@mail.ru

О.П. Марфина, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», 420043 Россия, Республика Татарстан, Казань, Зеленая ул., 1, e-mail: o_marfina@mail.ru

Ю.И. Матвеев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Н.В. Гречко, канд. техн. наук, Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева — Казанский филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 420108 Россия, Республика Татарстан, Казань, Портовая ул., 19, e-mail: nvg.vguyt@yandex.ru

В.В. Колыванов, канд. техн. наук, доцент, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 603003 Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, 15, офис 400, e-mail: kolyvanov.vv@rs-class.org

Статья посвящена изучению пускового режима газотурбинного двигателя, относящегося к переходным или нестационарным режимам, в которых за короткий промежуток времени увеличивается температура рабочего тела и, как следствие, в целом изменяется вся ситуация, связанная с теплообменом. В литературных источниках практически отсутствует информация об экспериментальных исследованиях высоко динамичных нестационарных аperiодических процессов. Эксперимент выполнен на разомкнутом газодинамическом контуре с электродуговым подогревом протекающего газового потока. В качестве физической модели использована тонкостенная цилиндрическая труба. При выполнении исследований измерялись: расход газового потока, полное давление в потоке, температура газа на входе в канал, температуры стенки по длине экспериментального канала, статические давления и касательные напряжения трения в функции времени и продольной координаты. Все средства измерения аттестованы либо по ним проведены предварительные исследования, определяющие их инерционность. Проведенные экспериментальные исследования при резком увеличении температуры рабочего тела показали, что одновременно формирующиеся эффекты тепловой и гидродинамической нестационарности, воздействуя на поток, ускоряют его. Ускорение потока, обусловленное более резким увеличением температуры рабочего тела с высокими значениями временных производных температуры и скорости потока, приводит к 2 — 3-кратному уменьшению коэффициентов теплоотдачи. Высоко динамичный процесс, при котором формируется температурный напор, определяющий границы возникающего явления ламинаризации турбулентного пограничного слоя, зафиксировано впервые при тепловом потоке, направленном от потока газа к стенке канала.

Ключевые слова: пусковой режим, газотурбинный двигатель, эксперимент, нестационарность, теплоотдача, ламинаризация.

Для цитирования: Володин Ю.Г. Особенности теплообменных процессов при пуске судового газотурбинного двигателя / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина, Ю.И. Матвеев, Н.В. Гречко и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 105 — 111. — EDN TNIELF.

FEATURES OF HEAT EXCHANGE PROCESSES WHEN STARTING A SHIP TURBINE ENGINE

Yu.G. Volodin, PhD, Associate Professor, Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev — Kazan Branch of the Volga State University of Water Transport, 420108 Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Portovaya ul., 19, e-mail: yu.g.volodin@mail.ru

O.P. Marfina, PhD, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, 420043 Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Zelenaya ul., 1, e-mail: o_marfina@mail.ru

Yu.I. Matveyev, DSc, Professor, Volga State University of Water Transport, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5, e-mail: kaf_easu@vsuwt.ru

N.V. Grechko, PhD, Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev — Kazan Branch of the Volga State University of Water Transport, 420108 Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Portovaya ul., 19, e-mail: nvg.vguvt@yandex.ru

V.V. Kolyvanov, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Svobody, 15, room 400, e-mail: kolyvanov.vv@rs-class.org

The article is devoted to the study of the starting mode of a gas turbine engine, which relates to transient or unsteady modes, in which the temperature of the working fluid increases in a short period of time and, as a result, the whole situation associated with heat transfer changes. There is practically no information in the literature about experimental studies of highly dynamic non-stationary aperiodic processes. The experiment was carried out on an open gas-dynamic circuit with electric arc heating of the flowing gas flow. A thin-walled cylindrical pipe was used as a physical model. During the research, the following were measured: gas flow rate, total pressure in the flow, gas temperature at the entrance to the channel, wall temperatures along the length of the experimental channel, static pressures and tangential friction stresses as a function of time and longitudinal coordinates. All measuring instruments have been certified or preliminary studies have been carried out on them to determine their inertia. Experimental studies carried out with a sharp increase in the temperature of the working fluid showed that the simultaneously formed effects of thermal and hydrodynamic unsteadiness, affecting the flow, accelerate it. The acceleration of the flow, caused by a sharper increase in the temperature of the working fluid with high values of the temporary derivatives of temperature and flow velocity, leads to a 2 — 3-fold decrease in heat transfer coefficients. A highly dynamic process in which a temperature pressure is formed, which determines the boundaries of the emerging phenomenon of laminarization of a turbulent boundary layer, was recorded for the first time with a heat flow directed from the gas flow to the channel wall.

Keywords: starting mode, gas turbine engine, experiment, nonstationarity, heat transfer, laminarization.

For citation: Volodin Yu.G., Marfina O.P., Matveyev Yu.I., Grechko N.V. et al. Features of heat exchange processes when starting a ship turbine engine. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 105 — 111. EDN TNIELF.

ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинный двигатель (ГТД) — это оригинальная идея и творение рук человеческих. Как у любого технического устройства, у него есть свои положительные и негативные аспекты. Поскольку ГТД является представителем теплового двигателя, то в нем, как и в поршневом двигателе, рабочее тело, то есть газ сжимается и нагревается, а механическая работа является результатом преобразования получаемой рабочим телом энергии. Но весь этот процесс в ГТД отличается от процесса в поршневом двигателе тем, что все происходит в движущемся потоке рабочего тела. Отсюда к позитиву относят многие моменты, характеризующие ГТД, и в их числе — значительные агрегатные мощности, формирующиеся в малогабаритных конструкциях при их небольшой массе, позволяющие получить заметную экономичность. Относительная простота конструкции существенно облегчает техническое обслуживание и позволяет реализовать выполнение агрегатного ремонта, а технологичность и возможность максимально автоматизировать рабочий процесс ГТД обеспечивают высокую надежность.

В ГТД, как и в других двигателях, составляющих основу энергосиловых установок, процесс эксплуатации складывается из этапов: пуск, обслуживание работающего двигателя, его останов, обслуживание неработающего двигателя, особенно в продолжительном нерабочем периоде и т.д. Из перечисленных этапов специалисты-эксплуатационники выделяют пусковой режим, называя его наиболее ответственным. Если обратиться к кривой отказов (рис. 1), то на ней видно, что первый временной интервал характеризуется максимальным числом отказов или возникновением признаков неработоспособности. Отказы разделяются на постепенные и внезапные. Последние формируются случайными причинами.

Основному рабочему режиму работы двигателя со стабильными и устойчивыми параметрами предшествует пусковой режим — очень динамичный, в котором формируются и очень интенсивно

развиваются тепломассообменные и газодинамические процессы. Перед пуском двигателя в камеру сгорания подается топливо, как правило, с постоянным расходом, которое воспламеняется. С воспламенением и далее горением топлива в камере сгорания увеличивается температура рабочего тела, сопровождающаяся изменением его теплофизических свойств — плотности и вязкости, при больших временных градиентах. Именно в этот короткий промежуток времени может происходить искажение полей скорости и температуры, в результате которого возникает локальный перегрев отдельного элемента или его части. Отсюда коробления, прогары, трещины и т.п.

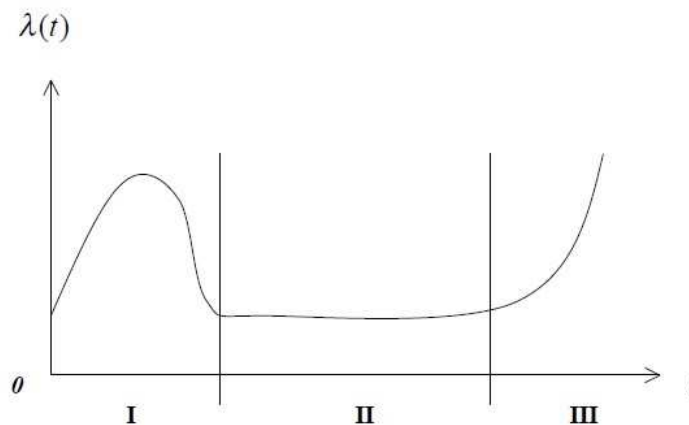


Рис. 1. Кривая интенсивности отказов [1]

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Экспериментальные стенды для выполнения теплофизических исследований выполняют в виде замкнутого или разомкнутого газодинамического контура. Ввиду того, что исследуемый процесс кратковременный, была выбрана схема разомкнутого газодинамического контура (рис. 2). Рабочим телом в изучаемом процессе послужил атмосферный воздух, который поступал в ресивер от поршневого компрессора. Воздух в сжатом состоянии, поступающий из ресивера, в плазмотрон 1, очищался фильтрами грубой 12 и тонкой очистки 13. Плазмотрон выполнен по одноконтурной схеме. Расход воздуха измерялся расходомером переменного перепада давления 8, а регулировался запорной арматурой 10 и 11. Плазмотрон использовался в качестве генератора, который за весьма короткий промежуток времени позволял достичь высоких значений температуры и получить необходимую динамику процесса ее нарастания. Через электроизоляционную шайбу к плазмотрону крепилась форкамера 2 с соплом, которая обеспечивает на выходе из сопла равномерные профили скорости и температуры. Для обеспечения возможности получить необходимый тепловой режим с соответствующими максимальной температурой и скоростью ее нарастания, часть воздуха подавалась в форкамеру минуя плазмотрон через двенадцать радиальных отверстий. В форкамере расположены выравнивающие [2] поток решетки 3. Экспериментальный канал 4 изготовлен диаметром 45 мм из нержавеющей стали. Он представляет собой секционную конструкцию длиной семь диаметров, то есть длина каждой секции также 45 мм, с толщиной стенки 0,08 мм. Такая секционная конструкция канала 4 стыкуется с выходным сечением сопла, в котором располагалась хромель-алюмелевая микротермопара [3, 4] диаметром 65 микронов, служащая для измерения температуры рабочего тела на входе в экспериментальный канал. Для измерения параметров потока были организованы измерительные сечения на серединах нечетных секций канала: 1-й, 3, 5 и 7-й. Здесь были смонтированы хромель-копелевые микротермопары диаметром 65 микронов для измерения температуры стенки секций канала. Измерение газодинамических параметров потока — касательных напряжений трения, статических давлений было выполнено в 3-й, 5 и 7-й секциях. Для этого в середине этих секций были смонтированы датчики трения «трубка — выступ» [5, 6] и отборные устройства для измерения статических давлений. Полное давление измеряют трубкой полного напора [7]. В эксперименте применялась трубка полного напора в форме «лебединой шеи». Перепады давлений на датчиках трения, статические давления, полное давление измерялись индуктивными датчиками давления ДМИ-0,1-2. Для питания датчиков давления и преобразования их выходного сигнала использовался прибор УГ-УМ. Сигналы, сформированные первичными

и гидродинамической нестационарности, то они противоположным образом влияют на коэффициент теплоотдачи, который вычисляли по выражению

$$S_t = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)} \quad (1)$$

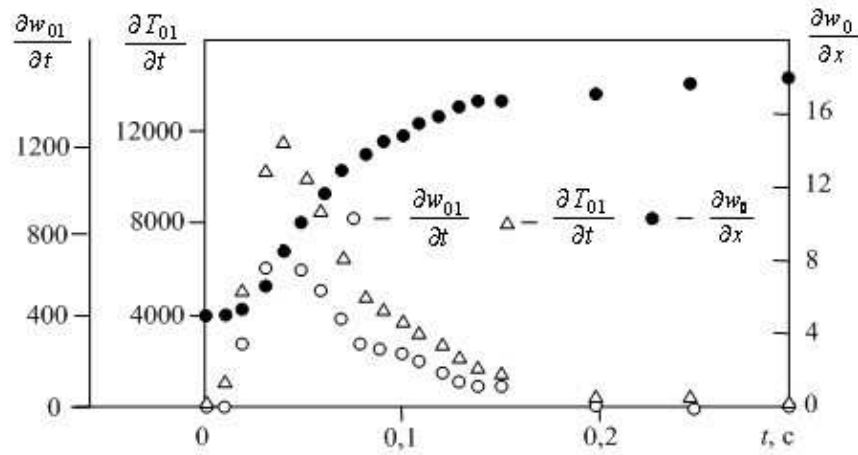


Рис. 3. Изменения во времени величин производных скорости и температуры потока

В описанных термогазодинамических условиях формируется и развивается тепловой пограничный слой с высокой динамикой изменения рассматриваемой ситуации. В эксперименте массовая скорость $\rho_0 w_0$ — постоянная величина. В выражении (1) плотность теплового потока рассчитывалась по формуле

$$q_w = C_{pw} \rho_w \Delta_w (\partial T_w / \partial t) + \Delta q_w \quad (2)$$

Плотность теплового потока представляет собой произведение из параметров, характеризующих материал стенки канала: удельная теплоемкость и плотность нержавеющей стали, толщина стенки секции канала и временная производная температуры стенки канала плюс потери тепла, вызванные свободной конвекцией и лучеиспускательной способностью нагревающейся поверхности стенки канала. Потери эти оценивались по методике, приведенной в [10]. Суммарно они составили менее 5 % от q_w . Анализ выражения (2) показывает, что изменение величины плотности теплового потока определяет производная температуры стенки канала по времени, изменение ее величины (кривая 2) и величины температуры стенки (кривая 1) показаны на рис. 4. На графике видно, что температура стенки канала нарастает с постоянной скоростью, то есть производная температуры стенки канала по времени имеет постоянную величину, следовательно, такую же постоянную величину принимает и плотность теплового потока. Если возвратимся к выражению коэффициента теплоотдачи S_t (1), то получается, что изменяющейся величиной в этом выражении является разность энтальпий.

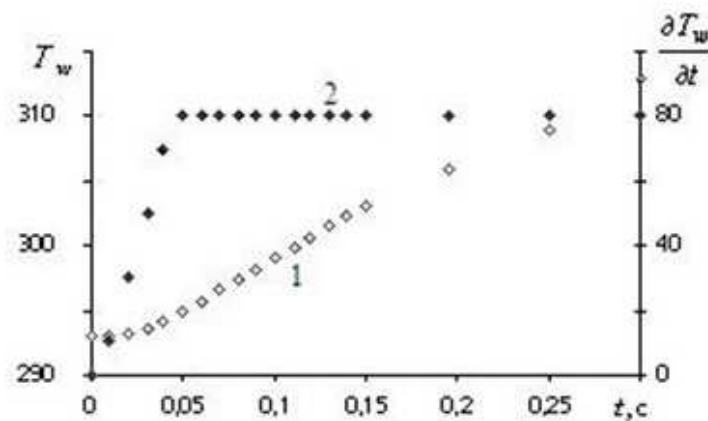


Рис. 4. Изменения во времени величин T_w , $(\partial T_w) / \partial t$

Анализ тепловой картины выполняется по графику зависимости коэффициента теплоотдачи S_t от числа Рейнольдса в логарифмических координатах, на котором видно, какие факторы оказывают влияние на коэффициент теплоотдачи S_t . В первые моменты времени коэффициент теплоотдачи S_t (рис. 5) достигает максимальной величины, и затем его значения уменьшаются вдоль лучей 3 во всех трех измерительных сечениях. Кроме экспериментальных точек и лучей 3 на графике построены еще две прямые: 1 — стандартная зависимость для турбулентных режимов течения и 2 — стандартная зависимость для ламинарных режимов течения. С уменьшением величины коэффициента теплоотдачи S_t и числа Рейнольдса Re_h^{**} экспериментальные точки пересекают прямую 1 и группируются около прямой 2. Этот факт позволяет констатировать ламинаризацию турбулентного пограничного слоя, так как среднерасходное число Рейнольдса в данном случае равно 18800 и определяет режим течения газового потока турбулентным. На основании полученных результатов были расширены временные рамки проводимого эксперимента. Время работы плазмотрона и, следовательно, прогрева газового потока и стенки канала увеличивалось до двух и затем до трех секунд. Результат оказался аналогичным тому, который показан на рис. 5, только с большим количеством точек. Была также проведена регистрация информации после отключения плазмотрона. По истечении некоторого времени наблюдалась обратная миграция экспериментальных точек от прямой 2 к прямой 1 вдоль параллельных лучей 3. Это навело на мысль проанализировать изменение величин температуры стенки канала и температуры в потенциальной области потока в функции времени.

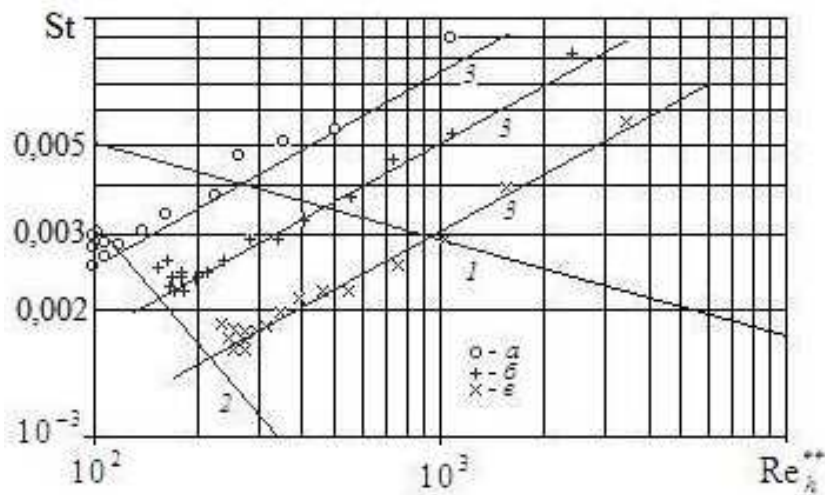


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента теплоотдачи S_t от числа Рейнольдса

$$\text{Линия «1»} — S_t = \frac{0,0128}{Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}}, \text{ линия «2»} — S_t = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}},$$

$$\text{линия «3»} — \text{аппроксимационная зависимость } S_t = S_{t0} \frac{1}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{Re_h^{**}} \frac{1}{\Delta h} \frac{d(\Delta h)}{dt}},$$

$$a — X=2,5, б — X=4,5, в — X=6,5$$

Оказалось, что при температурном напоре более 700 градусов происходит ламинаризация турбулентного пограничного слоя, а переходной зоной является интервал от 400 до 700 градусов. При тепловом потоке, имеющем направление от газового потока к стенке канала, данный факт зафиксирован впервые.

Что же произошло в динамическом пограничном слое? На фоне рассмотренной ситуации с развитием теплового пограничного слоя и влияния нестационарных эффектов скорость потока увеличивается с ускорением 700 м/с^2 , то есть сформировалась гидродинамическая нестационарность. Под ее влиянием коэффициент трения C_f увеличивается в 2,5 — 3 раза на временной отметке при максимальном значении производных величин по времени. После такой экстремальной отметки величина C_f монотонно и плавно снижается, и во временном интервале более 0,15 секунды с учетом влияния неизотермичности экспериментальные точки группируются около стандартной зависимости для турбулентных режимов течения газового потока, что свидетельствует об отсутствии каких-либо воздействий со стороны дестабилизирующих факторов. В рассмотренном интервале времени от 0 до 0,15 секунды влияние неизотермичности не превышало 5 %. Минимальное значение энтальпийного фактора достигало значения 0,25. Если обратить внимание на результаты работы [11], где энтальпийный фактор имел величину 4,4 и тепловой поток был

направлен от нагреваемой стенки канала в поток рабочего тела, то можно сделать вывод о том, что ламинаризация ТПС возможна при высоких степенях нагрева обтекаемой стенки канала или газового потока, то есть независимо от направления теплового потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные исследования показали, что пусковой режим — это высоко динамичный процесс, в котором проявляются эффекты тепловой и гидродинамической нестационарности, под воздействием которых в 2,5 — 3 раза увеличивается коэффициент трения. С формированием теплового пограничного слоя и максимального значения коэффициента теплоотдачи величина коэффициента трения снижается. Таким образом, эффект ламинаризации турбулентного приграничного слоя получен в пусковом режиме газотурбинного двигателя при резком увеличении температуры рабочего тела. Причиной ламинаризации в данной ситуации является температурный напор, который и определяет границы переходной зоны от 400 до 700 градусов и границу области ламинаризации турбулентного пограничного слоя ($\Delta T \geq 700$ K).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. — Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. — 1204 с.
2. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И.Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1974. — 479 с.
3. Володин Ю.Г. Исследование тепловой инерционности микротермопар / Ю.Г. Володин, И.Ф. Закиров, К.С. Федоров, М.В. Яковлев // Датчики и системы. — 2007. — № 6. — С. 33 — 35.
4. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н.А. Ярышев. — Л.: Энергия, 1990. — 256 с.
5. Володин Ю.Г. Измерение касательных напряжений трения в нестационарном газовом потоке / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина, А.Н. Богданов, М.С. Цветкович и др. // Датчики и системы. — 2009. — № 2. — С. 34 — 36.
6. Репик Е.У. Исследование нового метода опытного определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое / Е.У. Репик, Б.К. Кузенков // Инженерно-физический журнал. — 1980. — Т. 38, № 2. — С. 197 — 200.
7. Петунин А.Н. Измерение параметров газового потока / А.Н. Петунин. — М.: Машиностроение, 1974. — 260 с.
8. Володин Ю.Г. Об определении погрешностей в нестационарном теплофизическом эксперименте / Ю.Г. Володин. — Казань, 1986. — 7 с.
9. Володин Ю.Г. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина. — СПб.: Инфо-да, 2007. — 128 с.
10. Михеев М.А. Основы теплопередачи: учебник / М.А. Михеев. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 392 с.
11. Кун К.В. Переход от турбулентного режима к ламинарному для течения в трубе со значительным изменением физических свойств / К.В. Кун, Х.К. Перкинс // Теплопередача. Сер. С. — 1970. — Т. 92, № 3. — С. 198 — 204.

REFERENCES

1. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinnnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm: ОАО «Aviadvigatel», 2006. 1204 p.
2. Povkh I.L. Aerodinamicheskii eksperiment v mashinostroyeni [Aerodynamic experiment in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1974. 479 p.
3. Volodin Yu.G., Zakirov I.F., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Investigation of microthermocouples' thermal inertia. Sensors and systems. 2007. No. 6. P. 33 — 35. (In Russ.)
4. Yaryshev N.A. Theoretical basis for measuring non-stationary temperatures. Leningrad: Energiya, 1990. 256 p.
5. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Bogdanov A.N., Tsvetkovich M.S et al. Measuring tangential friction stress in nonstationary gas flow. *Sensors and systems*. 2009. № 2. P. 34 — 36. (In Russ.)
6. Repik Ye.U., Kuzenkov B.K. Issledovanie novogo metoda opytnogo opredeleniya poverkhnostnogo tre-niya v turbulentnom pogranichnom sloe [Study of a new method for experimental determination of surface friction in a turbulent boundary layer]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal [Journal of Engineering Physics]*. 1980. Vol. 38, No. 2. P. 197 — 200.
7. Petunin A.N. Izmerenie parametrov gazovogo potoka [Measuring gas flow parameters]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1974. 260 p.
8. Volodin Yu.G. Ob opredelenii pogreshnostei v nestatsionarnom teplofizicheskom eksperimente [On determining errors in a non-stationary thermophysical experiment]. Kazan, 1986. 7 p.
9. Volodin Yu.G., Marfina O.P. Matematicheskoe modelirovanie puskovykh rezhimov energeticheskikh ustanovok [Mathematical modeling of starting modes of power plants]. St. Petersburg: Info-da, 2007. 128 p.
10. Mikheyev M.A. Osnovy teploperedachi: uchebnik [Heat Transfer Fundamentals: textbook]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1956. 392 p.
11. Kun K.V., Perkins Kh.K. Perekhod ot turbulentnogo rezhima k laminarnomu dlya techeniya v trube so znachitel'nym izmeneniyem fizicheskikh svoystv [Transition from turbulent to laminar regime for flow in a pipe with a significant change in physical properties]. *Teploperedacha. Ser. C*. 1970. Vol. 92, No. 3. P. 198 — 204.

УДК 629.12
EDN UACEOK

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРОМОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СУДОВЫХ МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

М.Н. Покусаев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025 Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: evt@astu.org

В.Г. Букин, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025 Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: bukinvg@mail.ru

П.А. Дорохов, канд. техн. наук, Астраханский филиал ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 414040 Россия, Астрахань, Коммунистическая ул. / ул. Хлебникова, 30/8, e-mail: dorohov.pa@rs-class.org

М.М. Горбачев, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», 414025 Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

А.В. Дьяченко, ст. эксперт, Нижне-Волжский филиал ФАУ «Российское классификационное общество», 414000 Россия, Астрахань, Адмиралтейская ул., 1, e-mail: sadwyn1997@gmail.com

Вибрация и колебания, возникающие при работе судовой энергетической установки, остаются опасными явлениями, приводящими к возникновению усталостных трещин и разрушениям элементов машинно-двигательных комплексов, опорных конструкций и другим последствиям. Особенно опасным является резонанс колебаний различных видов, в результате чего воздействие вибрации на судовые конструкции и оборудование возрастает в несколько раз. Крутильные колебания в судовых машинно-двигательных комплексах вызывают дополнительную вибрационную нагрузку, но при практических исследованиях их измеряют отдельно от других видов колебаний, при этом необходима установка измерительной аппаратуры непосредственно на вращающемся валу, что связано с определенными сложностями. В статье приводятся результаты исследований, которые подтверждают возможность оценки крутильных колебаний посредством измерения вибрации носовой части корпуса дизеля. Определено, что связь между крутильными колебаниями и вибрацией проявляется наиболее сильно при классической схеме передачи мощности от среднеоборотного двигателя на гребной винт фиксированного шага. В результате проведения практических исследований на судах проектов 1557 и 81200 были установлены резонансные частоты крутильных колебаний посредством измерения вибрации, что было подтверждено прямыми измерениями крутильных колебаний. Проведенные исследования свидетельствуют о перспективности применения вибромониторинга для оценки параметров крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов в периоды между регламентным проведением торсиографирования или тензометрирования.

Ключевые слова: *судовой машинно-двигательный комплекс, безопасность мореплавания, надежность судового валопровода, мониторинг вибрации, крутильные колебания, резонанс колебаний.*

Для цитирования: Покусаев М.Н. Перспективность применения вибромониторинга для оценки развития крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах / М.Н. Покусаев, В.Г. Букин, П.А. Дорохов, М.М. Горбачев, А.В. Дьяченко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 112 — 125. — EDN UACEOK.

PROSPECTS OF USING VIBRATION MONITORING TO ASSESS THE DEVELOPMENT OF TORSIONAL VIBRATIONS IN MARINE PROPULSION SYSTEMS

M.N. Pokusaev, DSc, Professor, Astrakhan State Technical University, 414025 Russia, Astrakhan, ul. Tatishcheva, 16, e-mail: evt@astu.org

V.G. Bukin, DSc, Professor, Astrakhan State Technical University, 414025 Russia, Astrakhan, ul. Tatishcheva, 16, e-mail: bukinvg@mail.ru

P.A. Dorokhov, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, Astrakhan branch, 414040 Russia, Astrakhan, Kommunisticheskaya ul. / ul. Khlebnikova, 30/8, e-mail: dorohov.pa@rs-class.org

M.M. Gorbachev, PhD, Associate Professor, Astrakhan State Technical University, 414025 Russia, Astrakhan, ul. Tatishcheva, 16, e-mail: max9999_9@mail.ru

A.V. Dyachenko, Senior Expert, FAI Russian Classification Society, Nizhne-Volzhsky branch, 414000 Russia, Astrakhan, Admiralteiskaya ul., 1, e-mail: sadwyn1997@gmail.com

Vibration and vibrations occurring during the operation of a ship's power plant remain dangerous phenomena that lead to the occurrence of fatigue cracks and destruction of elements of machine-propulsion systems, supporting structures and other consequences. The resonance of vibrations of various types is especially dangerous, as a result of which the impact of vibration on ship structures and equipment increases several times.

Torsional vibrations in marine propulsion systems cause additional vibration load, but in practical studies they are measured separately from other types of vibrations, while it is necessary to install measuring equipment directly on a rotating shaft, which is associated with certain difficulties. The article presents the results of studies that confirm the possibility of evaluating torsional vibrations by measuring the vibration of the bow of the diesel hull. It is determined that the relationship between torsional vibrations and vibration is manifested most strongly in the classical scheme of power transmission from a medium-speed engine to a fixed-pitch propeller. As a result of practical research on ships of projects 1557 and 81200, resonant torsional vibration frequencies were established by measuring vibration, which was confirmed by direct measurements of torsional vibrations. The studies conducted indicate the prospects of using vibration monitoring to assess the parameters of torsional vibrations of marine propulsion systems in the periods between routine torsiography or strain measurement.

Keywords: *marine machinery-propulsion system, navigation safety, reliability of the ship's shaft line, vibration monitoring, torsional vibrations, vibration resonance.*

For citation: Pokusaev M.N., Bukin V.G., Dorokhov P.A., Gorbachev M.M., Dyachenko A.V. Prospects of using vibration monitoring to assess the development of torsional vibrations in marine propulsion systems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 112 — 125. EDN UACEOK.

ВВЕДЕНИЕ

При работе судового машинно-двигательного комплекса на него воздействует совокупность вибраций различного вида: осевые, поперечные, продольные, крутильные. Их воздействие в сочетании со сложными условиями эксплуатации судов приводит к возникновению усталостных разрушений элементов валопроводов — коленчатых, промежуточных, гребных валов, к повреждению редукторных передач и упругих муфт. Усталостные разрушения элементов валопроводов происходят и в настоящее время [1 — 4], несмотря на все усилия со стороны специалистов и ученых, что доказывает актуальность проблемы и необходимость ее решения.

В настоящее время для определения опасности крутильных колебаний производится их измерение по регламенту — при сдаточных испытаниях судов, после модернизации их машинно-двигательных комплексов и периодически для оценки работоспособности демпферов крутильных колебаний главных двигателей. Измерения производятся в соответствии с требованиями нормативных и руководящих документов классификационных обществ — Российского морского регистра судоходства (РС) [5] и Российского классификационного общества (РКО) [6]. Периоды между регламентными измерениями крутильных колебаний составляют порядка 15 000 часов, и в это время не гарантируется внезапный отказ демпферов, что приведет к опасному росту крутильных колебаний. Существуют рекомендации в период эксплуатации оценивать уровень крутильных колебаний чисто субъективными методами (усиление шума, появление стуков, повышение вибрации дизеля), которые, на наш взгляд, могут быть игнорированы или неправильно определены механиками, кроме того, на судах отсутствует аппаратура для измерения и анализа вибрации и колебаний.

В теории принято разделять и производить расчет каждого вида колебаний отдельно для упрощения решения задачи. Можно выделить работы таких ученых, как И.А. Лурье [7], В.П. Терских [8], П.А. Истомин [9] и других выдающихся специалистов, которые принимали данное допущение, и это было оправдано имеющимися на тот момент ограниченными мощностями средств вычислений. В условиях внедрения ЭВМ стали возможны расчеты связанных колебаний, и среди исследований можно выделить работы В.К. Румба [10, 11], посвященные методу главных координат. В настоящее время классификационные общества России — РС и РКО — не требуют проводить совместный расчет осевых и крутильных колебаний, но международное классификационное общество DNV GL уже требует подобный анализ при проектировании судов [12]. Таким образом, наблюдается тенденция по учету связанных колебаний в судовых валопроводах, в первую очередь — осевых и крутильных. В связи с этим возникает вопрос о проведении комплексных измерений осевых и крутильных колебаний, что может быть обеспечено при помощи датчиков акселерометров или лазерной измерительной виброаппаратуры. Одними из примеров подобных измерительных комплексов является продукция компании Zetlab (Россия) [13], фирмы Brüel & Kjær (Дания) [14] или разработка специалистов ФГБОУ ВО «АГТУ» на базе МЭМС-акселерометров [15].

Применение акселерометров в настоящее время не рассматривается правилами классификационных обществ для измерения крутильных колебаний и оценки технического состояния демпферов; внедрение подобных методов на уровне нормативно-технической документации требует подготовки большой научной базы. Тем не менее связь крутильных колебаний и вибрации в установках различного назначения подтверждается и теоретически, и практически. Можно выделить работы [16, 17], которые проведены в этом направлении и предположить, что вибромониторинг имеет перспективу для практического внедрения на флоте для проведения безразборной технической диагностики демпферов крутильных колебаний.

Поскольку расчетные методы по оценке крутильных колебаний в нерезонансных зонах в настоящее время все еще ограничены сложностью решения системы дифференциальных уравнений для многомассовых систем, то обычно ограничиваются расчетами резонансных амплитуд и возникающих от них напряжений в элементах машинно-двигательного комплекса. В качестве режима работы дизеля, который может привести к росту амплитуд крутильных колебаний рассматривается эксплуатация с одним отключенным цилиндром. Данные расчеты согласно требованиям Правил РС [5] и РКО [6] должны обязательно оцениваться экспериментально при помощи торсиографирования, также допускается проведение тензометрирования. Подобные методики приводятся в нормативной документации и для осевых колебаний.

С учетом вышесказанного была выработана цель исследования — измерение вибрации и крутильных колебаний одновременно. Измерение вибрации производится в режиме постоянного мониторинга с носового конца дизеля (где установлен демпфер крутильных колебаний) и тензометрирования на валопроводе. Подобное независимое измерение двух параметров позволяет определить их взаимосвязь и получить ряд диагностических признаков для возможного применения метода на практике.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Согласно принятой гипотезе авторов о возможности оценки крутильных колебаний посредством измерения вибрации и их связи было выдвинуто несколько предположений и требований к измерительному процессу:

- взаимосвязь крутильных и осевых колебаний будет иметь более четкий и прогнозируемый характер для машинно-двигательных комплексов с простой (классической) схемой передачи мощности: среднеоборотный двигатель — система валов — гребной винт фиксированного шага;
- при наличии муфт, редукторов и других элементов в составе машинно-двигательного комплекса, формирующих промежуточные гармоники крутильных колебаний, взаимосвязь будет иметь более сложный характер и потребует тщательной процедуры анализа результатов;
- измерение вибрации необходимо производить на корпусе дизеля в носовой части вблизи места размещения демпфера крутильных колебаний, что позволит при накоплении базы измерений при разной нагрузке получить диагностические признаки по его техническому состоянию;
- размещение тензометрических резисторов следует производить на валах с наибольшим эластическим моментом, определенным по результатам расчета свободных колебаний или в местах с прямым доступом к валу для размещения оборудования;
- анализ вибрации следует производить в трех направлениях — осевом, поперечном и вертикальном;
- оба измерительных процесса должны иметь единую систему отсчета времени и частоты вращения коленчатого вала дизеля;
- перед измерениями должен быть проведен расчет свободных крутильных колебаний для определения резонансных частот и масштабов напряжений для всех элементов валопровода.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ИХ ВЫБОРА

В качестве объектов для практических исследований было выбрано два судна: сухогруз проекта 1557 с классом РС и буксир-толкач проекта 81200 (после модернизации главной энергетической установки), состоящий на классификационном учете РКО.

Выбор судов был обусловлен следующими соображениями.

1. Сухогрузы (генгрузы) проекта 1557 (тип «Сормовский») выпускались в период с 1967 по 1986 г. на судостроительном заводе «Красное Сормово» (СССР, г. Горький (Н. Новгород)) и судостроительном заводе имени Володарского (СССР, г. Рыбинск) в общем количестве 122 шт., при этом часть из них (порядка 40 шт.) до сих пор находятся в эксплуатации во флоте России и других государств, по данным [18]. Опыт эксплуатации данных судов огромный, что позволяет учесть его при анализе результатов измерений. Суда проекта 1557 имеют классическую схему машинно-двигательного комплекса с прямой передачей мощности: главный двигатель 6NVD48A-2U (6ЧНР32/48), система валов и гребной винт фиксированного шага. Отсутствие упругих муфт и редуктора позволяет говорить о наличии двух опасных форм крутильных колебаний: первого и второго порядка с доминированием опасных гармоник колебаний, кратных числу

цилиндров, среди которых наиболее виброактивной будет гармоника 6-го порядка. Силиконовые демпферы главных двигателей исследуемого судна имеют наработку на июль 2024 г. 88 656 часов, то есть длительно находились в эксплуатации, соответственно, можно прогнозировать рост крутильных колебаний из-за снижения эффективности демпферов. Остаточный ресурс демпферов по результатам безразборной диагностики технического состояния составляет 6600 часов.

2. Буксиры-толкачи проекта 81200 выпускались в период с 1985 по 1991 г. на Звениговском ССЗ (СССР, г. Звенигово) в общем количестве серии 9 шт., из них в эксплуатации находятся 8 судов, по данным [19]. Исследуемое судно в 2023 — 2024 гг. подверглось полной модернизации машинно-двигательного комплекса с установкой (на каждую из двух валовой линий) дизеля 8190ZLCA2-2 (8ЧН19/21) производства Китая, высокоэластичной муфты, реверс-редуктора, системы валов и гребного винта фиксированного шага. Применение упругой муфты и редуктора привело к снижению амплитуд крутильных колебаний, увеличению количества их форм и к появлению гармоник промежуточных порядков, помимо главных. В тоже время прогнозируется появление опасной главной гармоники 8-го порядка как наиболее виброактивной. Демпферы крутильных колебаний главных двигателей исследуемого судна имеют наработку 5 часов, то есть амплитуды крутильных колебаний ожидаются минимальной величины. Остаточный ресурс демпферов составляет около 20 000 часов работы.

3. Наличие двух судов с прямой и реверс-редукторной передачей позволит провести сравнительный анализ развития крутильных колебаний и вибрации, их взаимосвязь и степень проявления резонансов при вибромониторинге. Это позволит дать рекомендации о практическом применении вибромониторинга для диагностирования развития крутильных колебаний.

4. Разное техническое состояние демпферов главных двигателей обоих судов дает возможность оценить степень влияния уровня крутильных колебаний на вибрации в зависимости от наработки.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Оценка крутильных колебаний производилась специалистами испытательного центра «MTS» ФГБОУ ВО «АГТУ» (имеющего признание РС и РКО в области виброакустических измерений) при помощи сертифицированного поверенного программно-аппаратного комплекса Astech Electronics (Великобритания), который производит прямые измерения напряжений, возникающих в валах при помощи тензометрических резисторов, закрепленных на валопроводе (см. рис. 1).

Измерение вибрации в режиме онлайн осуществлялось экспериментальным образцом системы мониторинга (рис. 2), разработанной в рамках диссертационной работы М.М. Горбачева «Система мониторинга крутильных колебаний для повышения безопасности эксплуатации судового машинно-двигательного комплекса» [20]. Датчик вибрации изготовлен на базе трехосевого акселерометра MMA7361, настроенного на диапазон измерения виброускорения в пределах $\pm 1,5g$, рассчитан на эксплуатацию в диапазоне температур от -40 до $+125$ °C, опорная частота измеряемой вибрации — 1000 Гц. Измерительный блок имеет микроконтроллер с тактовой частотой 16 МГц, позволяет отображать данные на дисплее с диагональю 10,16 см и осуществлять запись данных на карту памяти.

Метрологические характеристики экспериментального образца системы мониторинга подтверждены испытаниями, проведенными на оборудовании ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Астраханской области и Республике Калмыкия» и сравнительными испытаниями в лабораторных условиях с поверенным виброметром первого класса «Экофизика-110А» [20].

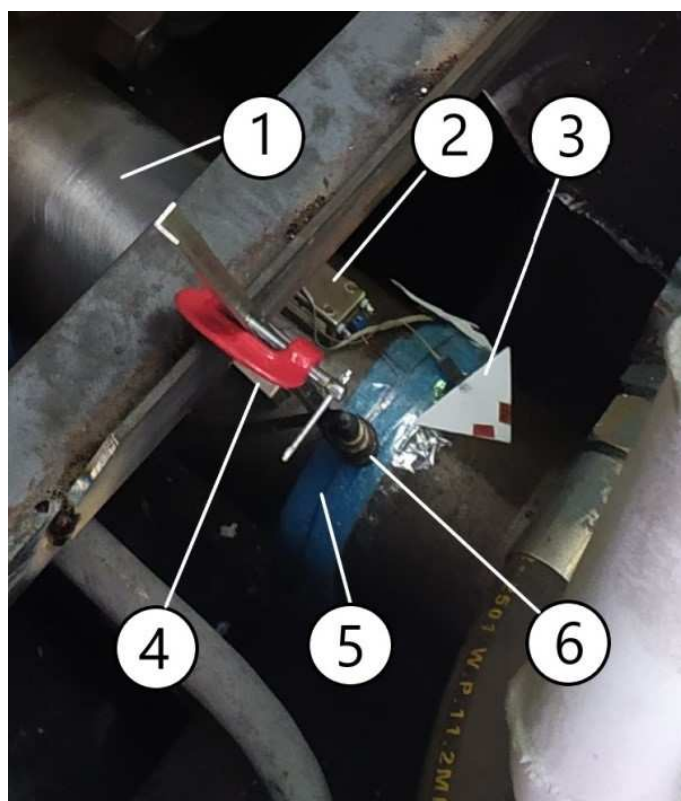


Рис. 1. Установка комплекса Astech Electronics на валопроводе судна проекта 81200:

1 — промежуточный вал; 2 — трансмиттер; 3 — тензометрические резисторы (полумост) на изолирующей подложке;
4 — батарея; 5 — антенна для беспроводной передачи данных; 6 — индуктивная головка для приема сигнала

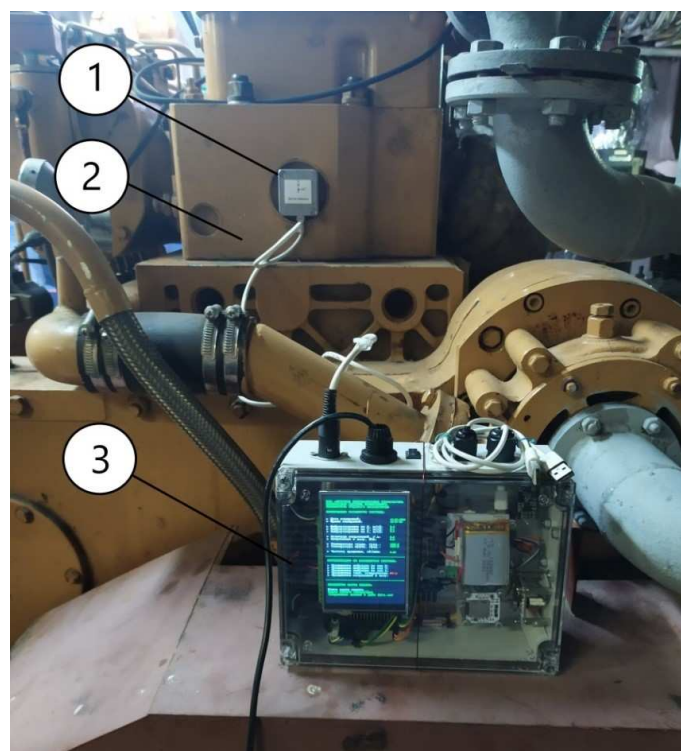


Рис. 2. Установка элементов системы вибромониторинга на главном двигателе судна проекта 81200:

1 — датчик вибрации; 2 — носовая часть дизеля; 3 — измерительный блок экспериментального образца системы мониторинга

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

На обоих судах измерение крутильных колебаний производилось в июле 2024 г. специалистами ИЦ «MTS» ФГБОУ ВО «АГТУ» в соответствии с требованиями программ измерений виброакустических параметров, согласованных РС и РКО.

Контроль параметров производился с момента пуска главного двигателя с постепенным ростом частоты вращения коленчатого вала до номинальной и дальнейшим снижением ее до окончательной остановки.

Полученные тензограммы машинно-двигательного комплекса одного борта (для другого борта характерны идентичные тензограммы) судов проекта 1557 и проекта 81200 представлены на рис. 3 и 4.

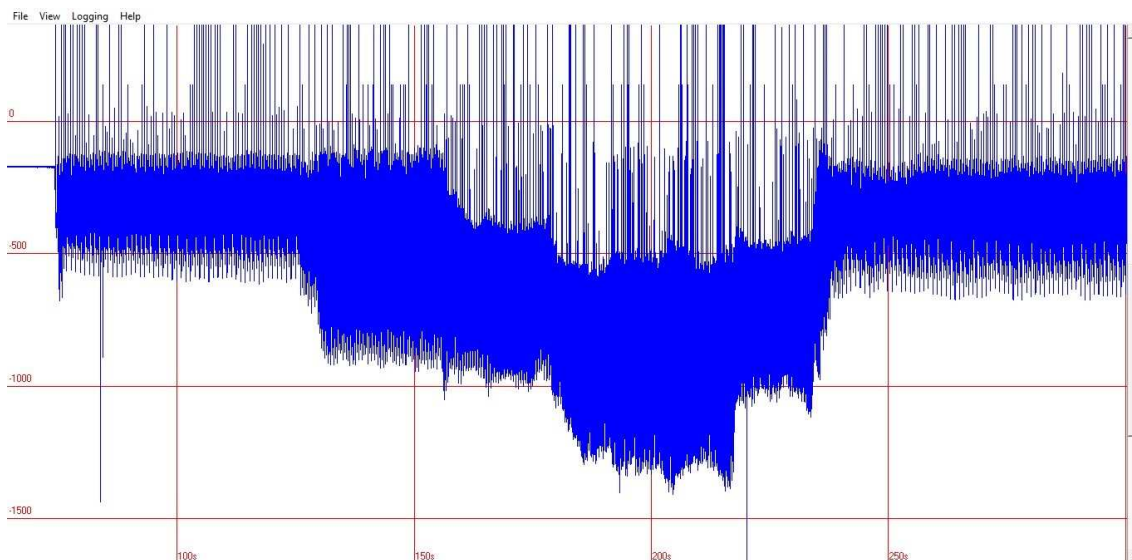


Рис. 3. Тензограмма машинно-двигательного комплекса судна проекта 1557
(отдельные помехи вызваны влиянием работы дизель-генератора)

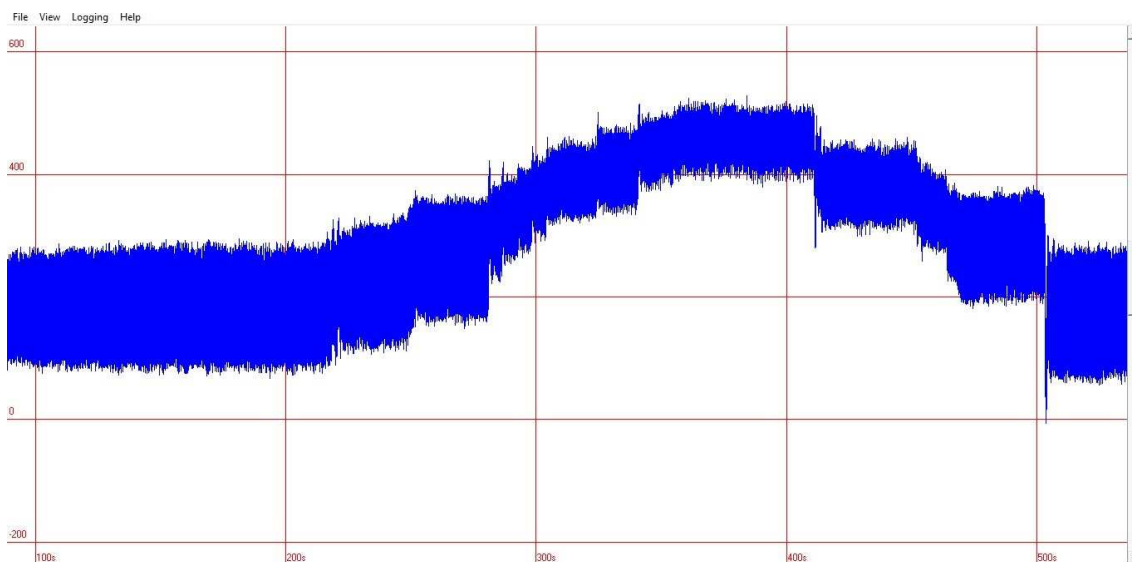


Рис. 4. Тензограмма машинно-двигательного комплекса судна проекта 81200

Как видно из рис. 3, на тензограмме для машинно-двигательного комплекса судна проекта 1557 можно выделить рост амплитуд крутильных колебаний на отдельных режимах работы. На рис. 4 в тензограмме резкого роста амплитуд крутильных колебаний не наблюдается, что связано с установленной упругой муфтой до тензометрируемого вала. Также были получены виброграммы носовой части главных двигателей судов проекта 1557 и 81200.

4.1. Анализ результатов измерений параметров вибрации и крутильных колебаний установки судна проекта 1557.

Рассмотрим в первую очередь виброграмму для главного двигателя судна проекта 1557, представленную на рис. 5а — в.

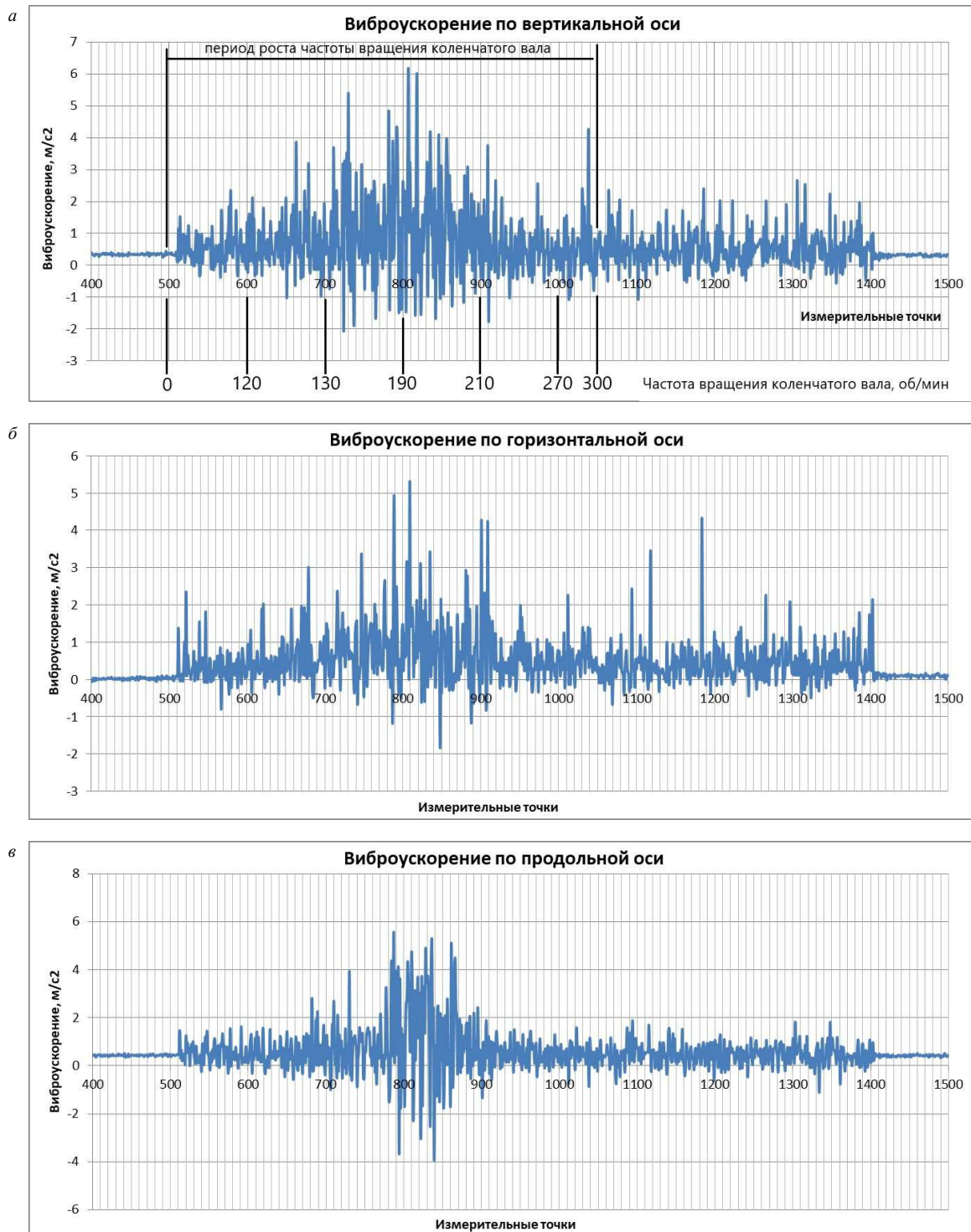


Рис. 5. Виброграмма главного двигателя 6NVD48A-2U (6ЧНР32/48) судна проекта 1557:

а — график развития вибрации по вертикальной оси; б — график развития вибрации по горизонтальной оси;
в — график развития вибрации по продольной оси

Как видно, наибольшая вибрация наблюдается на частотах вращения 190 — 200 об/мин, при этом резонансными частотами для развития амплитуд крутильных колебаний согласно расчету являются: 130 об/мин (9-й порядок валопроводной одноузловой формы); 195 об/мин (6-й порядок валопроводной одноузловой формы); 265 об/мин (12-й порядок моторной двухузловой формы). Резонанс главного порядка (6-й) четко выделяется на виброграмме, особенно в направлении продольной оси, и не столь выраженный рост отмечен на частотах вращения 130 об/мин и 265 об/мин.

На рис. 6 представлен собственный шум системы вибромониторинга с датчиком, измеренный в состоянии покоя, который максимально составил по амплитуде виброускорения $0,14 \text{ м/с}^2$.



Рис. 6. Собственный шум системы вибромониторинга с датчиком, измеренный в состоянии покоя

На рис. 7 приведен график развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 1557 по результатам тензометрирования.



Рис. 7. График развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 1557

Как видно из рис. 7, на частотах вращения 200 — 205 об/мин зафиксирован резонансный рост напряжений до 12 МПа, что дает основание говорить о сходимости результатов тензометрирования и вибромониторинга в области идентификации резонансных частот крутильных колебаний. Резонансы других порядков на частотах 130 об/мин и 265 об/мин для промежуточного вала на графике касательных напряжений не выражены, но могут проявляться в других элементах валопровода.

Отметим, что мы не проводим в данном исследовании анализ абсолютных величин виброускорения, поскольку при мониторинге важен именно тренд изменения контролируемых параметров, что поясняется в работах В.Н. Костюкова [21, 22]. Дополнительно необходимо указать, что амплитуды виброускорения при резонансе больше амплитуд на холостом ходу: в вертикальном направлении в 4 раза, в поперечном направлении в 6,3 раза, в продольном направлении в 3,4 раза.

Для наиболее точной оценки резонансной частоты рекомендуется применение вейвлет-анализа с базовой материнской функцией Морле, которая часто используется для анализа быстроизменяющихся во времени гармонических функций, в том числе и вибраций [23, 24]. Вейвлет-анализ был произведен для участка виброграммы при ее измерении в продольном направлении для частоты вращения от 180 до 220 об/мин (рис. 8).

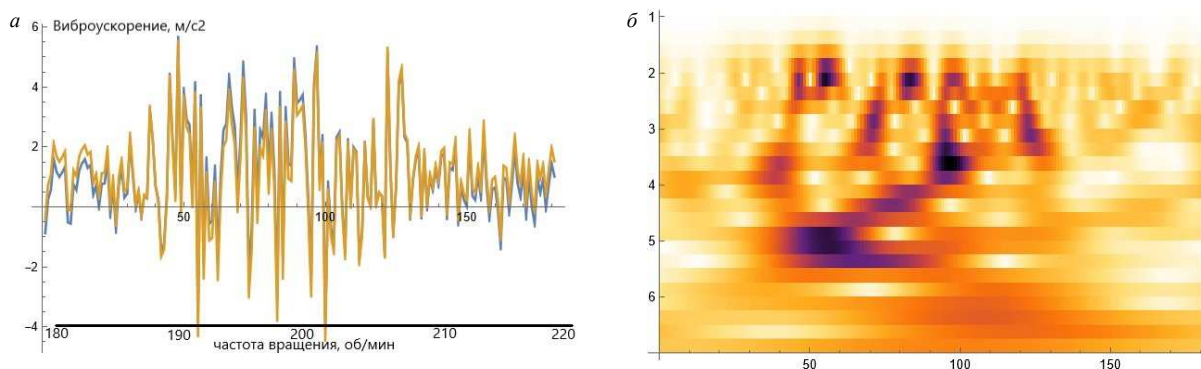


Рис. 8. Вейвлет-анализ виброграммы при изменении частоты вращения (от 180 до 220 об/мин)

коленчатого вала главного двигателя 6NVD48A-2U судна проекта 1557:

a — исходная функция и ее восстановление при помощи вейвлета Морле;

б — скаллограмма вейвлет-анализа функции изменения вибрации

Как видно из результатов вейвлет-анализа, наибольший отклик функции вибрации (характеризуемый темным цветом) наблюдается на частоте 190 — 200 об/мин, и это позволяет определить пиковое значение виброускорения $5,57 \text{ м/с}^2$ и среднеквадратичное $19,79 \text{ м/с}^2$, которое в наибольшей степени характеризуют энергию вибрации [25].

4.2. Анализ результатов измерений параметров вибрации и крутильных колебаний установки судна проекта 81200.

По приведенной ранее методике был произведен анализ виброграммы, полученной при испытаниях судна проекта 81200 и представленной на рис. 9.

Как видно, наибольшая вибрация наблюдается на частотах вращения 630 — 650 об/мин, при этом резонансными частотами для развития амплитуд крутильных колебаний, согласно расчету, являются 631 об/мин (8-й порядок моторной трехузловой формы); 745 об/мин (2,5-й порядок валопроводной двухузловой формы); 757 об/мин (12-й порядок валопроводной четырехузловой формы). Отметим, что резонанс главного порядка (8-й) четко выделяется на виброграмме только в направлении продольной оси, не столь выраженный рост также отмечен на частотах вращения 745 об/мин и 757 об/мин. На рис. 9 очень хорошо заметно, что вибрации по поперечной оси не дают возможности четко идентифицировать резонансы, в отличие от графика вибрации по продольной оси. Дополнительно необходимо указать, что вибрация при резонансе больше вибрации на холостом ходу в вертикальном направлении в 4 раза, в поперечном направлении в 2,4 раза, в продольном направлении в 4,3 раза.

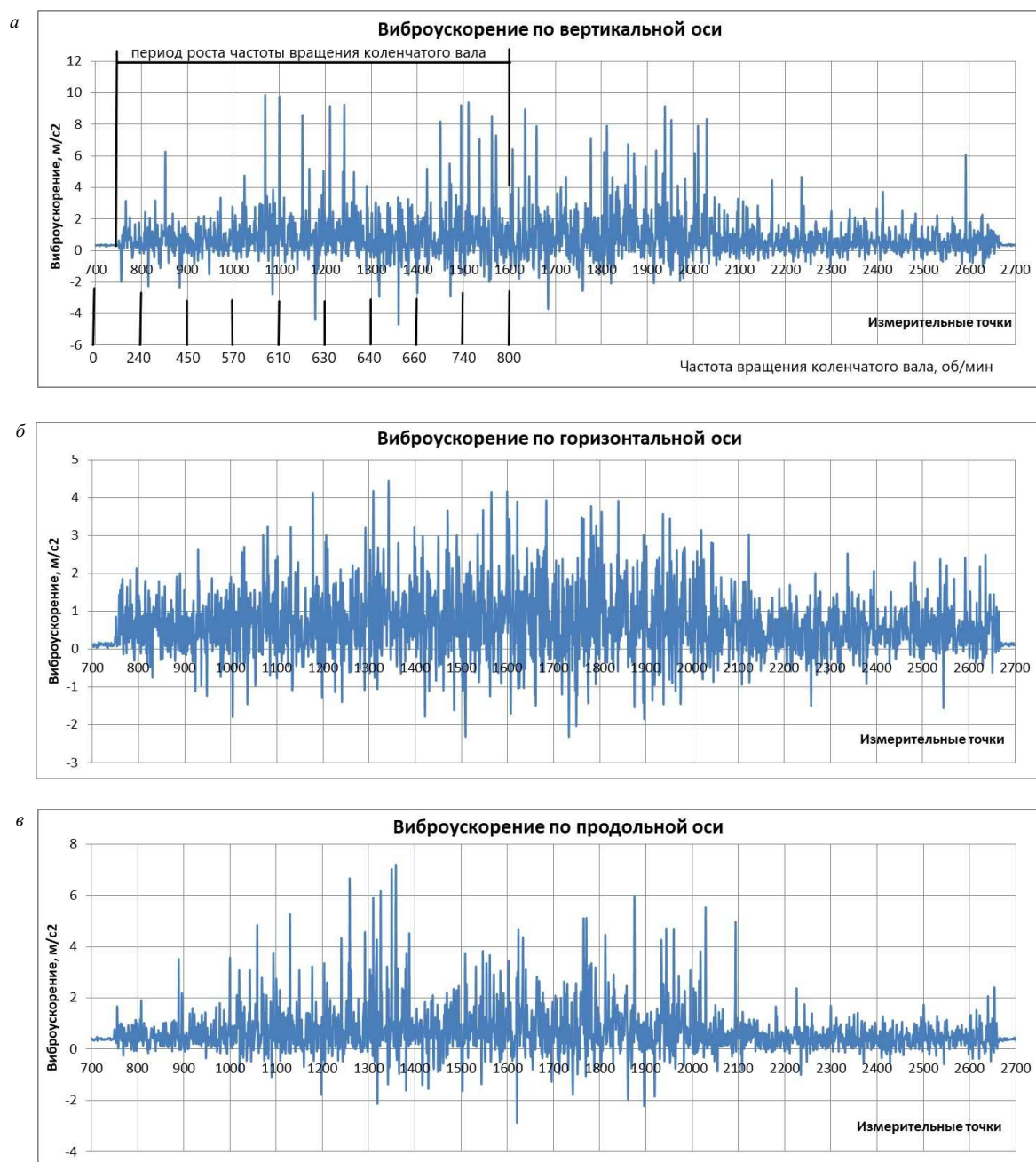


Рис. 9. Виброграмма главного двигателя 8190ZLCA2-2 (8ЧН19/21) судна проекта 81200:
а — график развития вибрации по вертикальной оси; б — график развития вибрации по горизонтальной оси;
в — график развития вибрации по продольной оси

На рис. 10 приведен график развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 81200 по результатам тензометрирования.

Проведя анализ рис. 10, можно сделать вывод, что резкого роста напряжений при резонансной частоте 630 об/мин не наблюдается, однако на данной частоте достигается максимальное значение напряжений 2,25 МПа.

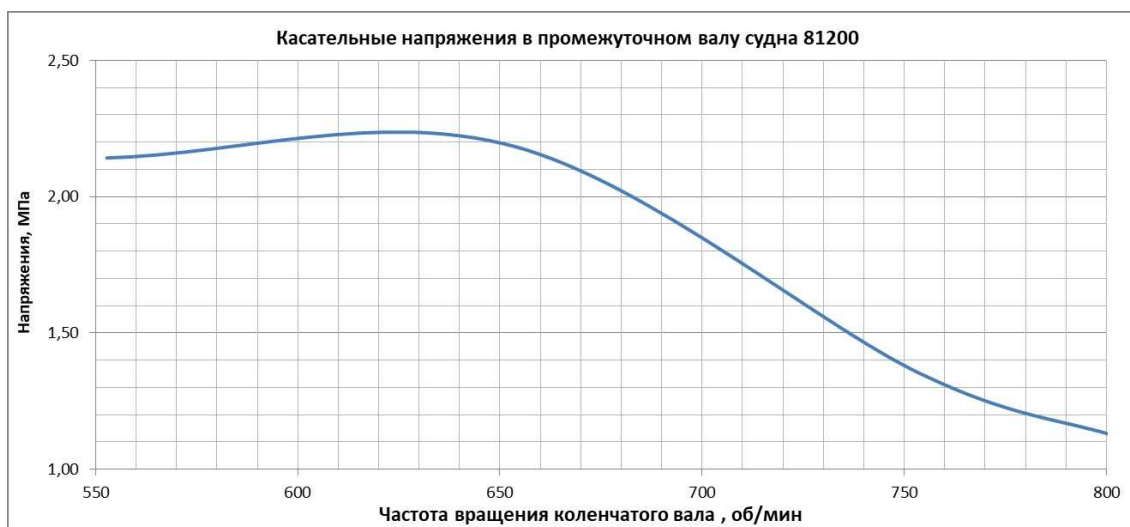


Рис. 10. График развития касательных напряжений в промежуточном валу судна проекта 81200

Далее был произведен вейвлет-анализ функции вибрации для участка виброграммы при ее измерении в продольном направлении для частоты вращения от 620 до 660 об/мин (рис. 11).

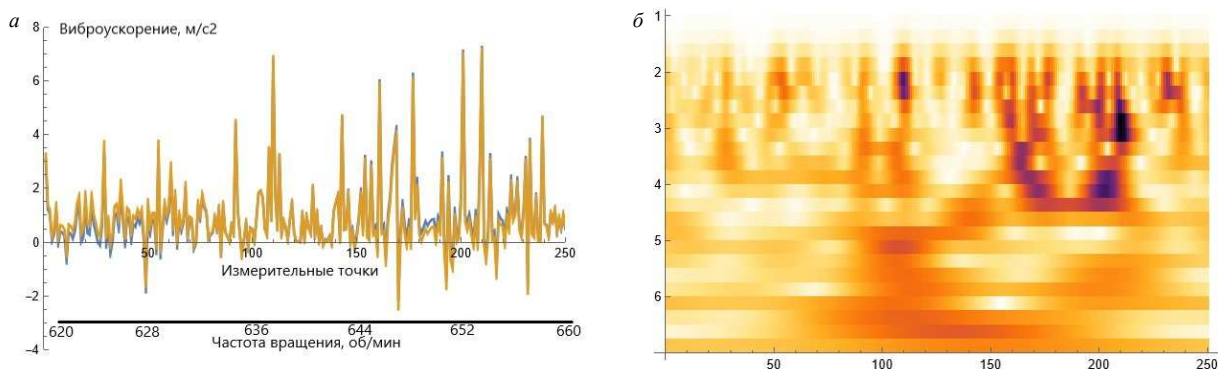


Рис. 11. Вейвлет-анализ виброграммы при изменении частоты вращения (от 620 до 660 об/мин) коленчатого вала главного двигателя 8190ZLCA2-2 (8ЧН19/21) судна проекта 81200:
 а — исходная функция и ее восстановление при помощи вейвлета Морле;
 б — скаллограмма вейвлет-анализа функции изменения вибрации

Как видно из результатов вейвлет-анализа, наибольший отклик функции вибрации (характеризуемый темным цветом) наблюдается на частоте 645 — 655 об/мин, и это позволяет определить пиковое значение виброускорения 7,16 м/с² и среднеквадратичное 17,58 м/с².

Интересным является факт, что наиболее сильно проявление резонансов крутильных колебаний наблюдается в продольном направлении при измерении вибрации, и это требует дальнейшего практического изучения выявленного эффекта на других судах.

Связь крутильных колебаний и вибраций создает возможность разработки и внедрения новых методов безразборной технической диагностики элементов судовых валопроводов [26], а также оценки качества их центровки с учетом напряженного состояния материала валов [27].

ВЫВОДЫ

1. Практическими методами доказана связь между развитием крутильных колебаний и вибрации судовых дизелей с достаточной глубиной диагностирования (резонансные амплитуды виброускорения в 2 — 6 раз превышают амплитуды на холостом ходу) при возникновении резонансов главных порядков (равных числу цилиндров дизеля).

2. Наблюдается четкая идентификация резонансов главных порядков на виброграммах в продольном направлении, что требует дополнительных практических исследований и оценки возможного резонанса осевых и крутильных колебаний.

3. Наиболее информативная картина по развитию резонансов крутильных колебаний проявляется для установок с прямой передачей мощности на гребной винт фиксированного шага с большой наработкой демпферов крутильных колебаний.

4. Применение метода вибромониторинга для технической диагностики состояния демпферов крутильных колебаний возможно после проведения ряда исследований для формирования базы диагностических признаков и может дополнить уже имеющуюся методику оценки технического состояния силиконовых демпферов. Для этого необходима четкая идентификация резонансов моторной формы крутильных колебаний, на которую настраиваются демпферы, а также значение исходных параметров вибрации при новых демпферах и при различных периодах наработки.

5. Вибромониторинг (после полноценной разработки, обоснования данного метода и одобрения классификационными обществами) может служить для оценки развития крутильных колебаний при эксплуатации судов в период между регламентными измерениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамонтов В.А. Анализ причин повреждений и отказов судовых валопроводов / В.А. Мамонтов, Г.А. Кушнер, Д.А. Волков // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. — 2021. — № 3. — С. 33 — 39.
2. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents, 2021. — 150 p.
3. Гирин С.Н. Анализ поломки гребного вала теплохода «ЭЛАНД» / С.Н. Гирин, Ю.И. Матвеев // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — №71 (2). — С. 15 — 28.
4. Чура М.Н. Прогнозирование начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов (на примере т/х «Волгонефть» пр. 1577/550А) / М.Н. Чура. — Новороссийск, 2010. — 57 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024. — 115 с.
6. Правила классификации и постройки судов (ПКПС) / Российское классификационное общество. — М., 2019. — 1685 с.
7. Лурье И.А. Крутильные колебания в дизельных установках / И.А. Лурье; Воен.-мор. акад. им. Ворошилова. — М.; Л.: Военмориздат, 1940. — 220 с.
8. Терских В.П. Крутильные колебания валопровода силовых установок. Исследования и методы расчета: [в 4 т.] / В.П. Терских. — Л.: Судостроение, 1969 — 1970.
9. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС: уч. пос. / П.А. Истомин. — Л.: Судостроение, 1968. — 304 с.
10. Румб В.К. Еще раз о расчетах крутильных и осевых колебаний судовых пропульсивных установок с ДВС / В.К. Румб, А.А. Пугач // Морской вестник. — 2013. — Специальный выпуск № 1 (10). — С. 31 — 33.
11. Румб В.К. Расчет крутильных и осевых колебаний судовых валопроводов непосредственным решением дифференциальных уравнений / В.К. Румб // Актуальные проблемы морской энергетики: м-лы II Всероссийской межотраслевой науч.-техн. конф. — СПб.: СПбГМТУ, 2013. — С. 79 — 82.
12. DNV GL. Rules for Classification: Ships. Edition October 2015. Part 4. Systems and components. Chapter 2. Rotating machinery, general. — 41 p.
13. Zetlab. Система измерения крутильных колебаний. [Электронный ресурс] URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/avtomatizirovannyye-stendy/sistema-izmereniya-krutilnyih-kolebaniy/> (дата обращения 01.09.2024).
14. Лапин Ю.А. Метод измерения крутильных колебаний судовых валопроводов при помощи трехосевого акселерометра / Ю.А. Лапин, М.В. Грибиниченко, О.С. Портнова, П.А. Андрухина // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2023. — № 3 (56). — С. 35 — 45.
15. Горбачев М.М. Сравнительная оценка применения микроэлектромеханических акселерометров для измерения крутильных колебаний судовых машинно-двигательных комплексов / М.М. Горбачев, А.В. Дьяченко, Д.Г. Конищев, А.Г. Кокуев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. — 2024. — № 1. — С. 95 — 103.
16. Никишин В.Н. Диагностирование силиконового демпфера крутильных колебаний коленчатого вала по параметрам вибрации / В.Н. Никишин, К.Н. Светличный // Леса России и хозяйство в них. — 2012. — № 1 — 2 (42 — 43). — С. 76 — 77.
17. Сибряев К.О. Работоспособность механических демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания / К.О. Сибряев, М.Н. Покусаев, М.М. Горбачев, А.Д. Ибадуллаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. — 2022. — № 1. — С. 35 — 41.
18. Тип Сормовский, проект 1557 // Водный транспорт [База данных]. [Электронный ресурс] URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1471?ysclid=m0jtbjcrz715534310> (дата обращения 01.09.2024).

19. Тип БТО, проект 81200 // Водный транспорт [База данных]. [Электронный ресурс] URL: <https://fleetphoto.ru/projects/176/?ysclid=m0jtdsvnlb974432812> (дата обращения 01.09.2024).
20. Горбачев М.М. Система мониторинга крутильных колебаний для повышения безопасности эксплуатации судового машинно-двигательного комплекса: дис. ... д-ра техн. наук / М.М. Горбачев — Астрахань, 2024. — 399 с.
21. Костюков В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: уч. пос. / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. — 360 с.
22. Костюков В.Н. Инновационные системы виброакустического мониторинга технического состояния оборудования КОМПАКС / В.Н. Костюков, А.В. Костюков // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2011. — № 8. — С. 3 — 11.
23. Конышева В.Ю. Вейвлет-анализ в задачах контроля и диагностики линейных динамических систем / В.Ю. Конышева, Н.А. Максимов, А.В. Шаронов // Труды МАИ. — 2017. — Вып. 97. — 19 с.
24. Глушков С.П. Вейвлет-функции Морлета в исследовании переменных составляющих крутящего момента двигателей внутреннего сгорания / С.П. Глушков, С.С. Глушков, В.И. Сигимов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2016. — № 2 (37). — С. 45 — 51.
25. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. / гл. ред. В.Н. Челомей. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. — М.: Машиностроение, 1980. — 544 с.
26. Покусаев М.Н. Применение систем мониторинга крутильных колебаний для повышения надежности судовых машинно-двигательных комплексов / М.Н. Покусаев, Т.В. Хоменко, М.М. Горбачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 78 — 86.
27. Гирин С.Н. Оценка качества центровки судовых валопроводов с учетом напряженного состояния материала / С.Н. Гирин, Ю.И. Матвеев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 59 — 67.

REFERENCES

1. Mamontov V.A., Kushner G.A., Volkov D.A. Analysis of damage and failure of ship propulsion shaft. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2021. No. 3. P. 33 — 39. (In Russ.)
2. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents, 2021. — 150 p.
3. Girin S.N., Matveev Yu.I. Analysis of the motor ship «ELAND» propeller shaft failure. *Russian Journal of Water Transport*. 2022. No. 71 (2). P. 15 — 28. (In Russ.)
4. Chura M.N. Prognozirovanie nachal'noi stadii ustalostnogo razrusheniya sudovykh grebnykh valov (na primere t/kh «Volgoneft» pr. 1577/550A) [Prediction of the initial stage of fatigue failure of ship propeller shafts (on the example of the motor ship «Volgoneft» project 1577/550A)]. Novorossiisk, 2010. 57 p.
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024. 115 p.
6. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov [Rules for the Classification and Construction of Ships] / Rossiiskoe klassifikatsionnoe obshchestvo. Moscow, 2019. 1685 p.
7. Lur'e I.A. Krut'il'nye kolebaniya v dizel'nykh ustanovkakh [Torsional vibrations in diesel units]. Moscow; Leningrad: Voenmorizdat, 1940. 220 p.
8. Terskikh V.P. Krut'il'nye kolebaniya valoprovoda silovykh ustanovok. Issledovaniya i metody rascheta: [Torsional vibrations of power unit shaft line. Research and methods of calculation: in 4 vols]. Leningrad: Sudostroenie, 1969 — 1970.
9. Istomin P.A. Krut'il'nye kolebaniya v sudovykh DVS [Torsional vibrations in marine internal combustion engines: textbook]. Leningrad: Sudostroenie, 1968. 304 p.
10. Rumb V.K., Pugach A.A. Eshche raz o raschetakh krut'il'nykh i osevykh kolebaniy sudovykh propul'sivnykh ustanovok s DVS [Once again on calculations of torsional and axial vibrations of ship propulsion systems with internal combustion engines]. *Morskoi vestnik*. 2013. Special issue No. 1 (10). P. 31 — 33.
11. Rumb V.K. Raschet krut'il'nykh i osevykh kolebaniy sudovykh valoprovodov neposredstvennym resheniem differentsial'nykh uravnenii [Calculation of torsional and axial vibrations of ship shafts by direct solution of differential equations]. *Aktual'nye problemy morskoi energetiki*. St. Petersburg: SPbGMTU, 2013. P. 79 — 82.
12. DNV GL. Rules for Classification: Ships. Edition October 2015. Part 4. Systems and components. Chapter 2. Rotating machinery, general. 41 p.
13. Zetlab. Sistema izmereniya krut'il'nykh kolebaniy [Torsional vibration measurement system]. URL: <https://zetlab.com/shop/sistemy-pod-kluch/avtomatizirovannye-stendy/sistema-izmereniya-krut'ilnykh-kolebaniy/> (accessed 01.09.2024).
14. Lapin Yu.A., Gribinichenko M.V., Portnova O.S., Andryukhina P.A. Metod izmereniya krut'il'nykh kolebaniy sudovykh valoprovodov pri pomoshchi trekhosevogo akselerometra [Method for measuring torsional vibrations of ship shafts using a three-axis accelerometer]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2023. No. 3 (56). P. 35 — 45.
15. Gorbachev M.M., D'yachenko A.V., Konishchev D.G., Kokuev A.G. Comparative assessment of microelectromechanical accelerometers use for measuring torsional vibrations of marine propulsion systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2024. No. 1. P. 95 — 103. (In Russ.)
16. Nikishin V.N., Svetlichnyi K.N. Diagnostirovanie silikonovogo dempfera krut'il'nykh kolebaniy kolenchatogo vala po parametram vibratsii [Diagnostics of silicone crankshaft torsional vibration damper by vibration parameters] // *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh*. 2012. No. 1 — 2 (42 — 43). P. 76 — 77.
17. Sibryaev K.O., Pokusaev M.N., Gorbachev M.M., Ibadullaev A.D. Efficiency of mechanical dampers of torsional vibrations of marine internal combustion engines. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2022. No. 1. P. 35 — 41. (In Russ.)
18. Tip Sormovskii, proekt 1557 [Sormovsky type, project 1557]. *Vodnyi transport*. [Water transport [Database]]. URL: <https://fleetphoto.ru/projects/1471?ysclid=m0jtbjcz715534310> (accessed 01.09.2024).
19. Tip БТО, проект 81200 [BTO type, project 81200]. *Vodnyi transport*. [Water transport [Database]]. URL: <https://fleetphoto.ru/projects/176/?ysclid=m0jtdsvnlb974432812> (accessed 01.09.2024).

20. Gorbachev M.M. Sistema monitoringa krut'il'nykh kolebaniy dlya povysheniya bezopasnosti ekspluatatsii sudovogo mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Torsional vibration monitoring system to improve the safety of operation of the ship's machinery and propulsion unit: DSc thesis]. Astrakhan, 2024. 399 p.
21. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines: textbook]. Omsk: OmGTU, 2011. 360 p.
22. Kostyukov V.N., Kostyukov A.V. Innovatsionnye sistemy vibroakusticheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya KOMPAKS [Innovative systems of vibroacoustic monitoring of technical condition of KOMPAKS equipment]. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. 2011. No. 8. P. 3 — 11.
23. Konysheva V.Yu., Maksimov N.A., Sharonov A.V. Veivlet-analiz v zadachakh kontrolya i diagnostiki lineinykh dinamicheskikh system [Wavelet analysis in problems of control and diagnostics of linear dynamic systems]. *Trudy MAI [Transactions of Moscow Aviation Institute]*. 2017. Issue 97. 19 p.
24. Glushkov S.P., Glushkov S.S., Sigimov V.I. Morlet wavelet functions in the study of variable torque components of internal combustion engines. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2016. No. 2 (37). P. 45 — 51. (In Russ.)
25. Vibratsii v tekhnike: spravochnik. V 6 t. / gl. red. V.N. Chelomei. T. 3. Kolebaniya mashin, konstruktssii i ikh elementov [Vibrations in technics: handbook. In 6 vol. / ed. by V.N. Chelomey. T. 3. Vibrations of machines, constructions and their elements]. — M.: Mashinostroenie, 1980. 544 p.
26. Pokusaev M.N., Xomenko T.V., Gorbachev M.M. Use of torsional vibration monitoring systems to improve the reliability of marine propulsion systems. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 78 — 86. (In Russ.)
27. Girin S. N., Matveev Yu. I. Assessment of ship shafting alignment quality taking into account the stress state of the material. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 72/73. P. 59 — 67. (In Russ.)

УДК 629.5.011; 629.5.016; 629.5.018; 629.123
EDN VQEZJD

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СОСТАВЕ КСЭУ СУДОВ КЛАССА «АФРАМАКС»

А.А. Иванченко, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Л.С. Венцюлис, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: leonard446@gmail.com

Г.А. Конев, магистр, аспирант ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: sigen11@yandex.ru

В статье проанализированы возможности применения инновационных газотурбинных технологий в составе комбинированных энергетических установок крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» с целью повышения энергоэффективности и экологических показателей флота. Разработаны концептуальные проекты КСЭУ мегаваттного класса, объединяющие достижения газотурбостроения, паротурбинных и электрохимических технологий, технологий использования возобновляемых источников энергии и интеллектуальных систем управления. Определены рациональные параметры ГТД и утилизационных контуров для достижения КПД свыше 60 % при существенном снижении эмиссии парниковых газов.

Ключевые слова: суда класса «Афрамекс», комбинированные судовые энергетические установки, газотурбинные двигатели, керамические композиты, органический цикл Ренкина, интеллектуальные системы управления, термодинамическая эффективность, эмиссия парниковых газов.

Для цитирования: Иванченко А.А. Перспективы применения инновационных газотурбинных технологий в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» / А.А. Иванченко, Л.С. Венцюлис, Г.А. Конев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 126 — 149. — EDN VQEZJD.

PROSPECTS OF INNOVATIVE GAS TURBINE TECHNOLOGIES APPLICATION IN INTEGRATED POWER PLANTS OF AFRAMAX TANKERS

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

L.S. Ventsulis, DSc, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: leonard446@gmail.com

G.A. Konev, MSc, post-graduate student, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: sigen11@yandex.ru

The article analyzes the potential of innovative gas turbine technologies application in integrated power plants of Aframax-class large-capacity ships to improve fleet energy efficiency and environmental friendliness. Conceptual designs of megawatt-class IPPs have been developed, combining advances in gas turbine engineering, steam turbine and electrochemical technologies, renewable energy sources, and intelligent control systems. Rational parameters of gas turbine engines and waste heat recovery circuits have been determined to achieve efficiency over 60 % with a significant reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: Aframax-class tankers, integrated marine power plants, gas turbine engines, ceramic matrix composites, organic Rankine cycle, intelligent control systems, thermodynamic efficiency, greenhouse gas emissions.

For citation: Ivanchenko A.A., Ventsulis L.S., Konev G.A. Prospects of innovative gas turbine technologies application in integrated power plants of Aframax tankers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 126 — 149. EDN VQEZJD.

ВВЕДЕНИЕ

Ужесточение экологических требований Международной морской организации (ИМО) к энергоэффективности и выбросам парниковых газов (ПГ) с отработавшими газами энергетических установок судов является ключевым драйвером инновационного развития судовой энергетики в средне- и долгосрочной перспективе [1]. Согласно Первоначальной стратегии ИМО по сокращению выбросов ПГ, принятой в 2018 г., международное судоходство должно снизить абсолютный объем эмиссии CO_2 как минимум на 50 % к 2050 г. (от уровня 2008 г.) при одновременном повышении операционной энергоэффективности судов на 40 % к 2030 г. [2]. В 2023 г. ИМО скорректировала целевые показатели Стратегии в сторону достижения углеродной нейтральности отрасли к середине столетия [3]. Это потребует внедрения инновационных энерго-сберегающих технологий и ускоренного перехода флота на низко- и безуглеродные виды топлива [4]. В этом контексте перспективным решением представляется создание интегрированных судовых энерго-комплексов нового поколения, функционирующих на энергии высокоэффективных тепловых двигателей, электрохимических генераторов, систем утилизации теплоты и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [5, 6]. По оценкам ведущих классификационных обществ, оптимальная комбинация указанных технологий способна обеспечить сокращение удельного расхода топлива на 20 — 35 % и выбросов CO_2 на 50 — 90 % по сравнению с традиционными СЭУ [7, 8]. Ключевым фактором конкурентоспособности перспективных комбинированных СЭУ (КСЭУ) является достижение рекордных значений КПД цикла энергопреобразования при приемлемой стоимости жизненного цикла. В этой связи значительный интерес представляет исследование возможности применения инновационных газотурбинных технологий в качестве основной движущей силы крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» дедвейтом 80 — 120 тыс. т.

По своим удельным характеристикам современные газотурбинные двигатели (ГТД) сопоставимы с малооборотными дизелями (МОД), являющимися отраслевым стандартом СЭУ в данном сегменте [9]. При этом газовые турбины обладают рядом уникальных преимуществ, открывающих новые возможности повышения энергоэффективности СЭУ: 1) топливная гибкость; 2) высокая экологичность; 3) компактность и модульность конструкции; 4) отсутствие ограничений по сопротивлению выпуску и противодавлению; 5) высокая приемистость.

Целями данной работы являлись: 1) анализ возможности и перспектив применения передовых газотурбинных технологий в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» для повышения энергоэффективности и экологических показателей СЭУ; 2) разработка концептуальных проектов высокоэкономичных КСЭУ мегаваттного класса на основе инновационных ГТД, утилизационных паротурбинных и утилизационных контуров, электрохимических генераторов, ВИЭ и интеллектуальных систем управления; 3) определение рациональных параметров и оптимальной конфигурации перспективных КСЭУ, обеспечивающих достижение КПД 60 % + и многократное снижение выбросов CO_2 и NO_x ; 4) обоснование приоритетных направлений развития отечественного энергомашиностроения для создания научно-технического задела в части ключевых элементов КСЭУ нового поколения.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1) проведен системный анализ современного состояния и прогноза развития технологий газотурбостроения в части повышения термодинамических параметров цикла, применения инновационных конструкционных материалов, методов охлаждения и организации рабочего процесса в камерах сгорания (КС);

2) исследованы возможности использования альтернативных рабочих тел и прогрессивных утилизационных систем, включая комбинированные парогазовые и газопаротурбинные установки, органические циклы Ренкина, гибридные ГТУ с топливными элементами;

3) разработан ряд концептуальных технических решений по составу оборудования и схеме КСЭУ на базе ГТД нового поколения, отличающихся архитектурой системы утилизации, типом передачи мощности и накопителями энергии;

4) проведены параметрические исследования и многокритериальная оптимизация рабочих параметров ГТД и основных элементов утилизационного контура с целью максимизации топливной эффективности КСЭУ;

5) исследована эффективность применения интеллектуальных систем динамического перераспределения нагрузок, оптимальной маршрутизации и адаптивного управления в составе КСЭУ нового поколения;

6) выполнен технико-экономический анализ рассмотренных вариантов КСЭУ с учетом капитальных затрат, топливных издержек, экологических платежей и стоимости вывода из эксплуатации при различных сценариях развития рынка энергоносителей и нормативной базы;

7) сформулированы рекомендации по приоритетным направлениям развития отечественного энергомашиностроения с целью создания научно-технического задела в области проектирования и производства перспективных судовых ГТД и КСЭУ.

1. АНАЛИЗ ДОСТИЖЕНИЙ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевыми недостатками судовых ГТУ предыдущих поколений являлись повышенные значения удельного эффективного расхода топлива (b_e) в диапазоне 270 — 330 г/кВт·ч и ограниченный ресурс горячей части (до 50 — 100 тыс. ч.) [10]. Однако стремительный прогресс в области аэрокосмического материаловедения, технологий охлаждения и горения, методов проектирования проточной части открывает возможности радикального улучшения экономичности и надежности перспективных газовых турбин при адаптации к судовым условиям [11, 12]. По экспертным оценкам, внедрение монокристаллических сплавов, керамических композитов и аддитивных технологий в конструкцию стационарных ГТУ простого цикла мегаваттного класса позволит повысить эффективный КПД (η_e) до 46 — 50 % при снижении b_e до 200 — 220 г/кВт·ч к 2030 г. [13]. Дальнейший прогресс в топливной эффективности до уровня 55 — 60 % будет связан с переходом к ГТД сложного цикла с промежуточным охлаждением и регенерацией теплоты на основе компактных теплообменников из металлокерамики [14] (см. рис 1, 2).

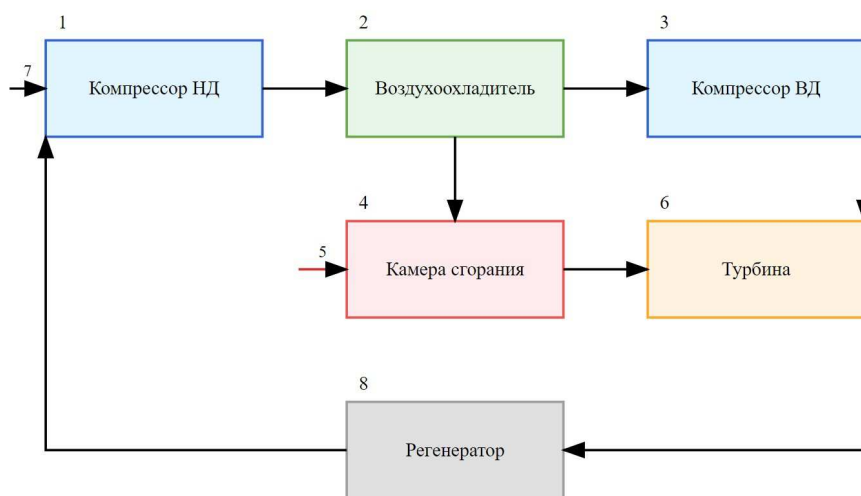


Рис. 1. Перспективная тепловая схема ГТД:

1 — компрессор низкого давления; 2 — воздухоохладитель; 3 — компрессор высокого давления; 4 — КС; 5 — подача топлива; 6 — турбина; 7 — подача циклового воздуха; 8 — регенерация теплоты

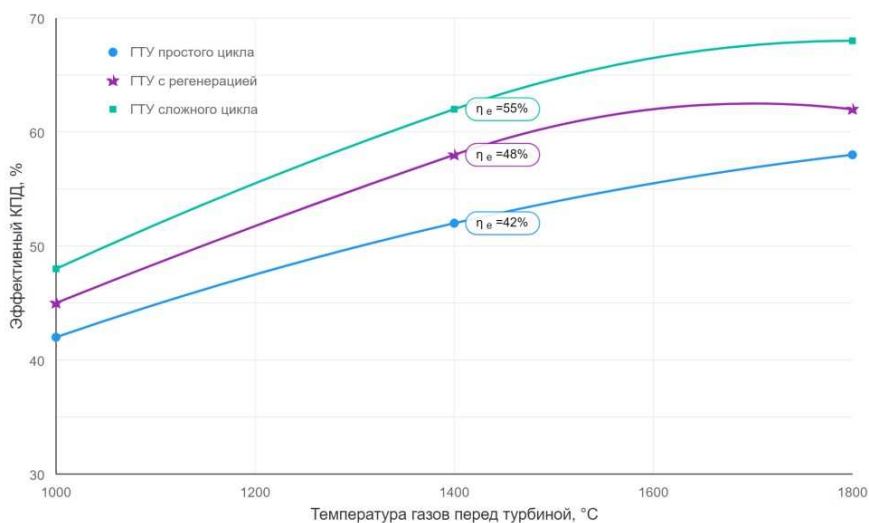


Рис. 2. Зависимость η_e различных типов ГТУ от T_t перед турбиной

При этом внедрение технологий каталитического и микрофакельного сжигания топливовоздушных смесей в камере сгорания (КС) обеспечит выполнение перспективных норм ИМО по эмиссии оксидов азота (Tier III, Tier IV) без применения систем очистки [15, 16]. Рядом отечественных и зарубежных исследователей обоснована техническая реализуемость судовых газотурбинных установок с η_e 60 % и выше на базе гибридных схем парогазового (ПГУ) и газопаротурбинного (ГПТУ) циклов с регенерацией [17, 18]. При этом оптимальные параметры бинарного цикла (давление и температура промперегрева пара, кратность циркуляции в испарителе, отношение расходов рабочих тел) находятся из условий баланса мощностей, теплообмена и термодинамического КПД (η_t) с учетом теплофизических свойств теплоносителей и характеристик вспомогательного оборудования [19, 20]. Наиболее перспективным вариантом повышения энергоэффективности утилизационного контура представляется переход от традиционного паросилового цикла Ренкина к органическому циклу (ОЦР) на основе низкокипящих рабочих тел (НКРТ) с оптимальными термодинамическими свойствами — высокой плотностью пара, малой теплотой парообразования, высоким коэффициентом теплопередачи [21, 22]. Рядом авторов показано, что применение бинарных и каскадных схем ОЦР позволяет повысить глубину утилизации теплоты отработавших газов ГТУ до 85 — 95 % и получить дополнительную полезную мощность в объеме 20 — 30 % от мощности газовой турбины [23, 24]. Ключевым фактором эффективности ОЦР является рациональный подбор рабочего тела в соответствии с уровнем температур и потенциальной работоспособностью вторичных энергоресурсов [25].

Существенного повышения топливной экономичности и снижения эмиссии вредных веществ КСЭУ можно достичь при интеграции с высокотемпературными электрохимическими генераторами (ЭХГ) на базе твердооксидных (ТОТЭ) и расплавкарбонатных (РКТЭ) топливных элементов с внутриреформингом топлива [26]. По данным разработчиков (Bloom Energy, Mitsubishi, Siemens), $\eta_{КСЭУ}$ на базе котельных агрегатов и ТОТЭ/РКТЭ мощностью 0,1 — 1 МВт достигает 65 — 75 % при работе на природном газе и спиртовых топливах [27, 28]. При этом удельная эмиссия NO_x и SO_x снижается на 1 — 2 порядка относительно уровня поршневых ДВС, что позволяет выполнять перспективные нормы ИМО в эквивалентных зонах контроля выбросов (NECA) [29]. Ключевыми проблемами внедрения ЭХГ в судовых условиях остаются высокая стоимость электрохимических модулей (5000 — 10000 \$/кВт), ограниченный ресурс электролита и уплотнений (20 — 40 тыс. ч), низкая циклическая прочность керамики на термоудар [30]. Синергетический эффект от комбинирования высокоэкономичной ГТУ, утилизационного ОЦР контура и батареи ТОТЭ/РКТЭ может быть дополнительно усилен применением интеллектуальных систем динамического перераспределения нагрузки (СДПН) и адаптивного управления режимами. Как показано в [31, 32], использование прогностических алгоритмов на основе нейронечетких сетей (Fuzzy-Neural) и динамики нагрузок судна по выбранному маршруту позволяет оптимизировать управляющие воздействия на приводы регулируемого электродвижения с целевой функцией минимизации расхода топлива в рейсе. При этом учитываются метеорологические факторы, профиль скорости, загрузка судна, текущее техническое состояние механизмов и трендовые характеристики их износа [33].

По оценкам разработчиков, внедрение СДПН адаптивного типа способно сократить годовой объем эмиссии CO_2 на 3 — 6 % при сохранении средней эксплуатационной скорости [34]. Дополнительным резервом повышения экологичности и повышения энерговооруженности судов является комплексирование СЭУ с возобновляемыми источниками энергии: солнечными батареями (СБ), ветрогенераторами (ВЭУ), турбопарусами, волновыми движителями и др. Как показано в [35, 36], использование вспомогательной ветроэнергетической установки мощностью 2 — 4 % от пропульсивной мощности судна позволяет экономить 5 — 20 % топлива в зависимости от профиля эксплуатации и района плавания. Применение фотоэлектрических модулей (КСБ) на базе каскадных гетероструктур типа GaInP/GaAs/Ge с η_e 35 — 40 % способно генерировать до 0,5 — 1 МВт·ч электроэнергии в сутки при оптимальной ориентации панелей суммарной площадью 500 — 1000 м² [37].

Потенциал получения дополнительной тяги за счет бортовой качки и демпфирования судна с помощью интерцептора с активным приводом оценивается в 10 — 20 % [38]. В совокупности интеграция рассмотренных энергосберегающих решений в рамках единого интеллектуального энергокомплекса КСЭУ позволит достичь синергетического эффекта и обеспечить повышение энергоэффективности и экологичности судов нового поколения. Перспективной целью для отечественных конструкторских бюро в рассматриваемом плане является разработка концептуальных проектов КСЭУ мегаваттного класса (18 — 25 МВт) для крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» на основе инновационных газотурбинных технологий и прогрессивных схем утилизации теплоты в сочетании с интеллектуальными системами управления и ВИЭ для достижения максимального η цикла (60 %+) и минимального b_e (140 — 160 г/кВт·ч) при обеспечении высоких экологических стандартов (Tier III) и полного соответствия перспективным требованиям ИМО к 2050 году.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) проводится системный анализ современного состояния и прогноза развития технологий газотурбостроения в части повышения термодинамических параметров цикла, применения инновационных конструкционных материалов, методов охлаждения и организации рабочего процесса в КС;

2) исследуется потенциал использования альтернативных рабочих тел и прогрессивных схем утилизационных контуров, включая комбинированные ПГУ, ГТУ-ОЦР и гибридные установки с топливными элементами;

3) разрабатывается ряд концептуальных технических решений по составу оборудования и схеме КСЭУ на базе ГТД нового поколения, отличающихся архитектурой системы утилизации, типом передачи мощности и составом накопителей энергии;

4) проводится параметрический анализ и многокритериальная оптимизация рабочих параметров ГТД (температура, степень повышения давления, коэффициент избытка воздуха) и основных элементов утилизационного контура (ПТУ, ОЦР, ЭХГ) с целью обеспечения максимальной топливной эффективности КСЭУ;

5) исследуется эффективность применения интеллектуальных систем динамического перераспределения нагрузок, выбора оптимальной траектории движения и адаптивного управления в составе КСЭУ на базе технологий нейросетевого прогнозирования и нечеткой логики;

6) выполняется технико-экономический анализ рассмотренных вариантов КСЭУ с учетом капитальных затрат, топливных издержек, экологических платежей и стоимости вывода из эксплуатации при различных сценариях развития рынка энергоносителей и нормативной базы;

7) формулируются рекомендации по приоритетным направлениям развития отечественного энергомашиностроения с целью создания научно-технического задела для проектирования и производства конкурентоспособных образцов судовых ГТД и КСЭУ нового поколения.

Анализ мировых достижений и тенденций развития газотурбинных технологий показал, что газотурбинные двигатели являются одним из наиболее динамично развивающихся классов тепловых машин, находя широкое применение в авиации, энергетике, газотранспортных системах и судовой энергетике. За последние 50 лет удельная мощность и экономичность ГТД выросли более чем в пять раз, при этом потенциал дальнейшего совершенствования далеко не исчерпан [39]. Стремительный прогресс газовых турбин обусловлен синергией достижений в области аэродинамики, конструкционной прочности, тепломассообмена, материаловедения и технологий производства (см. рис. 3).

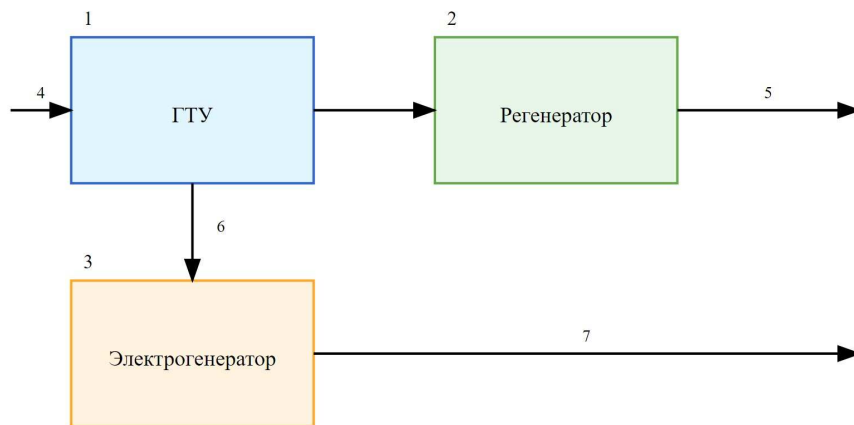


Рис. 3. Схема ГТУ простого цикла с регенерацией:

1 — газотурбинная установка (ГТУ); 2 — регенератор; 3 — электрогенератор; 4 — подача циклового воздуха;
5 — выпуск отработанных газов; 6 — механическая передача; 7 — выработка электроэнергии

Ключевыми трендами развития ГТД нового поколения являются:

1) повышение начальных параметров термодинамического цикла (температуры и давления) за счет применения жаропрочных сплавов, монокристаллических лопаток, керамических композитов и термобарьерных покрытий с рабочей температурой 1700 — 2000 К [40];

2) оптимизация системы охлаждения высокотемпературных узлов с использованием многоступенчатого воздушного охлаждения, паровых завес, микроканальных схем конвективного охлаждения на основе наножидкостей [41, 42];

3) совершенствование методов организации процесса горения в КС (каталитическое сжигание, LPP, RQL) и технологии распыливания топлива с целью минимизации эмиссий NO_x , CO и несгоревших углеводородов [43, 44];

- 4) внедрение ротационно-статических схем подшипников на газодинамической и магнитной подвеске с целью увеличения ресурса, η и снижения эксплуатационных расходов на ТОиР [45, 46];
- 5) использование керамических и композиционных материалов в горячей части ГТД для снижения массы, экономии топлива и радикального увеличения ресурса лопаток [47];
- 6) разработка адаптивных систем управления и защиты ГТУ на базе технологий прогнозтики, нечеткой логики и искусственного интеллекта с целью раннего прогнозирования и предотвращения отказов [48, 49].

2. ИННОВАЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГТД

Системный анализ технологий конструкционных материалов для перспективных ГТД представлен в табл. 1. В качестве базы сравнения приняты характеристики монокристаллических никелевых сплавов 2-го поколения (ВКНА-4У, ЖС36-ВИ), получивших наибольшее распространение в авиационных ГТД семейств ПС-90А, CFM-56, RB211 и др. Анализ табл. 1 показывает, что керамические и углеродные композиты существенно (в 1,5 — 3 раза) превосходят лучшие монокристаллические сплавы по удельной прочности, рабочей температуре и стойкости к ползучести. Предельная рабочая температура керамики на основе карбида кремния (SiC/SiC) достигает 1350 °С, оксидной керамики (Ох/Ох) — 1400 °С, углерод-керамических композитов C/SiC — 1600 °С и выше. При этом плотность КМК в 3 — 4 раза ниже суперсплавов (2000 — 2500 кг/м³), что позволяет радикально снизить массу и момент инерции ротора.

Таблица 1

Свойства конструкционных материалов для ГТД 5 — 6 поколений

Параметр	Монокристаллы		Керамические композиты		Углерод-керамика	Мах.	Источник
	2 пок.	5 пок.	SiC/SiC	Ох/Ох	C/SiC		
Плотность, кг/м ³	8300	8450	2550	2200	1900	1900	[40, 50]
Прочность при растяжении, МПа	1050	1280	420	210	310	1280	[41, 47, 50]
Модуль упругости, ГПа	125	130	380	150	95	380	[40, 50]
Предел длительной прочности, МПа ($T=1373$ К, $\tau=100$ ч)	180	220	310	154	285	310	[41, 42, 50]
Предельная $t_{\text{рабочая}}$, °С	950	1100	1350	1280	1600	1600	[40, 41, 50]
Теплопроводность, Вт/(м·К) (при 1000 °С)	30	40	32	4	30	40	[46, 50]
Коэффициент термического расширения, 10^{-6} К ⁻¹ (20 — 1000 °С)	16	15	5,5	8,2	2,7	2,7	[47, 50]
Твердость, НВ	430	480	2800	1200	920	2800	[40, 46]
Ударная вязкость, кДж/м ²	50	60	35	28	40	60	[41, 47]
Стоимость, \$/кг	180	250	1000	1500	3000	3000	[40, 50]
Примечание. Монокристаллы: 2 пок. — ВКНА-4У (ЖС36-ВИ), 5 пок. — ВЖМ15 (CMSX-10); керамические композиты: SiC/SiC — SiCf/SiC (Тип S, CVI), Ох/Ох — Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ ; углерод-керамика: C/SiC — углеродное волокно/SiC матрица.							

Ключевые преимущества КМК обусловлены сочетанием высокой удельной прочности армирующих волокон (до 3 — 5 ГПа), низкого коэффициента термического расширения, высокой теплопроводности и стойкости к окислению матрицы. Керамические волокна на основе SiC (Nicalon, Tyranno, Sylramic) сохраняют до 90 % прочности при нагреве до 1400 °С в течение 1000 ч, тогда как лучшие жаропрочные сплавы деградируют уже при 1100 °С [47].

Структурная стабильность КМК определяется сопротивлением матричного компонента высокотемпературной ползучести и окислению в агрессивной среде продуктов сгорания. Покрывание межфазных границ защитными слоями оксикарбида кремния (SiOC) и пиролитического углерода (PyC) позволяет повысить трещиностойкость композита и релаксировать остаточные напряжения в матрице [51]. Сочетание КМК SiC/SiC со связующей фазой BN/Si₃N₄ демонстрирует прочность на изгиб до 450 МПа при 1500 °С и трещиностойкость K_{1C} ~ 20 МПа·м^{1/2} [52]. Одна из ключевых проблем внедрения КМК в горячей части ГТД — сложность получения изделий сложной формы методами порошковой металлургии и искрового плазменного спекания.

Аддитивные технологии селективного лазерного спекания керамики SiC/SiC и высокотемпературной 3D-печати монокристаллических лопаток способны решить эту проблему за счет формирования изделий

любой геометрии непосредственно из CAD модели [53]. При этом прочностные свойства аддитивно полученных лопаток из НХ сплавов сопоставимы с отливками традиционным методом направленной кристаллизации. Результаты стендовых испытаний экспериментальных роторов с керамическими лопатками показывают возможность повышения η турбины на 2 — 4 % при одновременном снижении удельного расхода охлаждающего воздуха на 30 — 50 % [54]. По оценкам General Electric, использование композитных лопаток SiC/SiC в первой ступени ГТУ 9HA.02 позволит увеличить начальную температуру газов на 100 °C, обеспечив рост η турбины с 41 % до 43 % [55]. Нарботка на отказ керамических деталей при рабочих температурах 1400 — 1500 °C прогнозируется на уровне 50 000 ч, что в 3 — 5 раз превышает ресурс никелевых лопаток [56]. Не менее перспективны достижения в области разработки жаропрочных сплавов нового поколения. Высоколегированные сплавы 4 — 5 поколений на основе интерметаллидов никеля (Ni3Al, NiAl, NiTi) и тугоплавких металлов группы VIA (Cr, Mo, W) сохраняют длительную прочность на уровне 200 — 250 МПа при рабочих температурах 1200 — 1300 °C в течение 100 000 ч [57]. Защитные покрытия лопаток из высокоэнтропийных сплавов системы TiZrNbHfTa толщиной 200 — 300 мкм позволяют повысить их жаростойкость на 50 — 70 °C и ресурс в 2 — 3 раза [58]. При этом алюминидные покрытия NiAl и NiAlCr демонстрируют в 2 — 3 раза более низкую скорость окисления и повышенную адгезию к подложке по сравнению с промышленными аналогами [59].

Результаты ресурсных испытаний перспективных сплавов ВЖМ15 и ВИН3 (моно) в составе опытных газогенераторов АЛ-41Ф (ПД-14, ОДК) показали возможность устойчивой работы при температуре газа перед турбиной 1835 — 1870 К и ресурсе горячей части до 30 000 ч [60]. При этом обеспечивается выполнение перспективных требований ИКАО и САЕР/10 по эмиссии NO_x и CO на уровне 15 — 40 % от порогов действующих стандартов [61].

Существенные резервы повышения топливной эффективности и экологичности судовых ГТД связаны с оптимизацией систем охлаждения горячей части и совершенствованием процессов горения в КС. Потери мощности турбины, связанные с отбором охлаждения. Как показано в [62], применение конвективно-плечного охлаждения лопаточного аппарата с использованием многорядных систем перфорации, двухконтурных схем течения и интенсификаторов теплообмена позволяет повысить эффективность охлаждения на 40 — 60 % при одновременном снижении расхода воздуха через отверстия до 2 — 3 %. Использование жидкометаллического теплоносителя (натрий, литий, эвтектический сплав Na-K) в замкнутом контуре системы охлаждения способствует интенсификации теплоотвода в критических зонах лопатки в 5 — 7 раз и снижению неравномерности температурных полей на 25 — 30 % [63]. Внедрение аддитивных технологий селективного лазерного плавления (SLM) порошков жаропрочных сплавов позволяет формировать сложные конфигурации каналов охлаждения, недоступные традиционным методам литья [64]. При этом прочностные свойства и структура материала охлаждаемых лопаток в зоне лазерной наплавки сохраняются на уровне основного материала. Применение конформных змеевидных каналов охлаждения, полученных методом SLM, повышает интенсивность теплообмена на 20 — 30 % и ресурс охлаждаемых лопаток в 1,5 — 2 раза по сравнению со штатными аналогами [65].

Ключевым фактором обеспечения низких выбросов вредных веществ с ОГ ГТУ является совершенство организации процесса горения в камере сгорания. Традиционные диффузионные КС характеризуются неравномерностью распределения температур (до 400 — 600 °C) и концентраций топлива в факеле, что приводит к локальным перегревам (более 2000 К) и интенсивному образованию термических оксидов азота [66]. Переход к гомогенным схемам горения в КС с предварительным смешением и термоакустическими колебаниями LPP (Lean, Premixed, Prevaporized) позволяет выровнять температурное поле (до ± 70 °C), снизить пиковые температуры на 150 — 200 °C и эмиссию NO_x на 60 — 80 % [67]. Дальнейшее совершенствование схем LPP связано с применением многоступенчатой подачи топлива и воздуха, микрофакельного горения, управляемой закрутки потока в жаровой трубе. Использование форсунок с системой воздушных завихрителей и тангенциальных каналов диаметром 0,5 — 1 мм позволяет сформировать тороидальный вихрь с высоким числом Россби ($Ro \sim 1$), обеспечивающий многократную циркуляцию продуктов сгорания в головной части факела [68]. При этом достигается выравнивание температурного поля до ± 20 °C, увеличение полноты сгорания на 0,5 — 1 % и 5-кратное снижение эмиссии NO_x и сажи. Применение каталитически стабилизированного горения на поверхности гранулированного материала с высокоразвитой удельной поверхностью (30 — 300 м²/г) позволяет реализовать режим беспламенного «холодного» горения (1200 — 1600 К) с высокой химической активностью компонентов в диапазоне коэффициентов избытка воздуха 1,5 — 5 [69]. При этом скорость химических реакций возрастает на 5 — 6 порядков, расширяются концентрационные пределы горения и обеспечивается «нулевая» эмиссия NO_x и CO [70]. Внедрению каталитических КС в серийное производство препятствует относительно высокая стоимость и ограниченный ресурс катализаторов (Pt, Pd, Rh) при рабочих температурах выше 1000 °C.

Большой интерес представляют схемы КС с химической регенерацией теплоты на базе процесса термохимической конверсии природного газа в синтез-газ ($\text{CO} + 3\text{H}_2$) с последующим сжиганием в основной зоне горения [71]. Организация рециркуляции и предварительной конверсии топлива в присутствии никелевых катализаторов при 500 — 700 °С позволяет химически утилизировать до 25 — 30 % теплоты уходящих газов, увеличивая η_e ГТУ простого цикла на 3 — 5 % [72].

При этом достигается равномерное температурное поле в КС ($\text{grad } T < 30$ °С), степень конверсии CH_4 до 85 — 95 % и сокращение эмиссии NO_x на 20 — 30 % относительно диффузионного сжигания обедненных ТВС [73]. В совокупности внедрение рассмотренных прогрессивных технологий организации рабочего процесса в КС позволит кардинально улучшить экологические характеристики перспективных ГТД и обеспечить соответствие перспективным нормам ИМО по ограничению эмиссии NO_x и CO_2 в горизонте 2050 г. Табл. 2 обобщает ожидаемую динамику совершенствования η_e и экологических характеристик ГТУ простого цикла мегаваттного класса на базе внедрения прогрессивных технологий горячей части и организации рабочего процесса, систематизированных по критерию уровня технологической готовности (TRL).

Таблица 2

Прогноз развития судовых ГТУ простого цикла

Характеристика	1990	2000	2020	2030	2050
Предельная рабочая $t_{\text{уходящих газов}}$, °С					
Традиционные ГТУ	900	1000	1100	1200	1300
ГТУ на кермет-композитах	—	—	1350	1500	1700
КПД электрический (ISO), %					
Серийные ГТУ	28	32	38	42	45
ГТУ на кермет-композитах	—	—	44	48	55
Эмиссия NO_x , г/кВт·ч					
Диффузионная КС	18	12	8	6	4
LPP, RQL, каталитическая КС	—	2	1	0,5	0,1
Эмиссия CO, г/кВт·ч					
Диффузионная КС	4	2	1	0,5	0,2
LPP, RQL, каталитическая КС	—	0,5	0,2	0,1	0,05
TRL, средн.	7	8	8	6	4

Как следует из табл. 2, применение монокристаллических сплавов 4 — 5 поколения и термобарьерных покрытий позволит повысить температуру газов перед турбиной до 1500 — 1700 °С, обеспечив рост $\eta_{\text{элек.}}$ серийных ГТУ до 45 — 50 % к 2030 г. Освоение полноразмерных узлов горячего тракта из керамических композитов SiC/SiC и легких сплавов с интерметаллидным упрочнением (TiAl, NbAl) откроет возможность форсирования параметров цикла ($T_{\text{г.ит}} = 1600$ — 1800 °С и $\pi_k > 50$), что обеспечит достижение η_e 55 — 60 % на горизонте 2050 г. Переход к низкоэмиссионным технологиям сжигания (LPP, RQL) с многоступенчатой подачей топлива-окислителя, управляемой закруткой потока и каталитической стабилизацией пламени позволит снизить концентрацию NO_x в отработавших газах до 10 — 50 ppm и обеспечить выполнение перспективных норм ИМО Tier III и выше без применения систем очистки. Внедрение систем активного управления горением с обратной связью по пульсациям давления и составу продуктов сгорания обеспечит устойчивую работу КС в бедных и сверхбедных режимах ($\alpha = 2,0$ — 2,5) с минимальной эмиссией CO и HC.

Дальнейшее развитие судовых ГТУ будет направлено на совершенствование схемных решений в части промежуточного охлаждения циклового воздуха, регенерации теплоты уходящих газов, парогазотурбинных и газопаровых циклов с промперегревом водяного пара и органического теплоносителя. Переход от базовых ГТУ простого цикла к ГТУ с регенерацией, охлаждением, парогазовым и органическим надстройкам обеспечивает последовательное повышение η_e и удельной мощности при минимизации расхода топлива и эмиссии ПГ (см. табл. 3). Комплексный анализ табл. 3 позволяет выделить следующие перспективные конфигурации ГТУ, рекомендуемые для применения в составе КСЭУ нового поколения (см. рис. 4):

1) высокотемпературная ГТУ простого цикла на керамических композитах с $\eta_{\text{рег}}$ 45 — 48 % и температурой газов 1400 — 1600 °С;

2) регенеративная ГТУ простого цикла с $\eta_{\text{рег}}$ 48 — 52 %, степенью регенерации 0,85 — 0,9 и противодавлением за турбиной до 5 — 10 кПа;

3) ГТУ с промежуточным охлаждением на базе 2-ступенчатого сжатия с $\eta_{\text{рег}} 52 — 55 \%$, коэффициентом промощаждения 1,5 — 2 и частичным отводом теплоты ОС в тепловую сеть;

4) высокоэкономичная ПГУ бинарного цикла с $\eta_{\text{рег}} 58 — 62 \%$, начальными параметрами пара 30 МПа, 650 °С и коэффициентом теплофикации 1 — 1,2;

5) ГТУ-ОРЦ с пентановым контуром на базе одновальной схемы и частичной утилизацией теплоты отработавших газов (ОГ) в конденсаторе ОРЦ, с $\eta_{\text{рег}} 54 — 58 \%$.

При этом оптимальный выбор схемы и параметров ГТУ для конкретного проекта КСЭУ должен производиться на основе технико-экономической оптимизации с учетом уровня форсировки, профиля нагрузок, располагаемых видов топлива и приоритетности критериев эффективности.



Рис. 4. Схема ГТУ со сложным циклом и промощаждением:

1 — компрессор низкого давления; 2 — воздухоохладитель; 3 — компрессор высокого давления;
4 — камера сгорания; 5 — подвод топлива; 6 — турбина; 7 — подача циклового воздуха; 8 — выпуск ОГ

Таблица 3

Сравнительные характеристики перспективных схем ГТУ

Схема ГТУ	Параметры			$\eta_{\text{рег}}$ %	b_e , г/кВт·ч	Удельная масса, кг/кВт	Удельная стоимость САРЕХ, \$/кВт	Технические особенности
	$T_{\text{г.пт}}^*$, °С	π_k^*	$\alpha_{\text{кс}}^*$					
Простой цикл (базовый)	1200	18	2	36	240	4,5	1100	$P_{\text{г.пт}} = 1,1 \text{ МПа}$; $T_{\text{нв}} = 15 \text{ °С}$; $\eta_{\text{етр}}$, $\eta_{\text{ем}} = 0,99$
Простой цикл (кермет)	1500	25	1,5	45	190	3,5	1300	$P_{\text{г.пт}} = 1,6 \text{ МПа}$; КС RQL; $T_{\text{NO}_x} < 25 \text{ ppm}$
Регенеративный (кермет)	1350	14	2,2	48	180	2,8	1500	$\eta_{\text{рег}} = 0,9$; $t_{\text{нв}} = 70 \text{ °С}$; $Q_{\text{охл.в}} = 8 \% Q_{\text{к}}$
С промощаждением (2 КНД)	1450	50	1,8	52	165	3,5	2000	$T_{\text{охл}} = 45 \text{ °С}$; $G_2/G_1 = 0,6$; $P_{\text{охл}} = 0,3 \text{ МПа}$
Перспективная ПГУ (1+1)	1500	25	1,8	58	150	3,0	1800	$P_{\text{опп}} = 10 \text{ МПа}$; $T_{\text{опп}} = 600 \text{ °С}$; $\alpha_{\text{фл}} = 1,2$
ГТУ-ОРЦ с пентаном	1400	28	2,0	54	157	4,2	1900	$t_{\text{кин}} = 175 \text{ °С}$; $t_{\text{пл}} = 300 \text{ °С}$; $G_{\text{рт}}/G_{\text{г}} = 0,05$

Примечание. $T_{\text{г.пт}}^*$ — температура газов перед турбиной, К; π_k^* — степень повышения давления в компрессоре; $\alpha_{\text{кс}}^*$ — коэффициент избытка воздуха в камере сгорания; $\eta_{\text{рег}}$ — КПД воздухоподогревателя; b_e — удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч.

Таблица 4

Основные характеристики концептуальных вариантов КСЭУ

№	Состав и особенности	ГТУ	Утилиз. контур	Топливо	$N_{ГТУ}$, МВт	$N_{ПТУ}$, МВт	$N_{ЭХБ}$, МВт	$N_{ЭД}$, МВт	$\eta_{КСЭУ}$, %	Вт, т/сут	CO ₂ , т/сут	NO _x , ppm
1	2 × ГТУ + ПТУ + 2 × ВРК + АБ	Простой цикл, $P=25$, $T_r=1400$ °С, $\eta_e=0,45$	КУ + ПТУ на паре, 8 МПа, 480 °С	СПГ, метанол (10 %)	24	2	—	26	57,2	73,8	176	10
2	1 × ГТУ + ОЦР + ВПМ + АБ	ГТУ с рекуперацией, $P=28$, $T_3=1450$ °С, $\eta_e=0,48$	ORC на пентане, 300 °С, 3 МПа	СПГ, метанол (30 %)	18	—	3	21	58,4	65,2	147	5
3	2 × ГТУ + ГТА + ВРК + СК	ГТУ в полужамкнутом цикле, $P=12$, $T_3=1150$ °С, $\eta_e=0,52$	КУ + АГТД на тяжелых УВ, H_e-N_e	Синтетич. жидкое топливо	24	—	1	25	60,8	57,6	115	0,5
4	ГТУ + ДГ + ПТУ + МЭГ + АБ	ГТУ простой, $P=25$, $T_3=1350$ °С + ДГ $P_g=6$ МВт	КУ + ВПГ на H ₂ + электролизер 3 МВт	Аммиак безводный	19	2,5	1	22,5	56,1	78,4	140	<1
5	2 × ГТУ + ПТУ + ОЦР + АБ	ГТУ комбинированный ПГУ/ГТУ-ОЦР	2-ступ. ПТУ на паре + ОЦР	Метанол, биогаз	20+4	5	1+4	34	62,4	48,7	95	2

Примечание. ВПМ — высокомоментный привод на ПМ; ВРК — винторулевая колонка; АБ — аккумуляторная батарея; СК — суперконденсатор; КУ — котел-утилизатор; ВПГ — водородный парогенератор; МЭГ — модуль электрохимической генерации; ГТА — газотурбинный агрегат.

3. АРХИТЕКТУРА И КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КСЭУ

В соответствии с целями и задачами работы разработано пять концептуальных проектов КСЭУ электрической мощностью 18 — 25 МВт, предназначенных для применения в составе пропульсивных комплексов крупнотоннажных судов класса «Афрамекс» дедвейтом 80 — 120 тыс. т. Основные технические решения и прогнозные характеристики вариантов КСЭУ обобщены в табл. 4. Ниже приведено детальное описание предлагаемых вариантов КСЭУ.

Вариант 1. КСЭУ на базе 2 керамических ГТУ простого цикла суммарной мощностью 24 МВт в сочетании с двухконтурной утилизационной ПТУ на водяном паре мощностью 2 МВт для привода 2 ВРК (см. рис. 5).

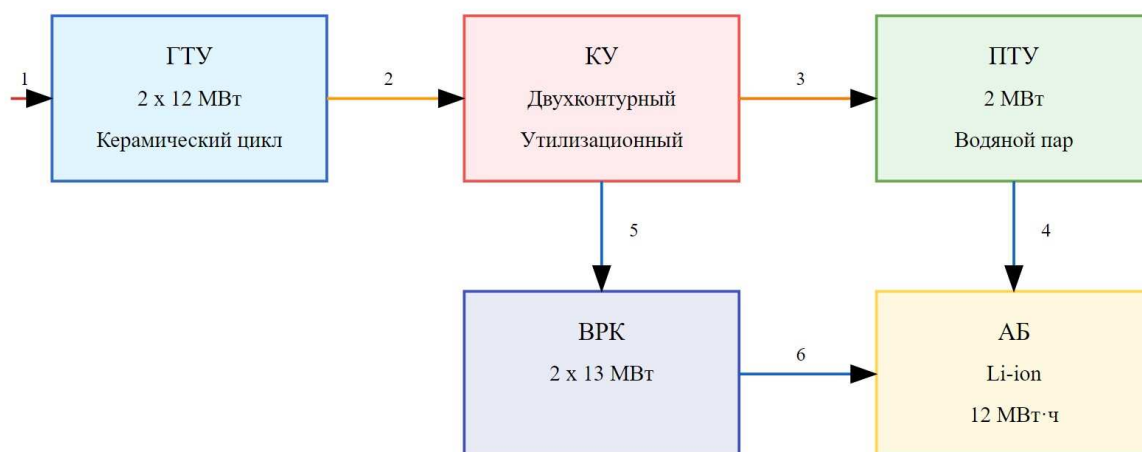


Рис. 5. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 1:

1 — подача топлива; 2 — выпуск отработанных газов; 3 — подача пара; 4 — подача электроэнергии (ПТУ-АБ); 5 — подача электроэнергии (ПТУ-ВРК); 6 — подача электроэнергии (ВРК-АБ)

В качестве накопителя энергии и резервного источника используется Li-ion батарея большой емкости (12 МВт·ч). Мощность и тип ГД выбраны из условия обеспечения скорости полного хода 15 — 16 уз. Газотурбинная часть включает 2 ГТД традиционной простой схемы с 18-ступенчатым осевым компрессором

($P_k = 2,5$, $\eta_{ад} = 0,87$), трубчато-кольцевой КС и 4-ступенчатой осевой турбиной с охлаждаемой 1-й ступенью. Проектные параметры цикла ГТУ: температура газов на входе в турбину $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, суммарная степень расширения 25, коэффициент избытка воздуха в КС 2,5, η_e ГТД 45 %. КС инновационной конструкции LPP многозонного типа с управляемой закруткой потоков обеспечивает выравнивание поля температур на выходе до $\pm 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и снижение уровня эмиссии NO_x до 10 ppm без впрыска воды или пара. В качестве основного топлива используется отпарной газ (BOG) из танков СПГ с добавлением до 10 % метанола. При бункеровке СПГ с метановым числом не ниже 80 организуется его смешение с BOG непосредственно в топливной системе перед КС, что исключает необходимость отдельной газоподготовки. Система управления ГТД на базе FADEC (Full Authority Digital Engine Control) обеспечивает контроль потребных расходов компонентов топлива в соответствии с нагрузкой ГТУ и динамическое перераспределение расходов BOG и СПГ при изменении метанового числа смеси. Силовая турбина ГТУ выполнена на основе сборно-разборного ротора с монокристаллическими лопатками и сегментированным корпусом из легких сплавов. Охлаждение С1 ступени — конвективно-пленочное на основе многорядных систем перфорации, двухконтурных схем течения, жидкометаллических теплообменных секций (натрий). Опоры турбины — активно-адаптивная конструкция с ротационным демпфированием на газовой смазке и ЭМП.

Таким образом обеспечивается повышение η турбины до 92 — 93 % и ресурса до 150 тыс. ч. Роторы компрессора и турбины соединены демпферной муфтой в едином корпусе ГТД с общей смазочной системой. В качестве редуктора используется одноступенчатый шевронный планетарный редуктор с прямыми зубьями шестернями и керамическими подшипниками качения. Масштабирование редуктора на мощность до 12 МВт при высокой частоте вращения обеспечивается применением зубчатых колес из карбида кремния и нитрида титана. Таким образом снижаются потери на трение и масса редуктора при сохранении высокого η , малошумности и плавности работы.

Утилизационный контур представляет собой двухконтурную систему, сопрягающую котел-утилизатор (КУ) с паровой противодавленческой турбиной мощностью 2 МВт. Параметры пара перед турбиной: $P_o = 8\text{ МПа}$, $T_o = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход 5 кг/с. $\eta_{ПТУ}$ составляет 32 % при $t_{ух.г} 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении пара за ПТ 0,005 МПа. Конденсатор ПТ объединен с регенеративными ПВД в единый узел утилизации теплоты $t = 120 — 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общесудовые потребности в насыщенном паре (обогрев, горячее водоснабжение, подогрев жидких грузов) покрываются за счет теплофикационных отборов от ПТ. Для обеспечения пиковых нагрузок и работы в маневренных режимах предусмотрен накопитель энергии на базе Li-ion АБ большой емкости (тип LMO, удельная емкость 200 Вт·ч/кг). Основная функция АБ: обеспечение устойчивого электроснабжения при динамических возмущениях нагрузки путем выдачи (поглощения) небалансной мощности до $\pm 2\text{ МВт}$ в течение 30 мин. Заряд/разряд АБ осуществляется через инвертор и DC-шину. Время полного заряда АБ от берегового источника 6 — 8 ч. Ресурс АБ до замены модулей 6 — 8 лет. Для привода гребных винтов ВРК используется напряжение 10 кВ, преобразуемое ЧП в диапазон частот 0 — 120 Гц. ГЭД — высокомоментный 12-фазный СДПМ в герметичном корпусе с воздушно-водяным охлаждением и редуктором. $\eta_{КСЭУ}$ в диапазоне частот вращения 30 — 100 % номинальной составляет 94 — 96,5 %. Для компенсации потерь мощности на валах из-за износа и обрастания используется система мониторинга момента ГЭД и адаптивный регулятор мощности ВРК. Предусмотрен режим экономичного хода на переменных оборотах с автоматическим поддержанием оптимальной загрузки ГТУ по минимуму удельного расхода. Прогнозный $\eta_{КСЭУ}$ (с учетом КУ и ПТУ) на номинальном режиме составляет 57,2 % при расходе газового топлива 73,8 т/сут. Выбросы CO_2 при сжигании 10 % метанола не превысят 176 т/сут, среднеэксплуатационные выбросы NO_x — 10 ppm (при норме 20 ppm по циклу E2/E3 ИМО). Для компоновки в МКО 2 ГТУ, редукторных приводов ВРК и электротехнического оборудования требуется машинное отделение (МО) следующих размеров: $L = 15\text{ м}$, $H = 10\text{ м}$, $B = 25\text{ м}$.

Вариант 2. Единая электроэнергетическая установка на базе 1×ГТД с рекуперацией тепла ОГ мощностью 18 МВт, утилизационного контура на НРТ (пентан) мощностью 3 МВт и Li-ion АБ емкостью 15 МВт·ч (см. рис. 6). Двигатель — ВПМ на ПМ суммарной мощностью 18 МВт. Особенности ГТУ: степень повышения давления в компрессоре $P_k = 28$, температура газов перед турбиной $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, η_e 48 % (ISO). Регенератор — пластинчато-ребристый воздухоподогреватель из металлокерамики с развитой поверхностью (площадь теплообмена 3500 м^2) и коэффициентом рекуперации 0,85 — 0,9. Воздушный тракт высокого давления и горячие узлы турбины (С1 — С2) выполнены на основе высокотемпературных керамических композитов SiC/SiC.

Бандажные полки рабочих лопаток С1 турбины — монокристаллический сплав ВКНА-25 с термобарьерным покрытием NiAl/YSZ. Ресурс керамической турбины до замены узлов горячего тракта 50 тыс. ч. КС трубчато-кольцевая многофорсуночная с управляемой закруткой потока в жаровой трубе и термоакустическими пульсациями давления. Аксиальные завихрители на форсунках обеспечивают тангенциальную подкрутку потока с образованием зон обратных токов (вихрь Бюргерса). Турбулизация пристенного слоя и

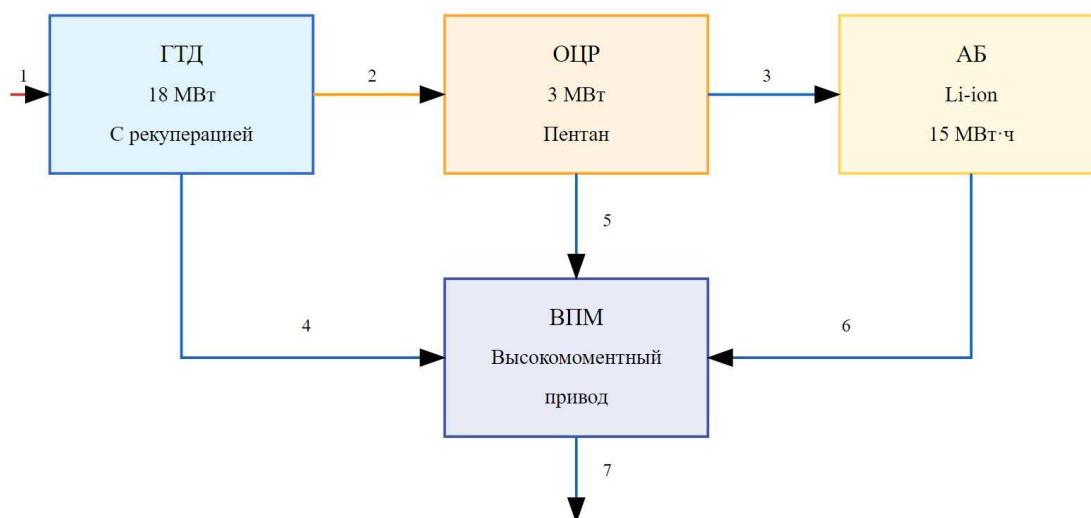


Рис. 6. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 2:

1 — подача топлива; 2 — выпуск отработанных газов; 3 — подача электроэнергии (ОЦР-АБ); 4 — подача электроэнергии (ГТД-ВПМ); 5 — подача электроэнергии (ОЦР-ВПМ); 6 — подача электроэнергии (АБ-ВПМ); 7 — механическая энергия

рециркуляция продуктов сгорания к фронту горения способствует стабилизации процесса и снижению эмиссии NO_x до 50 ppm при сжигании СПГ/метанола без впрыска пара или воды. Многотопливная система питания обеспечивает работу ГТД на СПГ и метаноле в любых пропорциях в зависимости от наличия бункера. Предусмотрен резервный газойль для растопки КС при запуске и в аварийных режимах. Газовое топливо из криогенных танков СПГ подается в КС под давлением 2 — 3 МПа после испарения и подогрева до 100 — 120 °С в газовом нагревателе. Впрыск метанольного топлива в аксиальные форсунки обеспечивает гомогенизацию факела и позволяет форсировать параметры.

Утилизационный контур представляет замкнутую систему на органическом теплоносителе (пентан) паротурбинного цикла с температурой кипения 175 °С, давлением 3 МПа и расходом рабочего тела до 12 кг/с. При начальной температуре 300 °С и конечной 90 °С термический η цикла Ренкина составит 21 %. Турбина радиальная одноступенчатая с частотой вращения ротора до 30 000 об/мин. Рекуператор и конденсатор — кожухотрубные аппараты интенсифицированной теплопередачи на профилированных трубках из нержавеющей стали. Система хранения энергии — Li-ion АБ емкостью 15 МВт·ч с жидкостным контуром термостатирования. Предельная 30-минутная мощность системы накопителей 5 МВт. Буферная АБ позволяет реализовать режим динамического позиционирования с поддержанием курса и координат судна в 5-балльном шторме без использования основных движителей. В штатных условиях АБ работает в качестве активного фильтра, компенсирующего провалы и выбросы напряжения бортовой сети. Единый гребной электродвигатель — многополюсный СДПМ оригинальной конструкции с возбуждением от ВПМ на основе сплава NdFeB. Обмотки статора — алюминиевый сплав с керамическим наполнением Al-SiC. Воздушный зазор увеличен до 10 — 15 мм за счет бандажирования ротора высокопрочным композитом. Принудительное жидкостное охлаждение с прокачкой теплоносителя (вода-гликоль) через каналы в пазах и внутренний теплообменник. Момент страгивания ГЭД 200 кН·м при номинальной частоте вращения 120 об/мин. η на переменных режимах 92 — 97 % (30 — 110 % $N_{\text{ном}}$). В качестве движителя применяется нерегулируемый ВФШ с лопастями саблевидной формы из полимерного композита (ПКМ). Ступица ВФШ — биметаллическая облегченная конструкция (титановый сплав + бронза). Редуктор с двухпоточной передачей — одноступенчатый планетарный на базе зубчатых колес из высокопрочной нитроцементованной стали. Валопровод от ГЭД к ВФШ — композитный вал из углеволокна со сферическими шарнирами в опорах и сальниковых уплотнениях.

Расчетный η ГТУ-ОРЦ установки на номинальном ходу достигает 58,4 % при удельном расходе топлива (СПГ/метанол) 65,2 т/сут. Ожидаемые выбросы CO_2 в атмосферу — 147 г/кВт·ч или 2,25 г/т-миля. При номинальной нагрузке уровень эмиссии NO_x не превысит 5 ppm без селективного каталитического восстановления. Массогабаритные показатели варианта 2 КСЭУ позволяют разместить основное оборудование в МО с размерениями: 50 × 25 × 20 м.

Вариант 3. КСЭУ на базе замкнутого газотурбинного цикла с гелиево-неоновым рабочим телом и промежуточным теплообменником-утилизатором, приводящая 2 ВРК через планетарные редукторы (см. рис. 7). Основа цикла — 2 ГТУ замкнутого контура (мощностью 12 МВт каждая) и бинарная металлгидридная



Рис. 7. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 3:

1 — подача топлива; 2 — теплоноситель (ГТУ — Теплообменник); 3 — теплоноситель (Теплообменник — Бинарная установка); 4 — механическая передача (ГТУ — Редукторы); 5 — механическая передача (Редукторы — ВРК); 6 — подача электроэнергии (ВРК — СК); 7 — подача электроэнергии (Бинарная установка — СК); 8 — утилизация тепла

установка на тяжелых углеводородах (УВ) мощностью 1 МВт. Гелиево-неоновая смесь (Ne/He) с молярной долей гелия 0,8 совершает полужамкнутый термодинамический цикл в ГТУ с промежуточным теплообменом $Q = 40$ МВт. Особенности цикла: степень сжатия в многоступенчатом центробежном компрессоре, начальная температура газа перед турбиной $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, расход смеси 42 кг/с. Система замкнутого охлаждения обеспечивает $t_{\text{вх}}$ на входе в ТО $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении 2,4 — 2,8 МПа.

Высокотемпературный компактный пластинчатый ТО-регенератор на основе керамического композита C/SiC. Конструктивное исполнение — модульный кожухотрубный многоходовый аппарат с U-образными трубками $\varnothing 1 — 2$ мм и щелевидными каналами малого сечения (0,8 — 1,5 мм). Материалы трубок — карбидокремниевая керамика 3-го поколения (Tyranno SA, Sylramic) и легированный сплав FeCrAl. Для интенсификации теплообмена применяется профилирование теплопередающей поверхности регулярными выступами типа «конический винт». Прогнозный коэффициент теплопередачи ТО — 600 — 800 Вт/м²К при $\lambda_s = 180 — 240$ Вт/мК. Турбина осевая 5-ступенчатая с частотой вращения ротора 15 — 18 тыс. об/мин. Рабочие и сопловые лопатки первых 3 ступеней — литьевые из монокристаллического сплава ВКНА-4У. Охлаждение рабочих лопаток С1 — конвективное петлевое и пленочное из наружных продольных щелей. Внедрение керамических композитов SiC/SiC в конструкцию С1 — С3 позволило достичь $T_f^* = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ при ресурсе 45 — 50 тыс. ч.

Расчетный η турбины 92 % с учетом просечек и утечек в лабиринтах. Регулируемый сопловой аппарат 1 ступени с изменением угла установки профиля в диапазоне ± 15 град. Таким образом осуществляется управление расходом и давлением гелий-неонового контура в зависимости от нагрузки ГТД. Привод механизма поворота — высокомоментный шаговый электродвигатель с волновой передачей и датчиком положения ротора. Уплотнения в системе замкнутого цикла — сухого газодинамического типа с минимальными утечками теплоносителя. Концевые уплотнения турбины и компрессора — лунковые газостатические подшипники, работающие в режиме газовой смазки за счет дросселируемого перепада давлений. Общие потери на трение, протечки и тепловые утечки через изоляцию не превышают 5 — 7 % теплоподвода в цикле. В качестве привода электрогенератора используется одновальная компоновка с зубчатым редуктором, понижающим частоту вращения турбины до 3000 об/мин (энергетический режим). ГЭД — бесконтактная многополюсная электрическая машина с возбуждением постоянными магнитами (СДПМ) мощностью 2×12 МВт. Интегральный η электропривода с учетом потерь в обмотках и магнитопроводе составляет 97 — 98 %. Система возбуждения — комбинированная с постоянными магнитами ротора из сплава NdFeB и электромагнитами статора с векторным управлением от ПЧ. Бинарный контур на тяжелых УВ (изобутан, пропан) используется для конверсии сбросной теплоты ОГ ($500 — 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) в механическую работу газотурбинного агрегата (ГТА) мощностью 1 МВт. Особенностью схемы является применение компактного пластинчатого парогенератора из нержавеющей стали, в котором происходит испарение жидкого изобутана при давлении 4 МПа и температуре $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет теплоты ОГ ГТУ. Образовавшийся газ совершает работу расширения в турбине ГТА, после чего конденсируется в КНД водяного охлаждения и возвращается в контур бинарного цикла. Рабочее тело бинарного цикла — смесь тяжелых УВ с температурой кипения в диапазоне $200 — 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Возможно применение в качестве рабочих тел нетрадиционных теплоносителей (силиконовые масла, ионные жидкости, расплавы солей и металлов). Термодинамические параметры вторичного контура: $P_o = 4$ МПа, $T_o = 350$ °С, $P_k = 0,4$ МПа, расход РТ 8 кг/с. При этом обеспечивается электрическая мощность ГТА 1 МВт (η 15 — 18 %) и рекуперация до 80 % теплоты уходящих газов ГТУ. Суммарный $\eta_{КСЭУ}$ достигает 60,8 % на номинальном режиме нагрузки при $t_{нв} = 15$ °С. Удельный расход условного топлива (дизтопливо, синтетич. жидкие УВ) — 57,6 т/сут или 140 г/кВт·ч. За счет высокой полноты сжигания и отсутствия связанного азота в топливе обеспечивается минимальный уровень эмиссии NO_x и CO (0,4 — 0,5 ppm). Выбросы CO_2 в расчете на 1 т дедвейта и милю пройденного пути — 115 г/т·км (на 60 % ниже уровня современных СЭУ). Высокие массогабаритные показатели установки позволяют разместить основное оборудование замкнутого контура в МКО ограниченного объема. Прогнозная удельная масса КСЭУ — 4,5 кг/кВт при суммарном объеме оборудования 520 — 550 м³ (удельный объем 0,022 м³/кВт). Для монтажа, обслуживания и замены узлов ГТУ предусмотрены съемные элементы МКО.

Вариант 4. Единая электроэнергетическая установка на базе 1 × ГТУ простого цикла мощностью 12 МВт, дизель-генератора на СПГ (6 МВт) и аммиачной модульной энергоустановки (МЭУ) с электролизером воды мощностью 3 МВт. Теплота уходящих газов ГТУ утилизируется в водоводородном парогенераторе (ПГ) для питания МЭУ (см. рис. 8). Движители — 2 ВРК типа Azipod с приводом от СДПМ по 11,2 МВт. Основные параметры ГТУ: $P_k = 25$, $T_r = 1350$ °С, расход воздуха 42 кг/с, η_e 40 %. КС трубчато-кольцевая многофорсуночная с раздельной подачей топливных компонентов.

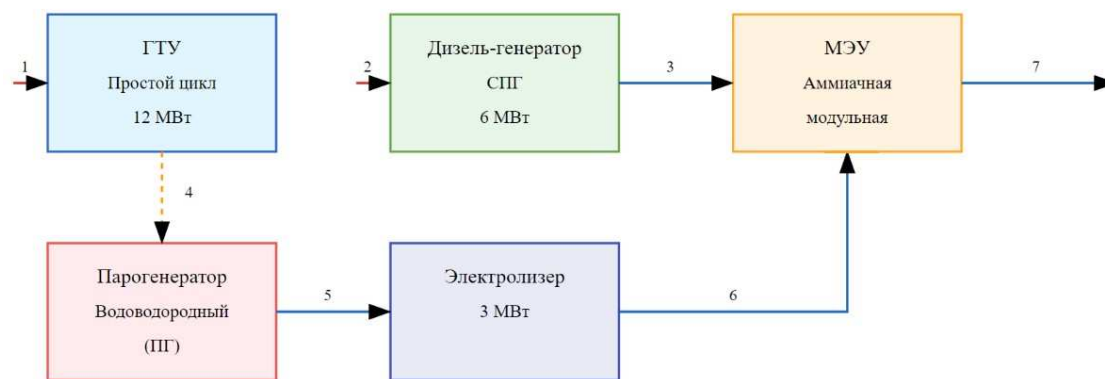


Рис. 8. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 4:

1 — подача топлива (ГТУ); 2 — подача СПГ (Дизель-генератор); 3 — подача электроэнергии (Дизель-генератор — МЭУ); 4 — отработавшие газы (ГТУ — ПГ); 5 — подача пара (ПГ — Электролизер); 6 — подача водорода (Электролизер — МЭУ); 7 — подача электроэнергии на азиподы

Газообразный аммиак (NH_3) из криогенных танков хранения смешивается с воздухом высокого давления в аксиальных завихрителях перед форсунками. Процесс воспламенения и стабилизации пламени инициируется комбинированной системой зажигания (высоковольтный разряд + лазер). Интенсивная закрутка потока (число Россби 0,5 — 1,0) способствует выравниванию температурного поля и снижению эмиссии NO_x до 1 — 5 ppm. Материалы «горячей части» ГТ: монокристаллы 5-го поколения (лопатки С1 — С2), керамические и металлокерамические композиты (жаровая труба, соплово-диафрагменный аппарат, корпуса турбин). Воздушный компрессор — 16-ступенчатый осевой с промежуточным охлаждением и программным регулированием угла установки РЛ в функции нагрузки ГТД. η_e компрессора — 88 — 90 % во всем диапазоне режимов. Редуктор — планетарный 2-ступенчатый, расчетный ресурс зубчатых зацеплений 40 — 45 тыс. ч. Привод ГЭД осуществляется от полупроводникового преобразователя частоты с ШИМ (диапазон рабочих частот 5 — 70 Гц). Номинальные обороты ГЭД 500 об/мин. Для компенсации износа зубчатых передач и падения напора ВРК предусмотрен асинхронный режим ГЭД с частотой вращения до 750 об/мин. Резервный дизель-генератор судовой мощностью 6 МВт работает на СПГ по газодизельному циклу. При этом в цилиндры ДВС подается пилотная порция диз. топлива (10 — 15 % по теплоте) для воспламенения обедненной метановоздушной смеси. Это позволяет снизить эмиссию NO_x до уровня Tier III при степени сжатия 13 — 14. Отличительной особенностью установки является применение углеродно-нейтрального аммиачного топлива, получаемого методом деструктивной перегонки (крекинга) мочевины: $(NH_2)_2CO + H_2O = 2NH_3 + CO_2$ ($T = 400$ — 450 °С). Источником водяного пара для реакции служит высокотемпературный ПГ контактного типа производительностью 4 — 5 т/ч, использующий теплоту ОГ ГТУ и функционирующий по циклу Ренкина.

Необходимый для реакции H_2 получают электролизом части конденсата в щелочном электролизере высокого давления (до 10 МПа). Электролизер пластинчатый фильтр-прессного типа с удельным расходом $4,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 H_2$ при 80°C . Технологическая схема топливподготовки комплексной аммиачной установки (КАУ) включает следующие стадии:

- 1) испарение и перегрев водяного пара до 450°C за счет утилизации тепла ОГ ГТУ (12 МВт) в парогенераторе и пароперегревателе;
- 2) смешивание перегретого пара с расплавом мочевины из бака запаса и нагрев гомогенной смеси в реакторе крекинга до 450°C ;
- 3) высокотемпературное разложение мочевины с получением газообразного аммиака и диоксида углерода;
- 4) конденсация и абсорбция продуктов конверсии водным раствором аммиака при $30 - 40^\circ\text{C}$, отделение CO_2 ;
- 5) ректификация аммиачной воды с получением чистого NH_3 и возвратом H_2O в систему парогенерации;
- 6) подпитка цикла деионизованной водой и товарной мочевиной для компенсации потерь;
- 7) электролитическое получение H_2 из обессоленного конденсата пара, компримирование и аккумулярование водорода. Аммиачный контур — замкнутый с рециркуляцией NH_3 -раствора и периодическим отводом балластного CO_2 . Образующийся «зеленый» H_2 используется в качестве восстановителя для конверсии избыточного CO_2 в метан по реакции Сабатье: $\text{CO}_2 + 4H_2 = \text{CH}_4 + 2H_2O$ (Ni-Cat, $200 - 400^\circ\text{C}$). Полученный метан направляется на сжигание в ГТУ и ДГ, замещая до $2 - 3\%$ топливного газа. Интегральный η энерготехнологической схемы КАУ-ГТУ достигает $56,1\%$ при работе на номинальной нагрузке $22,5 \text{ МВт}$ и температуре наружного воздуха 15°C . Удельный расход условного топлива $152 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$, в том числе NH_3 $134 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$. Средний уровень эмиссии NO_x при сжигании безводного аммиака не превышает 1 ppm (в пересчете на NO_2), удельные выбросы CO_2 в атмосферу — $140 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ или $2,8 \text{ г/т} \cdot \text{км}$ (в 4 раза ниже, чем у мазутных СЭУ). За счет компактности основного оборудования и блочно-модульного исполнения КАУ прогнозная удельная масса установки составляет $4,8 \text{ кг/кВт}$, объем МКО — 600 м^3 ($25 \times 12 \times 10 \text{ м}$).

Вариант 5. КСЭУ максимальной мощности 34 МВт , реализующая преимущества когенерационного парогазового цикла (ПГУ) в сочетании с ГТУ-ОЦР надстройкой и приводом 4 азиподов (см. рис. 9).

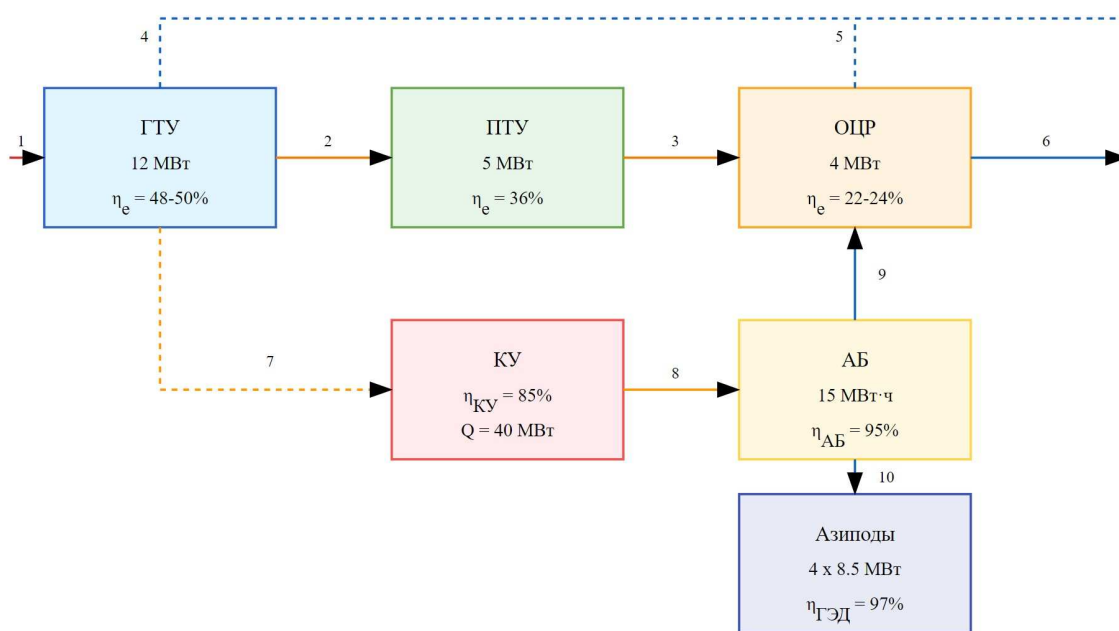


Рис. 9. Принципиальная схема КСЭУ, вариант 5:

- 1 — подача топлива; 2 — подача пара (ГТУ-ПТУ); 3 — подача пара (ПТУ-ОЦР); 4 — охлаждение ГТУ; 5 — охлаждение ОЦР;
 6 — электроэнергия (выход); 7 — выпуск отработавших газов; 8 — утилизация тепла; 9 — электроэнергия (АБ-ОЦР);
 10 — электроэнергия (АБ-Азиподы)

Основу установки составляют два ГТД по 12 МВт, работающие параллельно с отпуском теплоты в двухконтурную систему утилизации с промперегревом водяного пара (5 МВт) и органического теплоносителя (4 МВт). ГТУ простого открытого цикла с регенерацией теплоты и охлаждаемой турбиной. Номинальные параметры: $P_k=30$; $T_r=1400$ °С; $G_b=48$ кг/с. Воздухоподогреватель — двухступенчатый трубчатый с противотоком.

Эффективность регенерации 0,8 — 0,85 позволяет снизить подводимую теплоту на 10 — 12 % и довести температуру воздуха перед КС до 650 °С. Турбина 4-ступенчатая осевая с частотой вращения ротора 6500 об/мин. Охлаждаемые узлы — С1, С2 (лопатки, бандажи, диски). Схема охлаждения комбинированная — конвективно-плёночная с разделительным дефлектором и многорядной перфорацией. Суммарный расход воздуха на охлаждение 12 — 15 % от G_k . Материалы горячей части ГТ: лопатки и бандажи С1 — керамоматричный композит SiC/SiC; лопатки С2 — монокристаллы ВКНА-4У; диски и силовые элементы турбин — гранулируемые сплавы ЭП741НП, ВЖ159. Керамические элементы статора КС (жаровая труба, смесители, форсунки) — композит Cf/SiC. Применение тугоплавких керамик позволило форсировать начальные параметры ГТУ ($T_r=1450$ °С, $P_k=35$, $\pi_r=5,6$) и повысить η_e до 48 — 50 % без интенсификации системы охлаждения. КС малоэмиссионного типа LPP с многоступенчатой подачей топлива и управляемой закруткой потока. Организация горения бедных предварительно перемешанных ТВС ($\alpha=1,8$ — 2,2) обеспечивает выравнивание температурного поля в зоне горения ($T_{\text{факела}}=1600$ — 1700 К) и снижение эмиссии NO_x до 10 ppm без впрыска воды или пара. Интегрированная в корпус турбины камера дожигания — каталитическая с платино-палладиевым покрытием, обеспечивающая полное окисление СО и СН при $\alpha > 2$. Редуктор приводов ГЭД и ОЦР — планетарный 3-ступенчатый, общий для всех потребителей. Материал зубчатых колес — азотированная цементуемая сталь 20Х2Н4А, срок службы при нагрузке 100 % — 40 000 ч. Электрогенератор — синхронный 2-полюсный с электромагнитным возбуждением и воздушным охлаждением. Питание системы возбуждения — выпрямительная установка с регулированием по $\cos \varphi$ (0,85 — 1,0). Активная мощность генератора 12,5 МВт при $\cos \varphi=0,85$, напряжение 10,5 кВ. Суммарный η генератора с возбуждением — 98,5 %. Паровая турбина — двухцилиндровый агрегат с противодавлением. Начальные параметры пара: $P_o=12$ МПа, $t_o=585$ °С; давление промежуточного перегрева 2,8 МПа, $t_{\text{пп}}=540$ °С. На теплофикационном режиме (отбор пара 110 т/ч) мощность ПТУ 5 МВт, η_e — 36 %.

Конструктивное исполнение проточной части — дисковое, с облегченными лопатками. Валопровод и диски ротора — титановые сплавы системы Ti-6-4. Конденсационная установка отсутствует, весь отработавший пар направляется на теплоснабжение судовых потребителей через редукционно-охладительную установку (РОУ). Органический контур надстройки работает по циклу ОРЦ (ORC — Organic Rankine Cycle) на пентане, относящемся к классу «сухих» низкокипящих рабочих тел (НКРТ). Преимуществами пентанового цикла являются высокая удельная работоспособность в зоне умеренных температур (150 — 250 °С), минимальное давление конденсации (0,1 — 0,2 МПа), экологическая безопасность и доступность НКРТ. Испарение пентана осуществляется за счет утилизации тепла отработавшего водяного пара (130 — 150 °С) в кожухотрубном испарителе. Перегретый до 300 °С пар пентана поступает в турбину, где совершает работу расширения с коэффициентом 14 — 16. Турбина радиальная одноступенчатая с частотой вращения ротора 28 000 об/мин.

Материал рабочего колеса и корпуса — кованный титановый сплав ВТ3-1. ОГ после турбины охлаждаются в рекуператоре ($T=90$ — 130 °С) и конденсируются в КНД смешивающего типа, обеспечивая глубину утилизации теплоты (70 — 80 %). Конденсат пентана возвращается в контур через систему регенеративных ПНД. Расчетная мощность пентанового контура 4 МВт при расходе РТ 20 кг/с и давлении 3,5 МПа. η ОРЦ 22 — 24 % позволяет дополнительно утилизировать до 35 % теплоты отработавшего пара ПТУ. Блочная компоновка ОЦР установки предполагает размещение основного оборудования в специальном контейнере на палубе. Таким образом, при параллельной работе ПГУ и ГТУ-ОРЦ в номинальном режиме ($N_s=34$ МВт, $G_r=98$ кг/с, $t_{\text{нв}}=15$ °С, $\alpha=2,1$) ожидаемые показатели энергоэффективности составят: $\eta_{\text{КСЭУ}}$ — 62,4 %, удельный расход условного топлива 48,7 г/кВт·ч. Выбросы CO_2 при сжигании альтернативных газовых топлив (метанол, биогаз) — 95 г/кВт·ч или 2,2 г CO_2 /т-км, что соответствует целевым уровням ИМО-2050 по декарбонизации судоходства. Удельная эмиссия NO_x в цикле Е2/Е3 не превысит 2 г/кВт·ч при норме 3,4 г/кВт·ч для судов постройки после 2016 г. Инновационные технологии в составе интеллектуальной СЭУ.

4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ В СОСТАВЕ КСЭУ

Важным трендом развития судовых энергокомплексов нового поколения является их насыщение интеллектуальными системами адаптивного управления, обеспечивающими оптимизацию нагрузки оборудования и минимизацию затрат топлива в различных режимах эксплуатации. Внедрение технологий «умного судна» и облачной архитектуры систем автоматизации открывает качественно новые перспективы для повышения энергоэффективности флота. В составе рассмотренных вариантов КСЭУ предполагается использование следующих прорывных интеллектуальных технологий и систем.

I. Динамическое позиционирование (ДП) с прогнозированием внешних возмущений на базе ансамблевых алгоритмов машинного обучения (нейронные сети, деревья решений, опорные векторы). Формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы и движители осуществляется с упреждением 15 — 20 с на основе данных от бортовых измерительных средств (тензометрия корпуса, инерциальная навигация, оптические датчики) и внешнего метеомониторинга.

При этом минимизируется целевая функция $Q(x)$ расхода топлива СЭУ при ограничениях в форме равенств и неравенств на курс, положение и скорость судна:

$$Q(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum G_{\text{тг}}(x_i) \rightarrow \min [\varphi_3] \geq \varphi(x) \geq [\varphi_3]; [\lambda_3] \geq \lambda(x) \geq [\lambda_3] \\ [V] \geq V(x) \geq [V], \quad (1)$$

где x_i — нагрузка i -го ДГ;
 $[\varphi_3], [\lambda_3]$ — заданный сектор курсовых и географических координат;
 $[V]$ — диапазон рабочих скоростей в режиме ДП (0,5 — 5 уз);
 $G_{\text{тг}}$ — секундный расход топлива i -го ДГ.

Для обеспечения функции самообучения моделей каскада и определения весовых коэффициентов ансамбля регрессоров используются алгоритмы обучения с подкреплением (reinforcement learning). При этом осуществляется непрерывная адаптация параметров моделей по результатам имитационных прогонов на моделирующем стенде с визуализацией динамики позиционирования в 3D.

II. Оптимальное оперативное планирование рейса и система поддержки принятия решений при маршрутизации судна (СППР) на основе модифицированных алгоритмов роевого интеллекта (муравьиная колония, серые волки). В процессе построения маршрута движения обеспечивается минимизация суммарных затрат энергоресурсов при выполнении рейсового задания:

$$D(s) = \int (x, t) \rho(x, t) dt \rightarrow \min \\ M(s) = T_1 \sum w_i q_i \rightarrow \max, \quad (2)$$

где D, M — целевые функции энергозатрат на движение и коммерческой эффективности рейса;
 $\rho(x, t)$ — интенсивность расхода i -го энергоресурса (топливо, электроэнергия) в точке x маршрута на интервале t ;
 q_i — количество i -го груза (TEU, тонн); T_1 — продолжительность кругового рейса; w_i — договорная ставка на i -й груз.

В качестве базовой модели для оперативной оптимизации судовых энергопотоков используется модифицированный оптико-механический алгоритм, имитирующий поведение стаи серых волков (Grey Wolf Optimizer). При этом роль доминантных особей играют варианты маршрута с лучшими значениями фитнес-функции. Каждая особь на текущей итерации уточняет свое положение, приближаясь к α , β и δ доминантам пропорционально расстоянию до них с некоторым случайным коэффициентом:

$$x_1(k+1) = x_1(k) - a|c \cdot x_\alpha - x_1(k)| \\ x_2(k+1) = x_2(k) - a|c \cdot x_\beta - x_2(k)| \\ x_3(k+1) = x_3(k) - a|c \cdot x_\delta - x_3(k)| \\ x(k+1) = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \quad (3)$$

где: k — номер итерации;
 a, c — коэффициенты;
 x_1, x_2, x_3 — позиции доминантов;
 $x_\alpha, x_\beta, x_\delta$ — лучшие из известных позиций стаи.

Для обеспечения сходимости и интенсификации поиска в окрестности оптимума коэффициенты модели адаптируются с помощью нелинейных функций $a(k)$, $c(k)$. За критерий останова принимается инвариантность лучших маршрутов на протяжении 50 — 100 итераций. Таким образом обеспечивается нахождение близких к оптимальным маршрутов рейса за приемлемое процессорное время (3 — 5 мин на ПК средней мощности).

III. Интеллектуальная система технического менеджмента (ИСТМ) оборудования СЭУ, реализующая функции динамической диагностики, прогнозирования ресурса и автоматизированного планирования ТОиР. Архитектура ИСТМ — многоагентная сервис-ориентированная на базе промежуточного ПО (middleware). Каждому контролируемому механизму ставится в соответствие программный агент, инкапсулирующий алгоритмы машинного обучения. В роли агентов первого уровня выступают цифровые двойники оборудования, обучающиеся на данных встроенных систем объективного контроля (СОК) и мониторинга. Координацию межагентных взаимодействий, маршрутизацию запросов и трансляцию протоколов осуществляет управляющий сервер приложений (Application Server) с микроядерной архитектурой. Алгоритмическое ядро модуля прогнозирования ресурса — ансамбль гибридных моделей машинного обучения, реализующих стратегию «разложения по базису» (stacking generalization).

Обобщение прогнозов базовых прогнозирующих моделей выполняется метамоделью второго уровня, идентифицируемой методом градиентного бустинга (XGBoost). На нижнем уровне иерархии прогнозирующих моделей используются: 1) полносвязные НС прямого распространения (MLP) для аппроксимации зависимостей износа от наработки и нагрузки; 2) одномерные сверточные НС (CNN-1D) для выделения диагностических признаков из потоков «сырых» данных СОК; 3) рекуррентные НС (LSTM) для прогнозирования остаточного ресурса по результатам анализа трендов износа и деградации; 4) случайные леса (Random Forest) для ранжирования диагностических состояний и поиска аномалий в работе; 5) метод опорных векторов (SVM) для регрессионного анализа и определения границ между диагностическими классами.

Базовые модели обучаются независимо на своих подвыборках с оптимизацией гиперпараметров (структура НН, ширина окна свертки, шаг дискретизации, количество деревьев). Агрегирование прогнозов базовых моделей метамоделью второго уровня (XGBoost) обеспечивает повышение точности локализации дефектов и прогнозирования ресурса на 10 — 15 % относительно лучшей из «одиночных» моделей. Особое внимание уделяется разработке Базы Знаний (БЗ) по отказам и предельным состояниям оборудования в формате эталонных диагностических образов. Для пополнения БЗ применяются технологии обработки и понимания данных на основе глубоких генеративно-сопоставительных сетей (GAN), позволяющие имитировать недостающие прецеденты по распознанным шаблонам диагностических состояний. Формирование рекомендаций по оптимальному моменту вывода оборудования в ремонт осуществляется средствами мультиагентной СППР дискретно-событийного типа. Агенты-механизмы, координируя индивидуальные расписания ТОиР, формируют оптимальный по критерию минимизации затрат план вывода ТПА в целом:

$$\sum C_{in}(t_{irep}) \rightarrow \min \quad (4)$$

$$t_{irep} \leq t_{imax}; i = 1, \dots, n,$$

где C_{in} — стоимость ТОиР i -го агрегата в момент t_{irep} ;
 t_{imax} — предельный срок межремонтной наработки;
 n — число агрегатов ТПА.

Разрешение конфликтов между агентами за общие ресурсы обслуживания (ЗИП, персонал, доковые мощности) обеспечивается с помощью протоколов аукционов и согласованных взаимных уступок (кооперативное распределение). Апробация ИСТМ на тестовых сценариях эксплуатации показала снижение затрат на ТОиР на 10 — 15 % при уменьшении трудоемкости планирования в 3 — 5 раз.

IV. Интеллектуальная цифровая система управления посадкой и мореходностью судна. Основные функции системы — динамическое поддержание оптимальной посадки на тихой воде и минимизация качки на волнении путем автоматического управления балластировкой. Алгоритм оптимизации параметров качки базируется на серии полунатурных испытаний самоходной модели с бортовой качкой и использует аналитические модели 2-го порядка, калиброванные по результатам вычислительного (CFD) и физического эксперимента. В качестве критерия используется модифицированный индекс морской болезни (MSI):

$$MSI = 100K[f=0,1)0,0083W(f)fG(x,y,z,t,f)df [\%], \quad (5)$$

где K — коэффициент, зависящий от формы корпуса;
 $W(f)$ — весовая функция частоты f качки;
 G — спектральная плотность вертикального ускорения в заданной точке (x,y,z) .

Ограничения в задаче оптимизации параметров качки формулируются в виде требований к метацентрической высоте, параметрической остойчивости и минимальной площади под кривой восстанавливающего момента. Управление балластировкой в режиме стабилизации качки осуществляется с помощью нечеткого регулятора. Функция принадлежности выходов регулятора — треугольная с четырьмя термами. Входы регулятора — бортовой угол крена, угловая скорость качки и относительное ускорение качки. База правил включает 27 продукций типа: ЕСЛИ «Крен большой И Скорость отрицательная И Ускорение малое», ТО «Открыть клапаны на левый борт». Моделирование 6-балльного шторма (волна $h_3 \text{ \%} = 5 \text{ м}$, $T = 9 \text{ с}$) показало снижение индекса MSI на 25 — 30 % и уменьшение амплитуды качки на 40 % при расходе балласта до $700 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом обеспечивается безопасная работа экипажа на ходовом мостике и расширяется диапазон допустимых погодных условий для грузовых операций.

V. Система удаленного мониторинга и прогностического управления техническим состоянием (СУТС) КСЭУ, объединяющая возможности традиционных CBM (Condition-Based Maintenance) систем с предиктивной аналитикой больших данных на базе нейросетевого моделирования. Информационное ядро СУТС — хранилище структурированных и слабоструктурированных данных (Информационная шина, ИШ) большой емкости (5 — 10 Тбайт). Первичные потоки диагностической информации собираются от встроенных средств объективного контроля (СОК) с беспроводным интерфейсом (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee): 1) фрагменты «сырых» данных, циклограммы температур, давлений, вибраций, шумов на квазистационарных и динамических режимах; 2) результаты предварительной обработки данных методами машинного обучения (частотно-временной анализ, факторный анализ, низкоразмерная аппроксимация сигналов). На верхнем уровне контроля состояния используются виртуальные анализаторы трендов деградации и виброакустические образы дефектов оборудования, формируемые с помощью технологий машинного обучения, цифровых двойников и моделей цифрового рельефа. Усредненная статистика трендов (по группам судов, однотипным механизмам) накапливается в облачном репозитории и используется для переобучения прогностических моделей и извлечения новых диагностических знаний.

Диспетчерское управление состоянием реализуется с помощью правил нечеткого вывода и концептуально-ориентированных языков (Domain Specific Language), оперирующих специализированными объектами и отношениями предметной области. Пример диагностического правила: ЕСЛИ «Температура_подшипника (i) > Норма И Момент_нагрузки < 0,5 Мном», ТО «Дисбаланс_ротора (i) = Средний». Таким образом обеспечивается прослеживаемый логический вывод с обоснованием диагноза и рекомендациями по ТО. Агрегирование разнородных нечетких оценок состояния в комплексный показатель риска отказа выполняется на основе OWA (Ordered Weighted Averaging) оператора Ягера:

$$Q = W_1 b_1 + W_2 b_2 + \dots + W_n b_n, \quad (6)$$

$$0 \leq b_i \leq 1; \sum W_i = 1; i = 1, \dots, n,$$

где b_i — нечеткие значения частных показателей состояния (температур, давлений, вибропараметров), упорядоченные по степени риска;
 W_i — весовые коэффициенты, настраиваемые методом экспертных оценок.

Результаты работы СУТС — рекомендации по датам и объемам опережающего ТОиР оборудования, отображаемые на НМИ удаленного диспетчерского пульта. Использование предлагаемой системы позволяет минимизировать внеплановые простои СЭУ и затраты на ремонт при обеспечении требуемого уровня надежности, экологичности и эффективности.

5. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ КСЭУ

Для количественной оценки преимуществ КСЭУ с оптимальной интеграцией технологий газотурбостроения, паротурбинных и электрохимических генераторов, ВИЭ и интеллектуальных систем управления разработана высокоуровневая матмодель энергетической установки нефтеналивного судна смешанного плавания типа «Афрамекс» дедвейтом 115 000 т. Постановка задачи оптимизации параметров КСЭУ сформулирована следующим образом: найти вектор проектных характеристик:

$$X = [N_{ГТУ}, P_K, T_{гв}, n_{ГТУ}, S_{фэ}, N_{виз}, N_{акб}, Q_{хтн}, \dots]T,$$

обеспечивающий: 1) максимум КПД энергоустановки $\eta \Sigma(X) \rightarrow \max$; 2) минимум суточного расхода топлива $Вт(X) \rightarrow \min$; 3) минимум выбросов $CO_2(X) \rightarrow \min$; 4) минимум стоимости жизненного цикла $СЖЦТ(X) \rightarrow \min$. При ограничениях: а) на размеры МКО: $G_{МКО}(X) \leq 0$; б) на характеристики ГД и ДГ: $G_{ГДУ}(X) \leq 0$; в) на количество и мощность ГЭД: $G_{ГЭД}(X) \leq 0$; г) на прочность связей и опор: $F_{ГП}(X) \leq 0$; д) на местную и общую вибрацию: $FВ(X) \leq 0$; е) на остойчивость судна: $K_{ост} \geq [K_{ост}]$; ж) на надежность ЭУ: $P_{бр}([t]) \geq [P_{бр}]$, — где X — вектор оптимизируемых переменных; $N_{ГТУ}$, $N_{ПТУ}$ — номинальная мощность ГТУ и ПТУ, МВт; $n_{ГТУ}$ — количество ГТУ, ед.; P_K — степень повышения давления в компрессоре ГТУ; $T_{гв}$ — температура газов перед турбиной ГТУ, К; $S_{фэ}$ — площадь ФЭП, м²; $N_{виз}$ — суммарная пиковая мощность ВЭУ и СЭУ, кВт; $N_{акб}$ — энергоемкость АКБ, МВт·ч; $Q_{хтн}$ — массовый расход хладагента в системе ХТН, кг/с.

Модель реализована в среде MATLAB/Simulink на основе иерархического принципа. Подмодели основных подсистем (ГТУ, ПТУ, ДГ, ГЭУ, ТЭГ, ФЭП, ВЭУ) представлены в форме гибридных функциональных блоков S-Function, интегрирующих физико-математическое описание установившихся и переходных режимов. Для обеспечения достоверности результатов моделирования произведена параметрическая идентификация и валидация подмоделей на основе экспериментальных данных по прототипу — танкеру «Афрамекс» «Проспект Гагарина». Результаты верификационных расчетов в сопоставлении с данными натурных испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

Верификация модели ГТУ-ЭУ танкера «Проспект Гагарина»

Характеристика	Размерность	Номинал	Модель	Δ , %
Мощность на валопроводе, P_B	кВт	11 880	11 205	–5,7
Частота вращения ВРШ, $n_{ВРШ}$	об/мин	127	132	+3,9
Температура ОГ за ГТУ, $t_{ог}$	°С	500	515	+3,0
Расход воздуха ГТУ, G_B	кг/с	35,2	34,4	–2,3
Расход жидкого топлива, Вт	кг/ч	2500	2600	+4,0
Суммарная эл. мощность ГЭД, $P_{ГЭД}$	кВт	12 500	12 300	–1,6
КПД валопровода, $\eta_{вп}$	—	0,932	0,938	+0,6
КПД ГТУ, $\eta_{ГТУ}$	—	0,362	0,342	–5,5

Как следует из табл. 5, разработанная модель ГТУ-ЭУ обеспечивает удовлетворительное совпадение с результатами испытаний — погрешность по ключевым параметрам не превышает 3 — 5 %. Апробация модели на режимах частичных нагрузок также показала хорошую сходимость — отклонение от экспериментальных зависимостей в диапазоне 50 — 110 % номинала не превысило 2,5 — 3 %. С использованием верифицированной модели выполнена серия оптимизационных расчетов, направленная на поиск рационального сочетания параметров КСЭУ по критериям эффективности, экологичности и стоимости владения. Для решения задачи условной многокритериальной оптимизации применен генетический алгоритм с изменением интенсивности мутаций в функции поколений (Fitness Scaling Adaptive GA). В качестве управляемых параметров использовались: 1) тип, мощность и количество ГТД и ПТУ; 2) характеристики системы охлаждения ГТУ (расход и температура воздуха на входе в компрессор); 3) площадь и η_e фотоэлектрических преобразователей (ФЭП); 4) энергоемкость аккумуляторных батарей (АКБ); 5) мощность гребных электродвигателей (ГЭД); 6) расход органического теплоносителя в системе утилизации. Параметры электростанции были оптимизированы применительно к трем базовым сценариям эксплуатации: 1) работа по расписанию (линейное судно); 2) шаттл-сервис (танкер-накопитель); 3) продленный рейс (круговой маршрут). Усредненные значения основных показателей оптимизированной КСЭУ на базе 5-го концептуального варианта в сравнении с характеристиками СЭУ современных танкеров приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные показатели КСЭУ (профиль эксплуатации № 2 — шаттл-сервис)

Показатель	Размерность	Базовая СЭУ	КСЭУ вар. 5	Δ , %
Суммарная эл. мощность ГТУ	МВт	19,6	24,0	+ 22
Мощность ПТУ	МВт	2,4	5,0	+ 108
Мощность ОЦР утилизации	МВт	—	4,0	> 200
Суммарная мощность ВИЭ	кВт	—	500	> 200
Емкость накопителя (АКБ)	МВт·ч	—	6	> 200
КПД КСЭУ, $\eta_{КСЭУ}$	%	52	62,4	+ 20
Удельный расход топлива	г/кВт·ч	165	150	— 9
Выбросы CO_2	г/т·милля	4,2	2,2	— 48
Выбросы NO_x	г/кВт·ч	2,2	0,8	— 64
Стоимость жизненного цикла	млн. \$	181	193	+ 7

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Применение инновационных газотурбинных и электрохимических технологий в составе КСЭУ мегаваттного класса обеспечивает кардинальное повышение топливной эффективности (на 20 % и более) и экологичности (сокращение выбросов CO_2 до 50 %, NO_x до 70 %) при приемлемом росте капитальных затрат.

Ключевыми факторами энергоэффективности являются форсирование параметров термодинамического цикла ГТУ, глубокая утилизация вторичных энергоресурсов (до 50 % теплоты ОГ), электрификация судовых потребителей, применение ВИЭ и систем аккумулирования.

Наиболее перспективным представляется вариант гибридной КСЭУ на базе ГТУ/ПТУ комбинированного цикла с регенерацией теплоты, парогазовой надстройкой и параллельной утилизационной ОЦР-турбиной, обеспечивающий достижение η_e 60 % + в широком диапазоне нагрузок.

Внедрение интеллектуальных систем автономной навигации, динамического позиционирования и адаптивного управления СЭУ позволяет дополнительно сократить удельный расход топлива на 3 — 5 % и повысить коэффициент готовности механизмов до 0,97 — 0,98.

При благоприятной рыночной конъюнктуре дисконтированный срок окупаемости проектов строительства судов с КСЭУ нового поколения составит 7 — 8 лет при внутренней норме рентабельности инвестиций IRR на уровне 12 — 14 %.

ВЫВОДЫ

Выполненные расчетные исследования подтверждают перспективность применения инновационных газотурбинных технологий 5-го поколения в составе КСЭУ судов класса «Афрамекс» (см. рис. 10).

МАТЕРИАЛЫ

Монокристаллические сплавы (T_r до 1400°C)	Керамические композиты SiC/SiC (T_r до 1600°C)	Гибридные материалы (T_r > 1700°C)
--	--	--

КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Малозмиссионные КС (NO_x < 50 ppm)	Каталитические КС (NO_x < 10 ppm)	Гибридные КС с H_2 (NO_x < 5 ppm)
--	---	---

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Предиктивная аналитика (η_e = 45%)	AI-оптимизация режимов (η_e = 55%)	Полностью автономное управление (η_e > 60%)
---	---	--

ЦЕЛЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ 2050: η_e > 60%, NO_x < 5 ppm, ресурс > 50 тыс. ч, CAPEX < 1000 \$/кВт

2024

2030

2040

2045

2050

Рис. 10. Дорожная карта развития ГТУ до 2050 г.

Использование высокотемпературных ГТУ и ГТД на керамических композитах и монокристаллических сплавах с начальной температурой 1400 — 1600 °С открывает качественно новые возможности повышения эффективности термодинамического цикла за счет регенерации теплоты, промежуточного охлаждения, парогазовых и органических надстроек. Интеллектуализация систем автоматического управления, мониторинга технического состояния и поддержки принятия решений обеспечивает оптимизацию режимов и маршрутизацию энергопотоков КСЭУ в зависимости от профиля эксплуатации и внешних условий.

Результаты многокритериальной оптимизации параметров перспективных КСЭУ свидетельствуют о возможности достижения рекордных значений топливной эффективности (η_e 60 — 62 %) при кратном снижении вредных выбросов и углеродного следа каботажных перевозок. Ключевыми научно-техническими проблемами создания интеллектуальных КСЭУ являются: 1) обеспечение прочности и ресурса узлов горячего тракта ГТД; 2) повышение эффективности ЭХГ, ВИЭ и систем хранения энергии; 3) разработка методологии управления безэкипажным судном.

Для обеспечения технологического лидерства и конкурентоспособности отечественного судостроения на глобальном рынке необходим комплекс мер государственной поддержки и стимулирования инновационной активности предприятий отрасли, включая:

- разработку и реализацию целевых научно-технических программ по созданию судовых ГТУ и ГТД нового поколения на основе инновационных технологий в области высокотемпературного материаловедения, конструкционной прочности, горения и теплообмена. Приоритетными направлениями исследований должны стать керамические и металлокерамические композиты для узлов горячего тракта, аддитивные методы производства лопаток и дисков турбин, технологии каталитически стабилизированного горения, малоэмиссионные камеры сгорания, высокоэффективные регенераторы и воздухоподогреватели;

- интенсификацию фундаментальных и прикладных исследований по ключевым компонентам автономных судовых энергокомплексов — твердооксидным и расплавкарбонатным топливным элементам, электрохимическим накопителям большой емкости, фотоэлектрическим преобразователям концентраторного типа, ветроэнергетическим установкам с вертикальной осью вращения. Особое внимание следует уделить повышению удельных характеристик, снижению стоимости и увеличению ресурса функциональных материалов и компонентов — электролитов, электродов, мембран, фотоэлементов, редокс-аккумуляторов;

- разработку методологии системной интеграции и оптимального управления гетерогенными энергокомплексами судов нового поколения на основе мультифизического моделирования, предиктивной аналитики данных, мультиагентных архитектур и адаптивных систем поддержки принятия решений. Ключевые задачи — построение цифровых двойников пропульсивного комплекса и судна в целом, интеллектуализация систем автономной навигации, динамического позиционирования и мониторинга технического состояния, создание бортовых информационно-управляющих комплексов на принципах сервис-ориентированной архитектуры;

- формирование системы опережающей подготовки и непрерывного повышения квалификации кадров для судостроительной промышленности в области газотурбостроения, электрохимической энергетики, силовой электроники, программируемой логики, технологий машинного обучения и предиктивной аналитики. Совершенствование учебно-лабораторной и стендовой базы профильных вузов и научных центров, интенсификация программ академической мобильности, расширение партнерских связей между университетами, КБ и НИ-И, судостроительными и машиностроительными предприятиями;

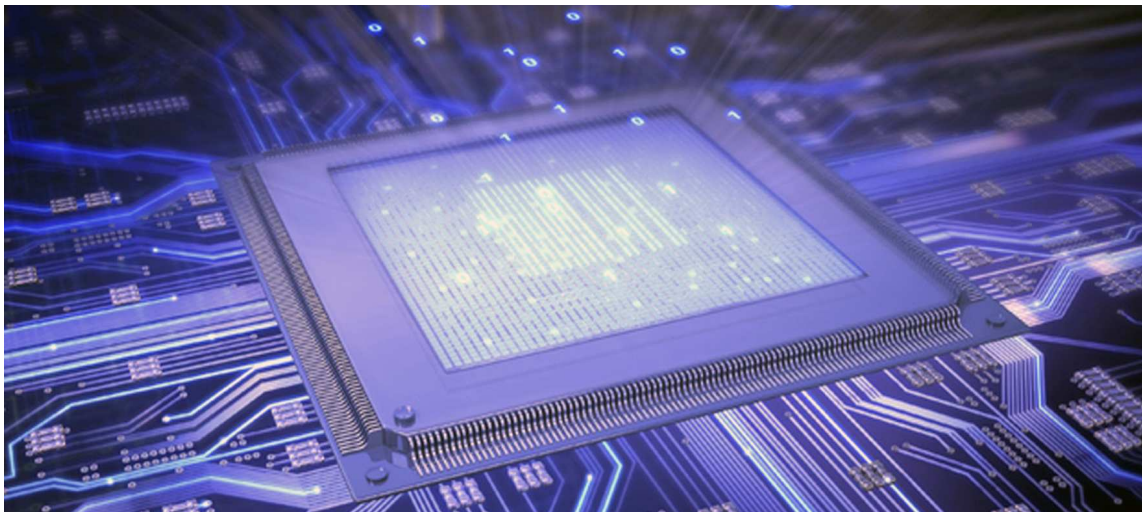
- совершенствование нормативно-правовой базы и регуляторной среды в части стимулирования перехода судоходных компаний на использование экологичных видов топлива и энергосберегающих технологий. Внедрение системы квотирования и торговли выбросами парниковых газов, дифференцированных портовых сборов и налоговых льгот для судовладельцев, эксплуатирующих суда с высоким уровнем энергоэффективности и низким углеродным следом. Гармонизация национальных стандартов и правил с перспективными требованиями ИМО в области энергоэффективности, экологичности и безопасности судоходства.

Реализация предложенного комплекса мер позволит создать благоприятные условия для опережающего инновационного развития отечественного судостроения, обеспечить технологическое лидерство на мировом рынке морских перевозок и внести существенный вклад в достижение целей устойчивого развития и декарбонизации судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

1. Третье исследование ИМО о выбросах парниковых газов. — 2014.
2. Первоначальная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов. МЕРС 72/17/Add.1, Приложение 11. — 2018.
3. Пересмотренная стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов с судов. МЕРС 80/15/Add.1. — 2023.
4. DNV GL. Energy Transition Outlook 2020: Maritime Forecast to 2050. — 2020.
5. Welaya Y.M.A. A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation / Y.M.A. Welaya, M.M. El Gohary, N.R. Ammar // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2011. — Т. 3. — № 2. — P. 141 — 149.
6. Baldi F. et al. Improving ship energy efficiency through a systems perspective: PhD thesis / F. Baldi; Chalmers Tekniska Högskola. — Göteborg, 2013. — 135 p.
7. ABS. Setting the Course to Low Carbon Shipping. Outlook 2030. — 2019.
8. LR. Techno-Economic Assessment of Zero-Carbon Fuels. — 2020.
9. GE Power Conversion. Marine Electric Propulsion Systems. — 2019.
10. Le-ol A.K. Integrated stochastic approach for instantaneous energy performance analysis of thermal energy systems / A.K. Le-ol, S. Adumene, D.S. Aziaka, M. Yazdi, J. Mohammadpour // *Energies*. — 2025. — Vol. 18(1). — P. 160.
11. Kyriakidis F. Modeling and optimization of integrated exhaust gas recirculation and multi-stage waste heat recovery in marine engines / F. Kyriakidis, K. Sørensen, S. Singh, T. Condra // *Energy Conversion and Management*. — 2017. — Vol. 151. — P. 286 — 295.
12. Altosole M. Simulation and performance comparison between diesel and natural gas engines for marine applications / M. Altosole, G. Benvenuto, U. Campora, M. Laviola et al. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. — 2017. — Vol. 231(2). — P. 690 — 704.
13. Saha A.K. Blade tip leakage flow and heat transfer with pressure-side winglet / A.K. Saha, S. Acharya, R. Bunker, C. Prakash // *International Journal of Rotating Machinery*. — 2006(3). — 17079.
14. Horlock J.H. Limitations on gas turbine performance imposed by large turbine cooling flows / J.H. Horlock, D.T. Watson, T.V. Jones // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. — 2001. — Vol. 123(3). — P. 487 — 494.
15. Lefebvre A. Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions. 3rd ed. / A. Lefebvre, D.R. Ballal. — CRC Press, 2010. — 537 p.
16. Liu Y. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines / Y. Liu, X. Sun, V. Sethi, D. Nalianda et al. // *Progress in Aerospace Sciences*. — 2017. — Vol. 94. — P. 12 — 45.
17. Ulfesnes R.E. Modelling and simulation of transient performance of the semi-closed O₂/CO₂ gas turbine cycle for CO₂-capture / R.E. Ulfesnes, O. Bolland, K. Jordal // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. — 2003. — T. 3686. — P. 65 — 74.
18. Altosole M. High efficiency waste heat recovery solutions for naval applications / M. Altosole, U. Campora, M. Laviola, R. Zaccone // *Proceedings of 19th International Conference on Ship & Maritime Research. NAV 2018*. — 2018.
19. Haglind F. A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part I: Background and design / F. Haglind // *Energy Conversion and Management*. — 2008. — Vol. 49(12). — P. 3458 — 3467.
20. Haglind F. A review on the use of gas and steam turbine combined cycles as prime movers for large ships. Part II: Previous work and implications / F. Haglind // *Energy Conversion and Management*. — 2008. — Vol. 49(12). — P. 3468 — 3475.
21. Mondejar M.E. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications / M.E. Mondejar, J.G. Andreasen, L. Pierobon, U. Larsen et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2018. — Vol. 91. — P. 126 — 151.
22. Larsen U. Design and optimisation of organic Rankine cycles for waste heat recovery in marine applications using the principles of natural selection / U. Larsen, L. Pierobon, F. Haglind, C. Gabriellii // *Energy*. — 2013. — Vol. 55. — P. 803 — 812.
23. Andreasen J.G. A comparison of organic and steam Rankine cycle power systems for waste heat recovery on large ships / J.G. Andreasen, A. Meroni, F. Haglind // *Energies*. — 2017. — Vol. 10(4). — 547.
24. Kalikatzarakis M. Multi-criteria selection and thermo-economic optimization of Organic Rankine Cycle system for a marine application / M. Kalikatzarakis, C.A. Frangopoulos // *International Journal of Thermodynamics*. — 2015. — Vol. 18(2). — P. 133 — 141.
25. Song J. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines / J. Song, Y. Li, C.W. Gu, L. Zhang // *Energy*. — 2015. — Vol. 82. — P. 976 — 985.
26. Shu G. Operational profile based thermal-economic analysis on an Organic Rankine cycle using for harvesting marine engine's exhaust waste heat / G. Shu, P. Liu, H. Tian, X. Wang et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2017. — Vol. 146. — P. 107 — 123.
27. Armellini A. Evaluation of gas turbines as alternative energy production systems for a large cruise ship to meet new maritime regulations / A. Armellini, S. Daniotti, P. Pinamonti, M. Reini // *Applied Energy*. — 2018. — Vol. 211. — P. 306 — 317.
28. Senary K. Development of a waste heat recovery system onboard LNG carrier to meet IMO regulations / K. Senary, A. Tawfik, E. Hegazy, A. Ali // *Alexandria Engineering Journal*. — 2016. — Vol. 55(3). — P. 1951 — 1960.
29. Shu G. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships / G. Shu, Y. Liang, H. Wei, H. Tian et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2013. — Vol. 19. — P. 385 — 401.
30. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 124. — P. 344 — 356.
31. Geertsma R.D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 194. — P. 30 — 54.
32. Shih N.C. Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles / N.C. Shih, B.J. Weng, J.Y. Lee, Y.C. Hsiao // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2014. — Vol. 39(25). — P. 13894 — 13901.
33. Yan Y. Multi-objective design optimization of combined cooling, heating and power system for cruise ship application / Y. Yan, H. Zhang, Y. Long, Y. Wang et al. // *Journal of Cleaner Production*. — 2019. — Vol. 233. — P. 264 — 279.
34. Baldi F. Energy and exergy analysis of ship energy systems — The case study of a chemical tanker / F. Baldi, H. Johnson, C. Gabriellii, K. Andersson // *International Journal of Thermodynamics*. — 2015. — Vol. 18(2). — P. 82 — 93.
35. Geertsma R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion / R. Geertsma, M. van der Knaap, K. Visser, R. Negenborn // *Applied Energy*. — 2018. — Vol. 228. — P. 2490 — 2509.
36. Nuchturee C. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships — A review / C. Nuchturee, T. Li, H. Xia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2020. — Vol. 134. — 110145.

37. Ancona M.A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M.A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini et al. // *Energy Conversion and Management*. — 2018. — Vol. 164. — P. 42 — 58.
38. Sorrentino V. Experimental and numerical investigation of air lubrication on a planing hull with Double Interceptor System / V. Sorrentino, R. Pigazzini, F. De Luca, S. Mancini, C. Pensa // *Ocean Engineering*. — 2025. — Vol. 319. — 120135.
39. Dimopoulos G.G. A general-purpose process modelling framework for marine energy systems / G.G. Dimopoulos, C.A. Georgopoulou, I.C. Stefanatos, N.M.P. Kakalis // *Energy Conversion and Management*. — 2014. — Vol. 86. — P. 325 — 339.
40. Ahlgren F. Waste heat recovery in a cruise vessel in the Baltic Sea by using an organic Rankine cycle: A case study / F. Ahlgren, M.E. Mondejar, M. Genrup, M. Thern // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. — 2015. — Vol. 138. — 011702.
41. Fisher R. Innovative waste heat valorisation technologies for zero-carbon ships — A review / R. Fisher, L. Ciappi, P. Niknam, K. Braimakis et al. // *Applied Thermal Engineering*. — 2024. — Vol. 253. — 123740.
42. Singh D.V. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications / D.V. Singh, E. Pedersen // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 111. — P. 315 — 328.
43. Rohkamp M. Gaseous and particulate matter (PM) emissions from a turboshaft-engine using different blends of sustainable aviation fuel (SAF) / M. Rohkamp, A. Rabl, J. Bendl, C. Neukirchen et al. // *Aerosol Science and Technology*. — 2024. — Vol. 59(1). — P. 111 — 126.
44. van Biert L. A review of fuel cell systems for maritime applications / L. van Biert, T. Woudstra, M. Godjevac, K. Visser et al. // *Journal of Power Sources*. — 2016. — Vol. 327. — P. 345 — 364.
45. Sapra H. Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure / H. Sapra, M. Godjevac, K. Visser, D. Stapersma et al. // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 204. — P. 78 — 92.
46. Wang K. Computational fluid dynamics-based ship energy-saving technologies: A comprehensive review / K. Wang, Z. Li, R. Zhang, R. Ma et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2025. — Vol. 207. — 114896.
47. Dedes E.K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping / E.K. Dedes, D.A. Hudson, S.R. Turnock // *Energy Policy*. — 2012. — Vol. 40. — P. 204 — 218.
48. Jeong B. Evaluation of the lifecycle environmental benefits of full battery powered ships: Comparative analysis of marine diesel and electricity / B. Jeong, H. Jeon, S. Kim, J. Kim et al. // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 8(8). — 580.
49. Artificial intelligence and machine learning applications for sustainable development / ed. by A.J. Singh, N. Gupta, S. Kumar, S. Sharma et al. — CRC Press, 2025. — 276 p.
50. Roux M. A review of life cycle assessment studies of maritime fuels: Critical insights, gaps, and recommendations / M. Roux, C. Lodato, A. Laurent, T.F. Astrup // *Sustainable Production and Consumption*. — 2024. — Vol. 50. — P. 69 — 86.
51. Zhu J. High temperature ceramic matrix composites for aerospace applications / J. Zhu, L. Cheng, X. Xu // *Composites Part B: Engineering*. — 2021. — Vol. 216. — 108829.
52. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview / R. Naslain // *Composites Science and Technology*. — 2004. — Vol. 64(2). — P. 155 — 170.
53. Gibson I. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing / I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker. — New York: Springer, 2015. — 498 p.
54. Kumar M. Prospects of ceramic matrix composites in engineering and commercial applications / M. Kumar, C. Devi, M. Hemath, S. Mandol et al. // *Applications of Composite Materials in Engineering* / ed. by M. Puttegoda, T.G.Y. Gowda, J.S. Binoj, S.M. Rangappa et al. — Elsevier Science Ltd, 2025. — P. 419 — 436.
55. Pollock T.M. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties / T.M. Pollock, S. Tin // *Journal of Propulsion and Power*. — 2006. — Vol. 22(2). — P. 361 — 374.
56. Padture N.P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion / N.P. Padture // *Nature Materials*. — 2016. — Vol. 15. — P. 804 — 809.
57. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and applications / R.C. Reed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2006. — 372 p.
58. Yeh J.W. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan et al. // *Advanced Engineering Materials*. — 2004. — Vol. 6(5). — P. 299 — 303.
59. Padture N.P. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications / N.P. Padture, M. Gell, E.H. Jordan // *Science*. — 2002. — Vol. 296(5566). — P. 280 — 284.
60. Kablov E.N. Cast intermetallic alloys for gas turbine engines / E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, N.V. Petrushin // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2017. — Vol. 8. — P. 844 — 856.
61. Сорокин О.Ю. Высокотемпературные композиционные материалы с многослойной структурой (обзор) / О.Ю. Сорокин, Б.Ю. Кузнецов, Ю.В. Лунегова, В.С. Ерасов // *Труды ВИАМ*. — 2020. — № 4 — 5 (88). — С. 42 — 53. = Sorokin O.Yu. High-temperature composite materials with a multi-layered structure (review) / O.Yu. Sorokin, B.Yu. Kuznetsov, Yu.V. Lunegova, V.S. Erasov // *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. — 2020. — No. 4 — 5 (88). — P. 42 — 53. (In Russ.)
62. Han J.-C. Gas turbine heat transfer and cooling technology / J.-C. Han, S. Dutta, S. Ekkad. — Boca Raton: CRC Press, 2012. — 496 p.
63. Bunker R.S. Gas turbine heat transfer: Ten remaining hot gas path challenges / R.S. Bunker. — Southampton: WIT Press, 2008. — 217 p.
64. Gu D. Laser additive manufacturing of high-performance materials / D. Gu. — Berlin: Springer, 2015. — 311 p.
65. Adapa V.S.K. Insights into the gamma prime precipitation behavior during heat treatment of Additively Manufactured Nickel-based Superalloy / V.S.K. Adapa, S.R. Kalidindi, Ch.J. Saldana // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2025. — 178507.
66. Lefebvre A. Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions / A. Lefebvre, D.R. Ballal. — Boca Raton: CRC Press, 2010. — 537 p.
67. Huang Y., Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2009. — Vol. 35(4). — P. 293 — 364.
68. Lieuwen T. Combustion instabilities in gas turbine engines: Operational experience, fundamental mechanisms, and modeling / T. Lieuwen, V. Yang. — Reston: AIAA, 2005. — 657 p.
69. Law C.K. Combustion in microgravity: Opportunities, challenges and progress / C.K. Law. — AIAA Paper No. 90-0120. — 28th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1990.
70. Ghenai Ch. Combustion of syngas fuel in gas turbine can combustor // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2010. — Vol. 2010. — 342357.
71. Cheekatamarla P.K. Heterogeneous oxidation of hydrogen-natural gas blends in a safe, clean, and efficient burner design / P.K. Cheekatamarla // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2024. — Vol. 61(1). — P. 210 — 215.
72. Khandelwal B. Development of gas turbine combustor preliminary design methodologies and preliminary assessments of advanced low emission combustor concepts: PhD thesis / B. Khandelwal; Cranfield University. — 2012. — 245 p.
73. Dhamrat R.S. Numerical and experimental study of the conversion of methane to hydrogen in a porous media reactor / R.S. Dhamrat, J.L. Ellzey // *Combustion and Flame*. — 2006. — Vol. 144(4). — P. 698 — 709.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.031.2
EDN YTHXOW

АВТОНОМНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МАСШТАБИРУЕМАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ¹

А.П. Борина, инженер АО «Навигатор», 199106 Россия, Санкт-Петербург, ул. Шкиперский Проток, 14 3, корп. 19, e-mail: apborina@gmail.com

М.Н. Ещенко, канд. экон. наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: si@smtu.ru

А.А. Ухов, д-р техн. наук, доц. ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022 Россия, ул. Профессора Попова, д. 5; программист ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: aauhov@gmail.com

В данной статье описывается разработанная система обеспечения безопасности охраняемых объектов (далее — Система), позволяющая своевременно принимать меры в случаях выявления негативных факторов в системе обеспечения безопасности, вызванных неосторожностью, злоумышленными действиями или техническими неполадками. Описываются преимущества Системы, структура, назначение и принцип действия компонентов, разработанное программное обеспечение. Благодаря реализации комплексного проекта и возможности расширения Системы, включая интеграцию с аналогичными системами на рынке, организации обеспечения безопасности охраняемых объектов, в том числе морского транспорта, получают возможность применять современное оборудование, изготовленное в России.

Ключевые слова: искусственный интеллект, охраняемый объект, система обеспечения безопасности, пожарные извещатели.

Для цитирования: Борина А.П. Автономная интеллектуальная масштабируемая система обеспечения безопасности охраняемых объектов / А.П. Борина, М.Н. Ещенко, А.А. Ухов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 150 — 155. — EDN YTHXOW.

¹ Работа выполнена в СПбГМТУ в ходе реализации комплексного проекта по созданию импортозамещающего высокотехнологичного производства компонентов и автономных интеллектуальных масштабируемых систем обеспечения безопасности охраняемых объектов в рамках постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218, договор с Минобрнауки России № 075-11-2022-028 от 08.04.2022.

The work was carried out at St. Petersburg State Marine Technical University during the implementation of a comprehensive project to create import-substituting high-tech production of components and autonomous intelligent scalable security systems for protected objects within the framework of Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 No. 218, agreement with the Ministry of Education and Science of Russia No. 075-11-2022-028 dated 08.04.2022.

STANDALONE INTELLIGENT SCALABLE SECURITY MANAGEMENT SYSTEM OF PROTECTED OBJECTS

A.P. Borina, Engineer, Navigator JSC, 199106, Russia, St. Petersburg, ul. Shkiperskiy Protok, 14 3, korp. 3, e-mail: apborina@gmail.com

M.N. Eshchenko, PhD. (Econ.), St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, e-mail: si@smtu.ru

A.A. Uhov, DSc. (Eng.), Assistant Professor, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", programmer at the St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3, e-mail: aauhov@gmail.com

The article describes the developed system for ensuring the security of protected objects (henceforth, the System), which allows you to take timely measures in case of detection of negative factors in the security system caused by negligence, malicious actions or technical problems. The advantages of the System, the structure, purpose and principle of operation of the components, the developed software are described. Due to the implementation of a comprehensive project and the possibility of expanding the System, including integration with similar systems, organizations ensuring the safety of protected objects will be able to use modern equipment manufactured in Russia.

Key words: artificial intelligence, protected object, integrated security system, smoke detectors.

For citation: Borina A.P., Eshchenko M.N., Uhov A.A. Standalone intelligent scalable security management system of protected objects. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 150 — 155. EDN YTHXOW.

ВВЕДЕНИЕ

Автономная интеллектуальная масштабируемая система обеспечения безопасности охраняемых объектов (далее — Система) представляет собой инновационное решение, направленное на повышение уровня защиты и эффективности управления процессами безопасности на объектах недвижимости. Основная цель создания Системы заключается в улучшении процессов обеспечения сохранности объектов благодаря оперативному представлению информации и использованию современных технологий [1].

Основные задачи Системы включают обнаружение проникновения на охраняемый объект [2, 3 — 5], обнаружение возгорания, открытия дверей и окон, а также изменение режимов охраны. Кроме того, Система обеспечивает масштабируемость и автономность работы, что позволяет ей адаптироваться к различным условиям и работать без необходимости постоянного вмешательства специалистов. Каждый компонент Системы выполняет свою уникальную функцию и интегрируется с другими компонентами для обеспечения целостной и эффективной работы [6].

Системы аналогичного назначения, как правило, создаются постепенно, по мере разработки соответствующих узлов, компонентов и программного обеспечения (далее — ПО). Такой подход приводит к тому, что затраты на обеспечение совместимости новых компонентов с уже существующими могут оказаться достаточно большими, вплоть до переработки отдельных аппаратных и программных решений уже серийно производимых компонентов [7]. Разработанная Система лишена таких недостатков, поскольку совместимость аппаратных и программных компонентов обеспечена на ранних стадиях проектирования. Единый подход к дизайну аппаратных компонентов и программного обеспечения также положительно сказывается на отношении потребителей к предлагаемому продукту. Также для успешной реализации проекта разработано дополнительное оборудование, в частности специализированный стенд для испытаний макетов и опытных образцов противопожарных датчиков на этапе их разработки [8, 9], а также для периодических испытаний серийной продукции, что положительно сказывается на снижении общих затрат на разработку.

Важной отличительной особенностью Системы является развитое сервисное ПО, облегчающее развертывание аппаратных компонентов на охраняемом объекте и их дальнейшее обслуживание.

Разработанная Система в полной мере отвечает основным тенденциям развития автоматизированных систем защиты недвижимости:

- использование беспроводных технологий для передачи информации;
- использование единых интерфейсов отдельных компонентов охранных систем для обеспечения масштабируемости;
- подключение элементов систем защиты недвижимости к сети Интернет для объединения отдельных элементов в единую охранную систему путем использования технологий облачных вычислений;
- использование мобильных устройств в качестве терминалов управления и ключей доступа к охраняемым объектам.

1. СОСТАВ СИСТЕМЫ

Рассмотрим структурную схему Системы, представленную на рис. 1. В состав Системы входят следующие аппаратные компоненты:

- «Концентратор» предназначен для приема и обработки сигналов от извещателей (датчиков охраны, пожара и т.д.), передачи данных на сервер в облачное ПО, прием команд от облачного ПО для извещателей;
- «ИК-Радио» представляет собой пассивный инфракрасный (далее — ИК) детектор нарушителя. Передает данные по радиоканалу. Аналогичный по назначению и конструктивному исполнению «ИК-Провод» передает данные по проводному интерфейсу;

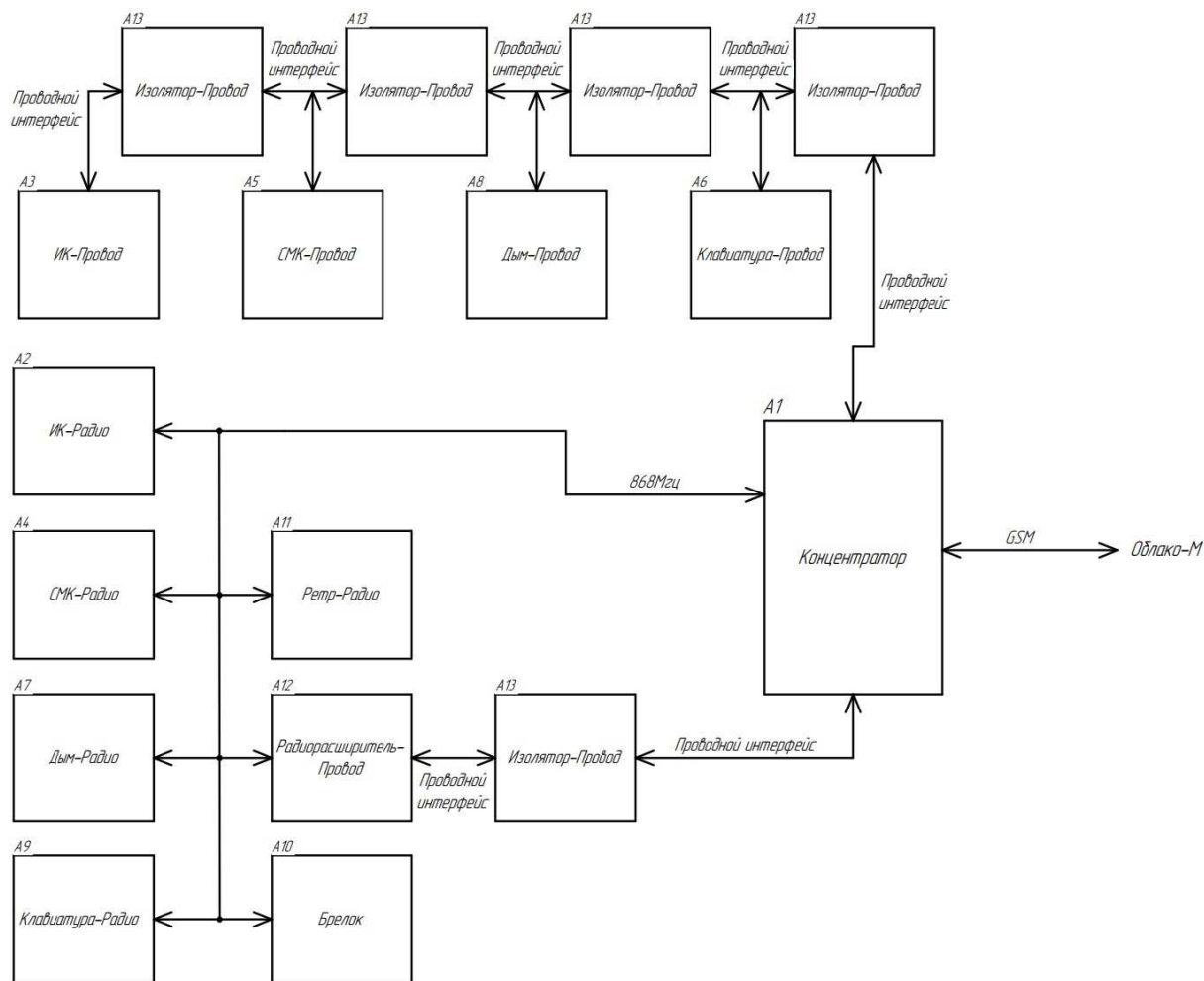


Рис. 1. Структурная схема Системы

- «СМК-Радио» является магниточувствительным детектором смещения или открывания дверей, окон и других конструктивных элементов. Передает данные по радиоканалу. Аналогичный по назначению и конструктивному исполнению «СМК-Провод» передает данные по проводному интерфейсу;

- «Дым-Радио» представляет собой детектор для обнаружения возгорания на охраняемом объекте. Передает данные по радиоканалу. Аналогичный по назначению и конструктивному исполнению «Дым-Провод» передает данные по проводному интерфейсу;

- «Клавиатура-Радио» представляет собой выносной стационарный пульт охранной системы и предназначена для ручного формирования команд управления режимами работы компонента «Концентратор». Передает данные по радиоканалу. Аналогичный по назначению и конструктивному исполнению компонент «Клавиатура-Провод» передает данные по проводному интерфейсу;

- «Брелок» предназначен для ручного формирования команд управления режимами работы компонента «Концентратор». Передает данные по радиоканалу, является выносным мобильным пультом охранной системы;
- «Ретр-Радио» предназначен для передачи данных между радиоканальными извещателями и концентратором в случае отсутствия радиосвязи в местах установки извещателей;
- «Радиорасширитель-Провод» предназначен для передачи данных между радиоканальными извещателями и концентратором в случае отсутствия радиосвязи в местах установки извещателей. К концентратору подключается по проводной связи;
- «Изолятор-Провод» предназначен для изолирования поврежденных короткозамкнутых участков проводной линии связи с последующим автоматическим восстановлением проводного канала связи после устранения короткого замыкания.

В состав Системы входят программные компоненты, представленные на рис. 2:

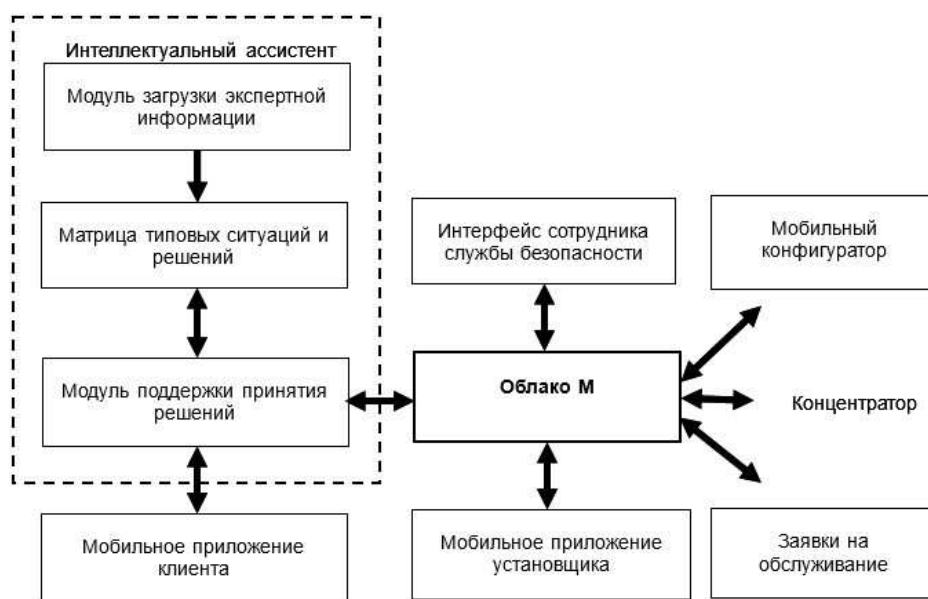


Рис. 2. Структура программного обеспечения

- ПО «Облако М» функционирует на сервере и предназначено для хранения данных, обмена сообщениями между аппаратными и программными компонентами Системы;
- ПО «Мобильный конфигуратор» представляет собой пользовательский интерфейс для отображения текущего режима работы компонента «Концентратор», списка сигналов, переданных компонентом «Концентратор» в ПО «Облако М», и формирования команд управления компонентом «Концентратор»;
- ПО «Заявки на обслуживание» предназначено для создания заявок на обслуживание объектов, назначения заявок на инженеров, поиска заявок по указанным пользователем критериям;
- ПО «Мобильное приложение установщика» предназначено для настройки оборудования, привязанного к объекту мониторинга;
- ПО «Мобильное приложение клиента» предназначено для управления охранной системой (взятие под охрану, снятие с охраны), установленной на объекте, просмотра текущего состояния отдельного объекта, просмотра истории событий, полученных от охранного оборудования, установленного на объекте;
- ПО «Интерфейс сотрудника службы безопасности» предназначено для вывода информации об объектах, заслуживающих внимания (например, тех, по которым пришел сигнал тревоги или на которых были зарегистрированы неисправности оборудования);
- ПО «Интеллектуальный ассистент» предназначено для помощи и поддержки клиента в типовых проблемных ситуациях, которые могут быть разрешены силами самого клиента.

2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Разработанную Систему от других аналогичных охранных систем в первую очередь отличает программное обеспечение. Основным является ПО «Облако М». Подсистема хранения данных обеспечивает безопасное хранение информации и данных, поступающих от компонентов Системы.

Подсистема обмена сообщениями между компонентами координирует коммуникацию между различными компонентами Системы.

Компонент для организации мониторинга работоспособности позволяет контролировать состояние Системы и своевременно реагировать на возможные проблемы.

«Облако М» представляет из себя облачный сервис, реализованный в виде набора микросервисов, что позволяет производить гибкую настройку и адаптацию возможностей системы под текущие требования по масштабированию и отказоустойчивости. ПО «Облако М» не имеет пользовательского интерфейса и полностью функционирует в автоматическом режиме, обеспечивая обмен информацией между остальными компонентами системы.

Для обеспечения информационного обмена компоненты ПО «Облако М» работают в составе единой вычислительной сети, построенной по технологии Интернет/Интранет. В качестве основного средства связи между системами и компонентами ПО «Облако М» использована глобальная вычислительная сеть Интернет. Предусмотрена возможность работы функционально законченных компонентов систем и компонентов ПО «Облако М» в разных локальных вычислительных сетях.

ПО «Интеллектуальный ассистент» должно выполнять часть функций технической поддержки клиента при самостоятельной организации Системы:

- помощь и поддержка клиента в типовых проблемных ситуациях, которые могут быть разрешены силами самого клиента;
- сбор информации, позволяющий следующей линии технической поддержки более эффективно выполнять свою работу.

Данное ПО можно считать экспертной системой или же системой поддержки принятия решений. «Матрица типовых ситуаций и решений» концептуально представляет собой ориентированный граф, где вершины, не имеющие исходящих дуг, — решения, а все остальные вершины — ситуации. Взаимодействие пользователя с системой в ходе поиска решения той или иной проблемы сводится к обходу этого графа.

Наличие в составе Системы противопожарных извещателей позволяет обеспечить комплексную охрану объектов при существенном снижении затрат как на установку оборудования, так и на обслуживание [10].

ВЫВОДЫ

Система имеет потенциал для дальнейшего расширения и улучшения, включая интеграцию с аналогичными системами на рынке, расширение номенклатуры оконечных устройств и развитие взаимодействия с инженерным оборудованием охраняемых помещений. Это позволяет создать более гибкую и адаптируемую систему, которая может удовлетворить потребности широкого круга пользователей [11, 12].

Результаты исследования применимы на судах и морских объектах в установленном действующим законодательством порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ещенко М.Н. Возможное применение искусственного интеллекта в судостроении и судоремонте / М.Н. Ещенко, Т.Г. Суровцева, Д.К. Щеглов // Судостроение. — 2024. — № 3 (874). — С. 52 — 56.
2. Бугорский М.А. Особенности использования объектов критической информации инфраструктуры с современной системой обнаружения вторжений / М.А. Бугорский, М.А. Каплин, С.В. Остроцкий, О.В. Казакова, В.И. Селин // Sciences of Europe. — 2021. — № 66, Vol. 1. — Р. 40 — 44.
3. Прохоров А.С. Применение нейронных сетей для обеспечения безопасности человека в жилых и промышленных помещениях / А.С. Прохоров // Символ науки. — 2021. — № 1. — С. 25 — 29.
4. Гомзяков М. В. Обзор аварийности морских транспортных судов Дальневосточного региона / М. В. Гомзяков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 4 — 10. — EDN CZYLIM.
5. Миклуш С.В. Технология цифровизации мониторинга и управления сложными производственными процессами судостроительного предприятия: постановка задачи и основные критерии / С.В. Миклуш, В.А. Миклуш // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 102 — 107. — EDN MCUWJY.
6. Андреев А.С. Методика формирования рациональной структуры гибридной интеллектуальной системы обнаружения АСО / А.С. Андреев // Сб. тр. XXXIV межведомственной НТК. — Серпухов: ФВА РВСН, 2015. — С. 10 — 13.
7. Офицеров А.И. Использование искусственного интеллекта в системах обеспечения комплексной безопасности охраняемого объекта / А.И. Офицеров, Д.А. Сафонов // Экономика. Информатика. — 2023. — Том 50, № 1. — С. 203 — 210.
8. Борина А.П. Стенд для проведения испытаний извещателей пожарных дымовых / А.П. Борина, М.Н. Ещенко, Д.О. Куприянов // Судостроение. — 2023. — № 6 (871). — С. 41 — 44.
9. Борина А.П. Автоматизация проведения испытаний извещателей пожарных дымовых / А.П. Борина, М.Н. Ещенко, Д.О. Куприянов // Судостроение. — 2023. — № 6 (871). — С. 44 — 48. — EDN KRFLCR.
10. Андреев А.В. Перспективы построения систем пожарной сигнализации на принципах искусственного интеллекта (на примере газовых пожарных извещателей) / А.В. Андреев, А.С. Доронин, С.Н. Терехин // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». — 2022. — № 1. — С. 65 — 74.
11. Ванжа Т.В. Статистический анализ современных методов распознавания лиц и эмоций / Т.В. Ванжа // Информатика и кибернетика. — 2019. — Т. 16, № 2. — С. 64 — 70.
12. Могилин К.А. Интеллектуальные системы видеонаблюдения в комплексах безопасности / К.А. Могилин, В.А. Селищев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — Вып. 3. — С. 89 — 94.

REFERENCES

1. Eschenko M.N., Surovtseva T.G., Shcheglov D.K. Vozmozhnoe primeneniye iskusstvennogo intellekta v sudostroenii i sudoremonte [Possible use of artificial intelligence in shipbuilding and shiprepair]. *Sudostroenie*. 2024. № 3(874). P. 52 — 56.
2. Bugorsky M., Kaplin M., Ostrotsky S., Kazakova O., Selin V. Features of using critical information infrastructure facilities with a modern intrusion detection system. *Sciences of Europe*. 2021. № 66, Vol. 1. P. 40 — 44.
3. Prokhorov A.S. Primeneniye neyronnykh setey dlya obespecheniya bezopasnosti cheloveka v zhilykh i promyshlennyykh pomeshcheniyakh [The use of neural networks to ensure human security in residential and industrial premises]. *Simvol nauki*. 2021. № 1. P. 25 — 29.
4. Gomzyakov M.V. Overview of maritime transport casualties in the Far East. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. № 58/59. P. 4 — 10. — EDN CZYLIM.
5. Miklush S.V., Miklush V.A. Technology of monitoring and management digitalization for complex production processes of a shipbuilding enterprise: problem statement and main criteria. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. № 72/73. P. 102 — 107. — EDN MCUWJY.
6. Andreev A.S. Metodika formirovaniya ratsional'noy struktury gibridnoy intellektual'noy sistemy obnaruzheniya ASO [Technique for the formation of a rational structure of a hybrid intelligent detection system for ASO]. *Sb. tr. XXXIV mezhdovedstvennoy NTK*. Serpukhov: FVA RVSН, 2015. P. 10 — 13.
7. Ofitserov A.I., Safonov D.A. The use of artificial intelligence in systems for ensuring the integrated security of a protected object]. *Economics. Information Technologies*. 2023. Vol. 50, № 1. P. 203 — 210.
8. Borina A.P., Kupriyanov D.O., Eschenko M.N. Stend dlya provedeniya ispytaniy izveshchateley pozharных dymovykh [Stand for testing smoke detector alarms]. *Sudostroenie*. 2023. № 6 (871). P. 41 — 44.
9. Borina A.P., Kupriyanov D.O., Eschenko M.N. Avtomatizatsiya provedeniya ispytaniy izveshchateley pozharных dymovykh [Automatic test method for smoke detector alarms]. *Sudostroenie*. 2023. № 6 (871). P. 44 — 48. — EDN KRFLCR.
10. Andreev A.V., Doronin A.S., Terekhin S.N. Fire alarm systems construction on the artificial intelligence principles (basis on the gas fire detectors). *Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*. 2022. № 1. P. 65 — 74.
11. Vanzha T.V. Statistical analysis of modern methods of recognition of faces and emotions. *Informatika i Kibernetika*. 2019. T. 16, № 2. P. 64 — 70.
12. Mogilin K.A., Selishchev V.A. Intellektual'nye sistemy videonablyudeniya v kompleksakh bezopasnosti [Intelligent video surveillance systems in security complexes]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020. № 3. P. 89 — 94.

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (<https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziologia* [Neurophysiology]. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed on 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichstva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

- цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

- краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;

- обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

- использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

- выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация — книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовки, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (kuteynikov.ma@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtip.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>
<https://cdo.smolgu.ru/>
<https://topwar.ru/>

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

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 77

Редакционная коллегия журнала

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

Подписано в печать 23.12.2024. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

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