

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

**ТЯЖЕЛОЕ ТОПЛИВО В АРКТИКЕ**  
ИТОГИ РАБОТЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ МОРСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**АВТОНОМНЫЕ СУДА**  
ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОЕКТА

**КРУПНОТОННАЖНЫЕ ХРАНИЛИЩА СПГ**  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ



№ 62/63  
ИЮЛЬ  
2021

**Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 62/63, 2021**

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

Учредитель издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.С. Бойко

E mail: boyko.ms@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, главный редактор

журнала, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

А.С. Большев д.т.н., проф., Санкт Петербургский

государственный политехнический университет им. Петра Великого

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

А.А. Иванченко д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых

энергетических установок, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

А.В. Ильин д.т.н., доцент, заместитель генерального директора по

научной работе, НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ

Прометей»

М.А. Кутейников д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса

и судовых устройств, 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 «Прессинформ». Подписной индекс 87730.

Электронная версия журнала доступна по адресу:

[www.rs class.org](http://www.rs class.org).

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования [www.elibrary.ru](http://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, № 62/63, 2021**

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor in Chief

Maxim Boyko

E mail: boyko.ms@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, Editor in Chief of Research Bulletin by 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, Head of Hull

Department, RS

Aleksey Marchenko Doctor of Technical Science, professor,

University Centre in Svalbard, Norway

Valery Polovinkin Doctor of Technical Science, professor, Research

Manager, Krylov State Research Centre

Aleksander Rodionov Doctor of Technical Science, professor of

St. Petersburg State Marine Technical University

Kirill Rozhdestvenskiy Doctor of Technical Science, professor of

St. Petersburg State Marine Technical University

Anatoliy Sazonov Doctor of Technical Science, professor of Admiral

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

corresponding member of Russian Academy of Science

Oleg Timofeev Doctor of Technical Science, St. Petersburg State

Marine Technical University

Vladimir Tryaskin Doctor of Technical Science, professor,

St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Pressinform catalog.

On line version of the journal is available on website:

[www.rs class.org](http://www.rs class.org).

The journal is included in Russian index of scientific citing

[www.elibrary.ru](http://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

№ 62/63

## 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 группам научных специальностей:

- 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
- 2.9.7 – Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

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 main groups of 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
- 2.9.7 – Operation of water transport, water ways, and hydrography

Санкт-Петербург  
2021



## СОДЕРЖАНИЕ

**ОБОЗРЕНИЕ** ..... 13, 113, 120, 128

### **БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

*Толмачев С.А.* Запрет на использование тяжелого топлива на судах в Арктике — итоги работы ИМО . . . 6

*S.A. Tolmachev* Ban on the use of heavy fuel oil on ships in the Arctic — outcome of IMO work

*Петров А.А., Морозова Е.А., Шилкина М.С., Мостовщиков Д.С.* Разработка изменений к требованиям РС . . 14  
по освидетельствованию рыболовных судов на основе анализа международных нормативных документов

*A.A. Petrov, E.A. Morozova, M.S. Shilkina, D.S. Mostovshchikov* Development of amendments  
to RS requirements for survey of fishing vessels based on the analysis of international regulatory documents

### **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT**

*Ефимов В.В.* Риск-ориентированный процесс одобрения автономных судов и систем . . . . . 21  
для автономных судов

*V.V. Efimov* Risk-based approval for autonomous vessels and systems for autonomous vessels

*Гаврилов А.Н.* Метод сокращения интервалов неопределенности при прогнозировании . . . . . 42  
грузооборотов морских портов

*A.N. Gavrilov* Method of reducing uncertainty intervals in forecasting cargo turnover in sea ports

### **МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS**

*Большев А.С., Фролов С.А., Шонина Е.В.* Оптимизация систем удержания морских плавучих . . . . . 50  
заякоренных сооружений

*A.S. Bolshev, S.A. Frolov, E.V. Shonina* Optimization of anchoring systems of offshore floating structures

*Карулин Е.Б., Карулина М.М.* Оценка ледопроеходимости ледокольных судов с помощью . . . . . 62  
простого критерия

*E.B. Karulin, M.M. Karulina* Evaluation of ship icebreaking capability based on a simple criterion

*Жинкин В.Б.* Модернизация кавитационной трубы с целью расширения ее экспериментальных . . . . . 74  
возможностей

*V.B. Zhinkin* Modernization of cavitation tunnel to increase experimental possibilities

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

*Платонов В.В., Тряскин В.Н.* Методические основы разработки расчетных зависимостей. . . . . 78  
для определения ледовых нагрузок на корпус ледоколов с применением новой модели  
динамического разрушения льда

*V.V. Platonov, V.N. Tryaskin* Methodological basis for the calculation of ice loads acting on an icebreaker's  
hull based on a new model of dynamic ice fracture

*Тряскин В.Н., Платонов В.В., Свистунов И.А.* Оценка возможности применения действующих . . . . . 89  
правил РС к конструкциям ледовых усилений стоечных судов

*V.N. Tryaskin, V.V. Platonov, I.A. Svistunov* Assessment of the possibility to apply current requirements  
of RS rules to berth-connected ships ice reinforcement

*Климов С.О., Аносов А.П., Восковицук Н.И., Бессонова В.О.* Экспериментальное определение. . . . . 100  
крутящего момента, действующего на корпус судна

*S.O. Klimov, A.P. Anosov, N.I. Voskovschuk, V.O. Bessonova* Experimental determination of torque acting  
on a ship's hull

**МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА  
MATERIALS AND WELDING**

*Кулешов И.И., Патенкова Е.П.* Влияние параметров режима лазерной обработки на структуру . . . . . 106  
и размеры зоны упрочнения серых чугунов

*I.I. Kuleshov, E.P. Patenkova* Influence of laser treatment mode settings on the structure and dimensions  
of gray cast iron hardened area

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

*Халыавкин А.А., Шацков Д.О., Мамонтов В.А., Ауслендер А.Я.* Методика определения. . . . . 114  
коэффициента жесткости действующих подшипников

*A.A. Khalyavkin, D.O. Shatskov, V.A. Mamontov, A.Y. Auslender* Methodology to determine the stiffness  
coefficient of deadwood bearings

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ  
ELECTRICAL EQUIPMENT**

*Широков Н.В.* Превентивная защита судовой электроэнергетической системы с параллельно. . . . . 121  
работающими генераторными агрегатами

*N.V. Shirokov* Preventive protection of the ship's electric power system with parallel generator sets

**Токарев Л.А., Макаров Д.А., Григорьев А.В.** Особенности работы гребных электродвигателей. . . . . 131  
в составе судовых систем электродвижения с полупроводниковыми преобразователями

**L.N. Tokarev, D.A. Makarov, A.V. Grigoryev** Features of propulsion motors operation as a part of ship  
electric propulsion systems with semiconductor converters



## БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

---

УДК 629.541 — 546, 665.753.5, 341-162

### ЗАПРЕТ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЯЖЕЛОГО ТОПЛИВА НА СУДАХ В АРКТИКЕ: ИТОГИ РАБОТЫ ИМО

**С.А. Толмачев**, Представительство Российской Федерации при Международной морской организации, Лондон, e-mail: [tolmachev-s@yandex.ru](mailto:tolmachev-s@yandex.ru)

В статье представлена информация об основных этапах и особенностях рассмотрения в профильных рабочих органах Международной морской организации чувствительного для Российской Федерации вопроса о введении запрета на использование тяжелого топлива на судах в арктических водах и его перевозку в качестве топлива. Представлена краткая история рассмотрения вопроса в ИМО, позиции сторон до начала переговоров, информация об оценке социально-экономических последствий, выполненных арктическими государствами, роль природоохранных неправительственных организаций в продвижении запрета, итоги переговоров в рамках ИМО и выводы по их результатам. Благодаря активной позиции Российской Федерации в ИМО введение запрета, продвигаемое рядом государств и неправительственных организаций, было отложено на 7 лет. Условия запрета смягчены с целью минимизации негативных последствий для населения и экономики российской арктической зоны при понимании, что необходимый уровень защиты морской среды будет обеспечиваться благодаря комплексным мерам, применяемым Российской Федерацией в Арктике.

**Ключевые слова:** запрет на тяжелое топливо, Арктические воды, МАРПОЛ, ИМО, Полярный кодекс, арктическое судоходство

### BAN ON THE USE OF HEAVY FUEL OIL ON SHIPS IN THE ARCTIC OUTCOME OF IMO WORK

**S.A. Tolmachev**, Mission of the Russian Federation to the International Maritime Organization, London, e-mail: [tolmachev-s@yandex.ru](mailto:tolmachev-s@yandex.ru)

The article contains information about main steps of consideration in the IMO working bodies of the topic related to the ban on the use and carriage for use of heavy fuel oil on ships in Arctic waters. The background information of HFO ban for the Arctic in the IMO is supplemented by the description of proposals and impact assessments made, environmental NGOs' role in promoting the ban, the starting points and results of negotiations, as well as the results analysis. The HFO ban has been finally approved as MARPOL Annex I Amendments, whereas the efforts of the Russian Federation have resulted in the 7-year postponement of its implementation compared to the initially proposed schedule. Specific provisions have been introduced into the text to mitigate potential negative social and economic consequences for the Russian Federation provided that national measures taken by the RF in the Arctic ensure the adequate level of protection of marine environment.

**Keywords:** heavy fuel oil (HFO) ban, Arctic waters, MARPOL, IMO, Polar Code, Arctic shipping

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия акценты в работе Международной морской организации (ИМО) заметно сместились в сторону усиления экологической составляющей. Принято и уже вступило в силу несколько новых международных инструментов в области охраны морской среды, постоянно вносятся изменения в Конвенцию МАРПОЛ.

Важным и резонансным направлением работы ИМО является защита окружающей среды Арктики и Антарктики.

В 2010 году Комитет по защите морской среды (КЗМС) ИМО принял поправки к Приложению I МАРПОЛ с новой главой 9 и правилом 43, вводящим запрет на использование и перевозку в качестве топлива или груза наливом нефти и тяжелых (остаточных) нефтепродуктов в районе Антарктики. Решение было принято с учетом итогов 28-го консультативного совещания сторон договора об Антарктике, на котором государства постановили обратиться в ИМО для введения такого запрета с целью снизить риски аварийных разливов или сбросов [16].

Одновременно с обсуждением элементов запрета для Антарктики в ИМО выдвигались инициативы распространить аналогичный запрет и на Арктику. Но на тот момент государства сошлись во мнении, что подобная мера будет затрагивать интересы прибрежных арктических стран, поэтому его введение признали нецелесообразным.

Вместе с тем в последующие годы этот вопрос периодически возникал в повестке дня. Дополнительный импульс ему придали отчеты, подготовленные под эгидой Рабочей группы по защите морской среды (РАМЕ) Арктического совета в 2009 [1] и 2011 [5] гг. В отчетах отмечалось, что наибольшую опасность для морской среды Арктики представляют разливы нефти и нефтепродуктов, и что существенно снизить риск разливов могло бы стать расширение использования дистиллятного (дизельного) топлива вместо тяжелого.

Вопрос, какой из видов судового топлива — тяжелое или дистиллятное — представляет наибольший риск для морской среды Арктики, выходит за рамки данной статьи. Стоит отметить, что имеются различные исследования на этот счет, как обосновывающие более пагубное воздействие тяжелого топлива при разливе в условиях льда и низких температур, так и обращающие внимание на не менее вредные последствия растворения дистиллятного топлива в воде.

На тот момент государства, признавая в ходе дискуссии в ИМО, что запрет на использование тяжелого судового топлива в Арктике вводить преждевременно, согласились включить в рекомендательную часть Полярного кодекса, — который как раз разрабатывался в тот период, — призыв распространить действие правила 43 Приложения I МАРПОЛ и на арктические воды.

## ВКЛЮЧЕНИЕ ТЕМЫ ПО ЗАПРЕТУ ТЯЖЕЛОГО ТОПЛИВА В ПРОГРАММУ РАБОТЫ ИМО

В 2017 году по предложению группы государств (США, Канада, Финляндия и пр.) на 71-й сессии Комитета по защите морской среды (КЗМС) в рабочую программу Комитета была включена новая тема по разработке мер по снижению рисков использования тяжелого топлива на судах в Арктических водах. Рамки темы не ограничивались разработкой запретительных мер. Предлагалось рассмотреть вопрос снижения рисков использования тяжелого топлива в более широком контексте [10].

На 72-й сессии КЗМС в апреле 2018 года Российская Федерация представила конкретные предложения по снижению рисков разливов тяжелого топлива в Арктике, включавшие меры навигационного, эксплуатационного, инфраструктурного характера, меры в области чрезвычайного реагирования, подготовки и обучения [11].

Одновременно США и группа европейских государств представили предложение по скорейшему введению всеобъемлющего запрета на использование тяжелого топлива на судах в Арктике [12]. Предложение было широко поддержано многими государствами и природоохранными неправительственными организациями. Это произошло несмотря на конструктивные комментарии Российской Федерации и Канады, которые обращали внимание на необходимость комплексного подхода к снижению рисков в ситуации, когда социально-экономические последствия введения запрета не ясны.

Стоит также отметить, что в ходе обсуждений некоторые государства предприняли попытки распространить обсуждаемый запрет и на перевозку тяжелого топлива и нефти в качестве груза в Арктике.

Однако эти предложения не были приняты в силу того, что они явно выходили за рамки согласованной КЗМС темы.

В итоге удалось вернуть дискуссию в конструктивное русло. Подотчетному КЗМС Подкомитету по предотвращению загрязнения и реагированию (PPR) были поставлены задачи:

- разработать определение тяжелого топлива;
- начать разработку рекомендательного руководства ИМО по снижению рисков на основе российских предложений;
- подготовить формулировку запрета в виде поправок к МАРПОЛ или Полярному кодексу на основе оценки последствий, которая должна быть проведена в соответствии с методологией ИМО.

Российская Федерация активно участвовала в работе над методологией, которая была завершена на 6-й сессии Подкомитета PPR в феврале 2019 года. В соответствии с методологией основными элементами исследования должны были стать:

- оценка расходов для экономики и жителей Арктики, связанных с введением запрета;
- оценка преимуществ запрета для населения и экосистем;
- определение факторов-исключений для смягчения негативного эффекта запрета (например, отсрочки для различных типов судов / характера рейсов, поэтапное введение запрета и пр.).

Также Подкомитет PPR на своей 6-й сессии согласовал определение тяжелого топлива для использования при разработке будущих поправок по запрету. За основу была взята формулировка из п. 1.2 правила 43 Приложения 1 к МАРПОЛ, содержащего запрет для района Антарктики, а именно, на нефтяное топливо иное, чем сырая нефть, плотностью более  $900 \text{ кг/см}^3$  при  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , или с кинематической вязкостью более  $180 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  [13].

## ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАПРЕТА И ФАКТОРЫ-ИСКЛЮЧЕНИЯ

Российская Федерация в течение 2019 года провела оценку и представила результаты на 7-й сессии Подкомитета PPR, которая состоялась в феврале 2020 года. С подробными результатами оценки можно ознакомиться в соответствующей статье, вышедшей в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» №№ 58/59 [18]. В соответствии с проведенной оценкой, единовременные затраты от введения запрета могли бы составить до 5,2 млрд рублей, а ежегодные затраты после введения запрета, связанные с удорожанием судового топлива — более 30 млрд. руб. Удорожание отразится на себестоимости грузоперевозок в Арктике и, соответственно, увеличит стоимость товаров для населения Арктической зоны, поставленных морем в рамках «Северного завоза».

Результаты оценки также представили Дания, США, Канада и Норвегия.

Датчане в своем исследовании оценивали только потенциальный рост себестоимости перевозок для Гренландии, который, как они заявили, составит около 0,01 — 0,02 % [8].

В документе США было отмечено возможное негативное влияние запрета на экономику Аляски и себестоимость морских перевозок в пределах 10 млн долларов США ежегодно. Основной акцент при этом был сделан на оценке возможных затрат на ликвидацию разлива тяжелого топлива, его воздействие на традиционный рыбный промысел и жизненный уклад коренного населения. Последствия разлива, по мнению авторов документа, могли бы быть многократно больше прямых экономических потерь от введения запрета [7].

В документе Канады на примере одного из арктических районов был сделан приблизительный расчет увеличения стоимости товаров для конечного потребителя непосредственно из-за запрета в пределах 0,7 — 1,9 %. Был сделан общий вывод о наличии преимуществ от введения запрета, а также экономических потерь для малочисленного населения и промышленности канадской Арктики [2].

В документе Норвегии были приведены расчеты для норвежских судов, работающих в Арктике, в соответствии с которыми ежегодный ущерб для экономики в целом должен был составить от 350 до 760 тыс. долларов США [9].

Несколько документов с собственной оценкой для различных регионов (Аляска, Канада, Гренландия) и отдельных сегментов судоходной отрасли представили «зеленые» неправительственные организации. Их документы объединяет попытка расположить на одной чаше весов потенциальные расходы на устранение гипотетического разлива и фактические затраты, связанные с отказом от использования тяжелого топлива. Во всех случаях был сделан вывод о том, что рост себестоимости перевозки грузов или пассажиров незначителен по сравнению с потенциальными расходами на устранение последствий разлива топлива.

На основе результатов оценки последствий Российская Федерация представила в своем документе факторы-исключения, призванные нивелировать возможные негативные последствия введения запрета с учетом проведенной оценки [15]:

- исключение из применения запрета аварийно-спасательных судов и судов, обеспечивающих безопасность судоходства, судов, имеющих конструктивную защиту топливных танков (в соответствии с правилами 12А Приложения 1 к МАРПОЛ и 1.2 части II-A Полярного кодекса);
- возможность прибрежного Арктического государства исключать из области распространения запрета районы, где риск разлива тяжелого топлива минимален (на основании ряда параметров, например, отсутствие льда, наличие ледокольной проводки, средств ЛАРН и СУДС, удаленность от заповедников и пр.);
- исключение из-под действия запрета судов старше 10 лет с топливными системами, не предназначенными для использования дистиллятного топлива (это в основном касалось возрастных судов, задействованных в «Северном завозе»).

Ни одно из других государств не представило какие-либо предложения по факторам-исключениям.

## РОЛЬ ПРИРОДООХРАННЫХ НЕПРАВИТЕЛЬСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Отдельно следует упомянуть о роли «зеленых» в деле рассмотрения в ИМО тематики запрета на тяжелое топливо в Арктике, которые много лет последовательно продвигали запрет. Была организована резонансная кампания в средствах массовой информации, социальных сетях и непосредственно в ИМО, с привлечением представителей коренных народов Арктики. Последние активно отстаивали необходимость сохранения традиционного жизненного уклада и способов жизнеобеспечения и обозначали угрозу, которую представляют для них разливы нефтепродуктов в Арктике. Наиболее заметную роль в этих кампаниях играли представители коренных народов Аляски и острова Св. Лаврентия.

В этой связи интерес представляет ранее упоминавшийся документ США с оценкой влияния возможного введения запрета. Из документа следует, что большинство населения районов Аляски, являвшихся предметом оценки — представители коренных народов, занятые добычей морских биоресурсов. Они не сильно зависят от товаров, приобретаемых за деньги, т.е. товаров, которые завозятся в том числе морем, о чем прямо было упомянуто в американском документе. Более того, во время презентаций в ИМО представители коренных народов говорили о недостаточности сил и средств реагирования на разливы в их регионах, а также о том, что первичное реагирование, по сути, должны осуществлять сами жители пострадавших населенных пунктов. Все эти обстоятельства определили отношение коренных народов не только к потенциальным разливам, но и к росту судоходства в регионе в целом. Очевидно, что для них запрет на тяжелое судовое топливо — один из способов предотвратить угрозу, которое судоходство, по их мнению, представляет для традиционного образа жизни.

Проблема в контексте рассмотрения этого вопроса в ИМО заключается в том, что собственную ситуацию они проецируют на всю Арктику, полагая, что запрет на тяжелое топливо может одинаковым образом решить проблемы в других ее районах.

В российской же Арктике иная картина: коренные народы составляют незначительную долю населения. Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море достаточно бедны биоресурсами. Большинство представителей коренных народов вовлечено в нормальную экономическую деятельность, и их выживание зависит от сезонных поставок товаров морем. Так, Генеральному секретарю ИМО в начале 2020 года было передано официальное обращение Ассоциации коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации, объединяющей 40 коренных народов Арктики, более 250 тысяч человек. Эта Ассоциация является одним из постоянных участников Арктического совета и имеет специальный консультативный статус при Экономическом и социальном Совете ООН.

В обращении Ассоциация выражала озабоченность инициативой по запрету тяжелого топлива в Арктике. По их оценкам, запрет окажет существенное негативное влияние на социально-экономическое положение коренных народов вследствие подорожания сезонно поставляемых товаров жизнеобеспечения.

Также, в отличие от других арктических государств, в Российской Федерации действующая комплексная система реагирования на чрезвычайные ситуации не предполагает перекладывание задачи реагирования на разливы нефти и нефтепродуктов на местное население.

Подобные различия лишней раз подтверждают, что не следует рассматривать Арктику как однородную территорию и вводить единые ограничительные меры без учета специфики отдельных ее регионов.

## НАЧАЛЬНЫЕ ПОЗИЦИИ НА ПЕРЕГОВОРАХ

Подготовка проекта поправок к инструментам ИМО и их обсуждение на сессиях рабочих органов ИМО, как правило, проходят при наличии конкретного предложения (базового документа), представленного государствами или международными организациями. В данном случае базовым документом для рассмотрения на 7-й сессии Подкомитета PPR стал документ PPR7/14/4, представленный США и другими арктическими (кроме Канады) и неарктическими государствами с проектом поправок к правилу 43 Приложения 1 к МАРПОЛ [6]. Предлагалось распространить на Арктические воды применение запрета на использование тяжелого топлива (в соответствии с разработанным определением) и его перевозку в качестве топлива.

Для Арктических вод применялось имеющееся в правиле исключение для судов, обеспечивающих безопасность других судов и задействованных в спасательной операции. Также применялось положение о том, что нет необходимости проводить очистку или промывку топливных танков или трубопроводов, если ранее использовалось тяжелое топливо.

Для судов с конструктивной защитой топливных танков предлагалось отсрочить применение запрета на пять лет (на 7-й сессии Подкомитета PPR также был представлен документ «зеленых», предлагавший не предоставлять такой отсрочки[3]).

Аналогичные поправки предлагалось внести в 1.1 части II-A Полярного кодекса.

В порядке подготовки к конструктивной дискуссии на 7-й сессии Подкомитета Российская Федерация переработала факторы в формат конкретных предложений по тексту представленных США и другими коспонсорами поправок. Предложения заблаговременно были направлены всем соавторам предложений, а также прибрежным арктическим государствам для изучения, комментариев, возможного диалога и поиска компромиссного варианта до начала официальных переговоров.

К сожалению, ни от одного государства ответ так и не был получен, и 7-я сессия Подкомитета PPR в феврале 2020 года приступила к формальному рассмотрению представленных предложений и разработке проекта поправок на основе базового документа соавторов.

Рассмотрение вопроса началось с выступления Канады в поддержку предложенного базового документа при условии отсрочки применения запрета на два года, т.е. с 2022 на 2024 гг. Остальными инициаторами запрета это предложение было поддержано единодушно, в то время как встречные предложения на основе факторов-исключений одобрения не получили. Таким образом, стороны сделали лишь незначительную уступку позиции Российской Федерации.

## ИТОГИ ПЕРЕГОВОРОВ И СОГЛАСОВАННАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАПРЕТА

В ходе сложных трехдневных переговоров на рабочей группе при активной позиции делегации Российской Федерации удалось прийти к следующему результату.

1. Вопрос с поправками в Полярный кодекс был снят. Часть II-A Полярного Кодекса представляет собой требования в дополнение к соответствующим базовым положениям МАРПОЛ. Внесение изменений в МАРПОЛ меняет базовые требования и для полярных вод, поэтому вводить дублирующие требования нет необходимости.

2. Запрет для Арктики для большей наглядности выделен в отдельное правило 43А.

3. Тяжелое топливо, на которое распространяется запрет, определено как нефть с характеристиками в соответствии с п.1.2 правила 43 Приложения 1 к МАРПОЛ.

4. Уточнено, что для арктических вод также нет необходимости промывать или очищать топливные танки или трубопроводы, если ранее использовалось тяжелое топливо.

5. В тексте поправок в явном виде указана дата введения запрета в действие — 1 июля 2024 года.

6. К исключениям из применения запрета, помимо судов, обеспечивающих безопасность других судов и задействованных в спасательной операции, добавлены суда, предназначенные для ликвидации разливов нефти и суда аварийно-спасательной готовности. Поправка была внесена с целью уточнения области распространения исключений

7. Судам с конструктивной защитой топливных танков (независимо от флага судна) в соответствии с правилами 12А Приложения 1 к МАРПОЛ и 1.2 части II-A Полярного кодекса предоставлена отсрочка по выполнению требования на 5 лет, т.е. до 1 июля 2029 года. Длительность действия отсрочки вызвала

определенную дискуссию. Ряд делегаций выступал за то, чтобы отсрочку не предоставлять вообще, т.к. в условиях роста судоходства в Арктике отсрочки чреваты увеличением риска разлива топлива. При этом никто не представил достаточных аргументов технического характера в поддержку распространения запрета на такие суда, учитывая, что требование о конструктивной защите топливных танков было введено в свое время именно для минимизации риска разлива топлива. Запрет для таких судов представлял бы, по сути, дублирующее требование. В итоге пятилетняя отсрочка стала компромиссным решением.

8. Прибрежным арктическим государствам (государствам, чьи воды находятся в границах арктических вод, как определено в главе XIV СОЛАС) дана возможность временно освобождать суда под своим флагом, эксплуатирующиеся в водах под своим суверенитетом или юрисдикцией, до 1 июля 2029 года, с учетом соответствующих рекомендаций ИМО и направления информации в Секретариат ИМО о выданных освобождениях.

Ссылка на воды под суверенитетом и юрисдикцией государства широко используется в МАРПОЛ и на практике означает внутренние воды и территориальное море, где государство осуществляет свой суверенитет, а также исключительную экономическую зону, где государство имеет определенную юрисдикцию, в соответствии с положениями Конвенции ООН по морскому праву [17].

Под рекомендациями ИМО в данном случае понимается руководство, которое параллельно разрабатывается на основе российских предложений и при координации Российской Федерации. В тексте поправок сделана привязка этого руководства к поправкам с тем, чтобы предоставить прибрежным Арктическим государствам действенный инструмент по определению мер по снижению рисков разлива тяжелого топлива, которые могут быть достаточны для освобождения конкретного судна из-под действия запрета. Установленный крайний срок выдачи освобождений 1 июля 2029 года стал результатом компромисса между Российской Федерацией, которая выступила с инициативой внести освобождения, и многочисленными противниками освобождений в принципе.

Достигнутый по итогам 7-й сессии Подкомитета PPR компромисс [14] подвергся критике со стороны «зеленых» в преддверии одобрения проекта поправок на 75 й сессии КЗМС в ноябре 2020 года, с призывом пересмотреть договоренности, ограничив географию применения запрета или исключив отсрочки и освобождения [4].

Однако даже инициаторы запрета, такие как США, Финляндия и Франция, предпочли сохранить хрупкий компромисс, достигнутый в ходе переговоров. В результате проект поправок в согласованном на 7-й сессии Подкомитета PPR виде был одобрен без возражений со стороны государств — членов ИМО, с прицелом на принятие поправок в июне 2021 года на 76-й сессии КЗМС в соответствии с процедурами внесения изменений, предусмотренными статьей 16 МАРПОЛ.

Начало применения требований уже установлено в самих поправках как 1 июля 2024 года. К этой дате судно, не подпадающее под исключения или отсрочки, должно прекратить использовать тяжелое топливо. Если судно эксплуатируется под флагом прибрежного арктического государства и эксплуатируется в пределах национальных вод, то оно может обратиться за освобождением при условии принятия альтернативных мер по снижению рисков разливов, на усмотрение Администрации флага.

## ВЫВОДЫ

Экологические запреты не всегда являются оптимальным способом решения проблем. Они дают ложную уверенность в том, что угроза устранена раз и навсегда, и что нет больше необходимости принимать какие-то меры предупреждения и реагирования. Инициаторы продвигали запрет во многом надеясь сэкономить на инфраструктуре по реагированию. Однако даже при самом негативном сценарии запрет не стал бы всеобъемлющим. МАРПОЛ не применяется к государственным и военным судам, а значит риск ущерба морской среде все равно бы сохранялся.

Целесообразным представляется применение комплексных подходов, включающих меры по снижению рисков на национальном, региональном или универсальном уровне таким образом, чтобы обеспечить соблюдение высоких экологических стандартов без отрицательных последствий для экономики и социальной сферы.

Российская Федерация была, фактически, единственным государством, выступавшим против запрета. Другие арктические государства, каждое по своим причинам, поддержали запрет, в итоге он был разработан и одобрен.

Однако во многом благодаря усилиям Российской Федерации, сроки фактического введения запрета были отодвинуты на семь лет относительно первоначально запланированных сроков. Сохранена отсрочка для судов с конструктивной защитой топливных танков.

Самое важное, что в формулировке запрета учтено право прибрежных арктических государств выдавать освобождения для своих судов, эксплуатирующихся в водах под своим суверенитетом или юрисдикцией. Возможность выдачи освобождений является естественной мерой по обеспечению социально-экономических интересов государств при понимании, что запрет является региональной, а не универсальной мерой. Выдача освобождений имеет, в первую очередь, значимую социальную функцию.

Для Российской Федерации это означает возможный вывод из-под действия запрета российских судов, использующих тяжелое топливо, эксплуатирующихся на каботажных рейсах в Арктике, включая акваторию СМП. Применение национальных мер по обеспечению безопасности мореплавания и предотвращения загрязнений на СМП позволит обеспечить адекватный уровень защиты морской среды и избежать дополнительных расходов на перевозку грузов «Северного завоза» и минеральных ресурсов, вывозимых из арктической зоны. Отсрочка на 7 лет позволит облегчить проведение необходимых мероприятий и заблаговременно подготовиться к полномасштабному введению запрета.

Неправильно будет предполагать, что все суда во всех прибрежных арктических государствах, которые могут получить освобождения, по факту получают их. Это утверждали «зеленые», критикуя результаты переговоров. На практике все будет зависеть от политики и подхода конкретного государства, наличия или отсутствия альтернативных решений по снижению рисков разливов, соответствующих рекомендациям ИМО.

Предложенный гибкий подход позволяет учесть интересы всех прибрежных арктических государств, в том числе сторонников запрета, которые могут не выдавать освобождения, если у них нет возможности применять альтернативные меры по снижению рисков. В этой связи Российская Федерация находится в более выигрышном положении, активно инвестируя в инфраструктуру Северного морского пути, развивая силы и средства по поиску, спасанию и реагированию на разливы, модернизируя ледокольный флот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report (AMSA, 2009). Arctic Council, April 2009.
2. Assessment of the benefits and impacts associated with a ban on the use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships operating in the Arctic. PPR7/Inf.16
3. Comments on document PPR7/14/4. PPR7/14/6
4. Comments on document MEPC75/10/Add.1, paragraph 3.5 on draft amendments to MARPOL Annex I to incorporate a prohibition on the use and carriage for use as fuel of heavy fuel oil by ships in Arctic waters. MEPC75/10/7
5. Det Norske Veritas AS, (DNV, 2011), "Report for PAME: Heavy Fuel in the Arctic"
6. Draft language for a ban of use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships in Arctic waters. PPR7/14/4
7. Impact assessment for a ban on heavy fuel oil use and carriage as fuel by ships in the United States Arctic. PPR7/14/3
8. Impact assessment on a ban on heavy fuel oil in Greenland. PPR7/Inf.11
9. Impacts of a ban on heavy fuel oil use and carriage as fuel by ships in the Norwegian Arctic waters. PPR7/Inf.14
10. Measures to reduce risks of use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships in Arctic waters. MEPC71/14/4
11. Proposal for possible measures to reduce risks of use and carriage of HFO as fuel by ships in Arctic waters. MEPC72/11
12. Proposal to ban heavy fuel oil use and carriage as fuel by ships in Arctic waters. MEPC72/11/1
13. Report to the Marine Environment Protection Committee. PPR6/20
14. Report to the Marine Environment Protection Committee. PPR7/22
15. Results of the impact assessment carried out by the Russian Federation and proposed factors. PPR7/14/2
16. Use and carriage of heavy grade oil (HGO) on ships in the Antarctic Sea. BLG11/14/3
17. Конвенция ООН по морскому праву. Режим доступа: [https://www.un.org/Depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm](https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm) (дата обращения: 23.11.2020)
18. Ганеева С.В., Крупин М.И., Оглы Новрузов Б.Р., Сафонов А.В. Экономическая оценка потерь от введения запрета на использование и перевозку тяжелого топлива как топлива для судов в арктических водах. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. № 58/59, 2020. с. 11 — 18

## REFERENCES

1. Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report (AMSA, 2009). Arctic Council, April 2009.
2. Assessment of the benefits and impacts associated with a ban on the use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships operating in the Arctic. PPR7/Inf.16
3. Comments on document PPR7/14/4. PPR7/14/6
4. Comments on document MEPC75/10/Add.1, paragraph 3.5 on draft amendments to MARPOL Annex I to incorporate a prohibition on the use and carriage for use as fuel of heavy fuel oil by ships in Arctic waters. MEPC75/10/7
5. Det Norske Veritas AS, (DNV, 2011), "Report for PAME: Heavy Fuel in the Arctic"
6. Draft language for a ban of use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships in Arctic waters. PPR7/14/4
7. Impact assessment for a ban on heavy fuel oil use and carriage as fuel by ships in the United States Arctic. PPR7/14/3

8. Impact assessment on a ban on heavy fuel oil in Greenland. PPR7/Inf.11
9. Impacts of a ban on heavy fuel oil use and carriage as fuel by ships in the Norwegian Arctic waters. PPR7/Inf.14
10. Measures to reduce risks of use and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships in Arctic waters. MEPC71/14/4
11. Proposal for possible measures to reduce risks of use and carriage of HFO as fuel by ships in Arctic waters. MEPC72/11
12. Proposal to ban heavy fuel oil use and carriage as fuel by ships in Arctic waters. MEPC72/11/1
13. Report to the Marine Environment Protection Committee. PPR6/20
14. Report to the Marine Environment Protection Committee. PPR7/22
15. Results of the impact assessment carried out by the Russian Federation and proposed factors. PPR7/14/2
16. Use and carriage of heavy grade oil (HGO) on ships in the Antarctic Sea. BLG11/14/3
17. United Nations Convention on the Law of the Sea. Available at [https://www.un.org/Depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm](https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm) (accessed on 23.11.2020)
18. Ganeeva S.V., Krupin M.I., Ogly Novruzov B.R., Safronov A.V. *Ekonomicheskaya otsenka poter ot vvedeniya zapreta na ispolzovanie i perevozku tyazhelogo topliva kak topliva dlya sudov v arkticheskikh vodakh* [Economic Assessment of Financial Losses Resulting from the Ban on Use and Carriage of Heavy Fuel Oil For Ships in the Arctic]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 58/59, 2020. pp. 11 — 18

## **ОБОЗРЕНИЕ: ИТОГИ 76-Й СЕССИИ КОМИТЕТА ПО ЗАЩИТЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ ИМО**

Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) принял участие в 76-й сессии Комитета по защите морской среды ИМО (КЗМС 76), которая с 10 по 17 июня 2021 года проходила в дистанционном формате.

Работа сессии в основном была сфокусирована на принятии краткосрочных мер по снижению выбросов парниковых газов (ПГ) в международном судоходстве, а также поправок к обязательным инструментам ИМО. По итогам сессии приняты поправки к Приложению VI к МАРПОЛ в отношении технических и эксплуатационных мер по снижению ПГ, а также комплект соответствующих Руководств для их реализации.

Технические меры включают обеспечение соответствия установленному индексу энергоэффективности для существующих судов EEXI, а эксплуатационные — рейтинговой схеме применения показателя углеродной интенсивности (СИ) и усовершенствованному Плану управления энергоэффективностью судов (SEEMP). Данные меры вступают в силу с 1 января 2023 года.

Комитет также утвердил план дальнейших действий по разработке среднесрочных и долгосрочных мер. Для их рассмотрения, а также для завершения разработки Руководства по SEEMP и Руководства по исключениям и поправочным коэффициентам КЗМС учредил Корреспондентскую группу, которая будет вести переписку по данным вопросам до следующего заседания КЗМС, а также две межсессионные рабочие группы GHG 9 и GHG 10, заседание которых пройдут соответственно в сентябре и октябре 2021 года.

Кроме того, на 76-й сессии КЗМС приняты:

поправки к Приложению I МАРПОЛ в отношении запрета на использование тяжелого топлива и его перевозку в качестве топлива в Арктике (применяются с 1 июля 2024);

поправки к Приложениям I и VI МАРПОЛ, в отношении освобождений для несамоходных барж (UNSP) от требований по периодическим освидетельствованиям и сертификации, включая соответствующее Руководство (вступают в силу с 1 ноября 2022 года);

поправки к Международной Конвенции 2001 года о контроле за вредными противообрастающими системами на судах в отношении применения цибутрина в их составе и формы Свидетельства IAFSC (вступают в силу с 1 января 2023 года).

УДК 629.5.011; 629.562

## РАЗРАБОТКА ИЗМЕНЕНИЙ К ТРЕБОВАНИЯМ РС ПО ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЮ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕЖДУНАРОДНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

**А.А. Петров**, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru  
**Е.А. Морозова**, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: MorozovaEA@cniimf.ru  
**М.С. Шилкина**, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: ShilkinaMS@cniimf.ru  
**Д.С. Мостовщиков**, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,  
e-mail: mostovshchikov.ds@rs-class.org

В работе представлены результаты научно-исследовательской работы по разработке изменений к требованиям РС по освидетельствованию рыболовных судов на основе анализа международных нормативных документов (Council Directive 97/70 EC от 11.12.97 с поправками; Кейптаунского соглашения 2012 года, Торремолиносского протокола 1993 года, Торремолиносской МК по безопасности рыболовных судов 1977 года) и их сравнения с существующими положениями частей II «Спасательные средства», III «Сигнальные средства», IV «Радиоборудование» и V «Навигационное оборудование» Правил по оборудованию морских судов, разд. 18 части III «Дополнительные освидетельствования судов в зависимости от их назначения и материала корпуса» Правил классификационных освидетельствований судов в эксплуатации, части III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» Руководства по техническому наблюдению за судами в эксплуатации (в части, касающейся требований по освидетельствованию с учетом структуры требований чек-листа системы STORM, а также структуры резолюции ИМО А.1140(31)). Дополнительно был выполнен сбор и анализ информации о существующих требованиях к процедуре освидетельствования рыболовных судов из правил иных классификационных обществ и дополнительных требований морских администраций в отношении рыболовных судов.

**Ключевые слова:** *рыболовные суда, освидетельствование, Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации, Правила по оборудованию морских судов, Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации, система STORM*

## DEVELOPMENT OF AMENDMENTS TO RS REQUIREMENTS FOR SURVEY OF FISHING VESSELS BASED ON THE ANALYSIS OF INTERNATIONAL REGULATORY DOCUMENTS

**A.A. Petrov**, JSC CNIIMF, St. Petersburg, E-Mail: Petrov25@cniimf.ru  
**E.A. Morozova**, JSC CNIIMF, St. Petersburg, E-mail: MorozovaEA@cniimf.ru  
**M.S. Shilkina**, JSC CNIIMF, St. Petersburg, E-mail: ShilkinaMS@cniimf.ru  
**D.S. Mostovshchikov**, Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, E-Mail: mostovshchikov.ds@rs-class.org

The paper presents the results of research on the development of amendments to the RS requirements for survey of fishing vessels. The research is based on the analysis of international regulatory documents (Council Directive 97/70 EC of 11.12.97 with amendments; the Cape Town Agreement 2012, Torremolinos Protocol 1993, Torremolinos IC for the safety of fishing vessels of 1977) and their comparison with the existing requirements specified in Part II "Life-Saving Appliances", III "Signal Means", IV "Radio Equipment" and V "Navigational Equipment" of the Rules or the Equipment of Sea-Going Ships, Section 18, Part III "Additional Surveys of Ships depending on their Purpose and Hull Material" of the Rules for the Classification Surveys of Ships in Service, Part III "Survey of Ships in Compliance with International Conventions, Codes, Resolutions and Rules for the Equipment of Sea-Going Ships" of the Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service. In the latter case, the research has included the survey requirements taking into account the structure of the requirements of the STORM checklist, as well as those set out in IMO resolution A.1140(31). In addition, existing requirements have been collected and analyzed based on the fishing vessels survey requirements from rules of other classification societies. Additional requirements of Maritime Administrations for fishing vessels have also been taken into consideration.

**Keywords:** *fishing vessel, survey, Rules for the Classification Surveys of Ships in Service, Rules or the Equipment of Sea-Going Ships, Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service, STORM system*

## ВВЕДЕНИЕ

В нормативную базу Российского морского регистра судоходства (далее — РС) внедрены требования международных различных конвенций, которые, однако, либо не применяются к рыболовным судам, либо распространяются на них не в полной мере. Это ограничение связано с документированной областью применения конвенций.

В связи с этим Государственным комитетом РФ по рыболовству 25 мая 2020 года был издан приказ № 141 о применении ряда положений МК СОЛАС к рыболовным судам, построенным 1 июня 2002 года и после этой даты.

В международной морской практике известны инструменты, направленные на повышение безопасности эксплуатации рыболовных судов, например, содержащиеся в приложениях к Council Directive 97/70 EC (далее — Директива) или в материалах Кейптаунского соглашения 2012 года, принятого на международной конференции под эгидой ИМО (далее — Соглашение). При этом Соглашение до настоящего времени так и не вступило в силу, а Директива предназначена только для судов, совершающих заходы в порты ЕС.

Вместе с тем, основные положения упомянутых инструментов могут служить базой как для уточнения существующих требований РС к конструкции и оборудованию рыболовных судов, так и к объему их освидетельствований.

Поскольку класс РС присвоен значительному количеству рыболовных судов, корректировка нормативных документов (далее — НД) РС с целью их гармонизации с международными инструментами является востребованной и практически значимой задачей. Для ее решения АО «ЦНИИМФ» по заказу РС выполнило научно-исследовательскую работу (далее — НИР), в результате которой разработан проект изменений и дополнений к разд. 18 части III «Дополнительные освидетельствования судов в зависимости от их назначения и материала корпуса» Правил классификационных освидетельствований судов в эксплуатации (далее — ПКЭСЭ), к частям II «Сигнальные средства» и IV «Радиооборудование» Правил по оборудованию морских судов (далее — ПОМС) и части III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» Руководства по техническому наблюдению за судами в эксплуатации (далее — РТНСЭ).

## 1. ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИХ БЕЗОПАСНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ

Несмотря на то, что положения СОЛАС не распространяются на рыболовные суда, в мире существует ряд международных инструментов, требования которых регламентируют возможность эксплуатации и ведут к повышению безопасности мореплавания рыболовных судов.

В 1977 году были опубликованы документы Торремолиносской МК, отвечающей указанным целям. Конвенция применялась к рыболовным судам длиной 24 м и более, а некоторые ее положения — к судам длиной не менее 45 м. Торремолиносская МК не вступила в силу, так как некоторые положения вызвали у ряда государств трудности в их осуществлении.

В 1993 году был принят Протокол к Торремолиносской МК, внесший в нее ряд изменений и дополнений. При этом было постановлено, что Протокол вступит в силу при условии, что не менее 15 государств, рыболовный флот которых, включая суда длиной 24 м и более, в совокупности составит не менее 14000 единиц. В настоящее время Протокол ратифицирован 17 странами, имеющими в совокупности приблизительно 3000 таких судов.

Несмотря на статус документа ИМО, Протокол предусматривает возможность использования региональных стандартов безопасности для рыболовных судов, эксплуатирующихся в одном и том же районе. Основываясь на этом, в 1993 году ЕС разработал региональный стандарт, учитывающий климатические и эксплуатационные особенности территориальных вод Европы. Одной из причин такой инициативы стало то, что некоторые главы Протокола применяются только к рыболовным судам длиной 45 м и более, тогда как длина большинства из них, эксплуатирующихся под флагом ЕС, лежит в диапазоне 24 — 45 м. Аргументы о необходимости создания регионального стандарта были весомыми, поэтому в 1997 году Советом ЕС была принята Директива ЕС [1].

В 2012 году ИМО были рассмотрены предложения об уточнении некоторых статей Протокола и подписано Соглашение об осуществлении его положений [2]. К Соглашению прилагалась консолидированная редакция Торремолиносской МК с изменениями, внесенными Протоколом, а также новыми положениями и

указаниями. В частности, были установлены другие интервалы между освидетельствованиями, предложено проводить ежегодное освидетельствование всех элементов судна и обязательное промежуточное — для конструкций и механизмов.

Стороны условились, что Соглашение вступит в силу, когда 22 государства, рыбопромысловый флот которых в совокупности составляет не менее 3600 эксплуатирующихся в открытом море судов длиной 24 м и более, подтвердят согласие на его обязательность для них.

На сегодняшний день совокупный флот рыболовных судов длиной 24 м и более, эксплуатирующихся в море под флагами 11 стран, ратифицировавших Соглашение (Бельгия, Конго, Дания, Франция, Германия, Испания, Исландия, Нидерланды, Норвегия, Сент-Китс и Невис и Южно-Африканская республика), составляет 1413 единицы.

Отличия между описанными международными инструментами по безопасности рыболовных судов (далее — МИБРС) проиллюстрированы на рис. 1.

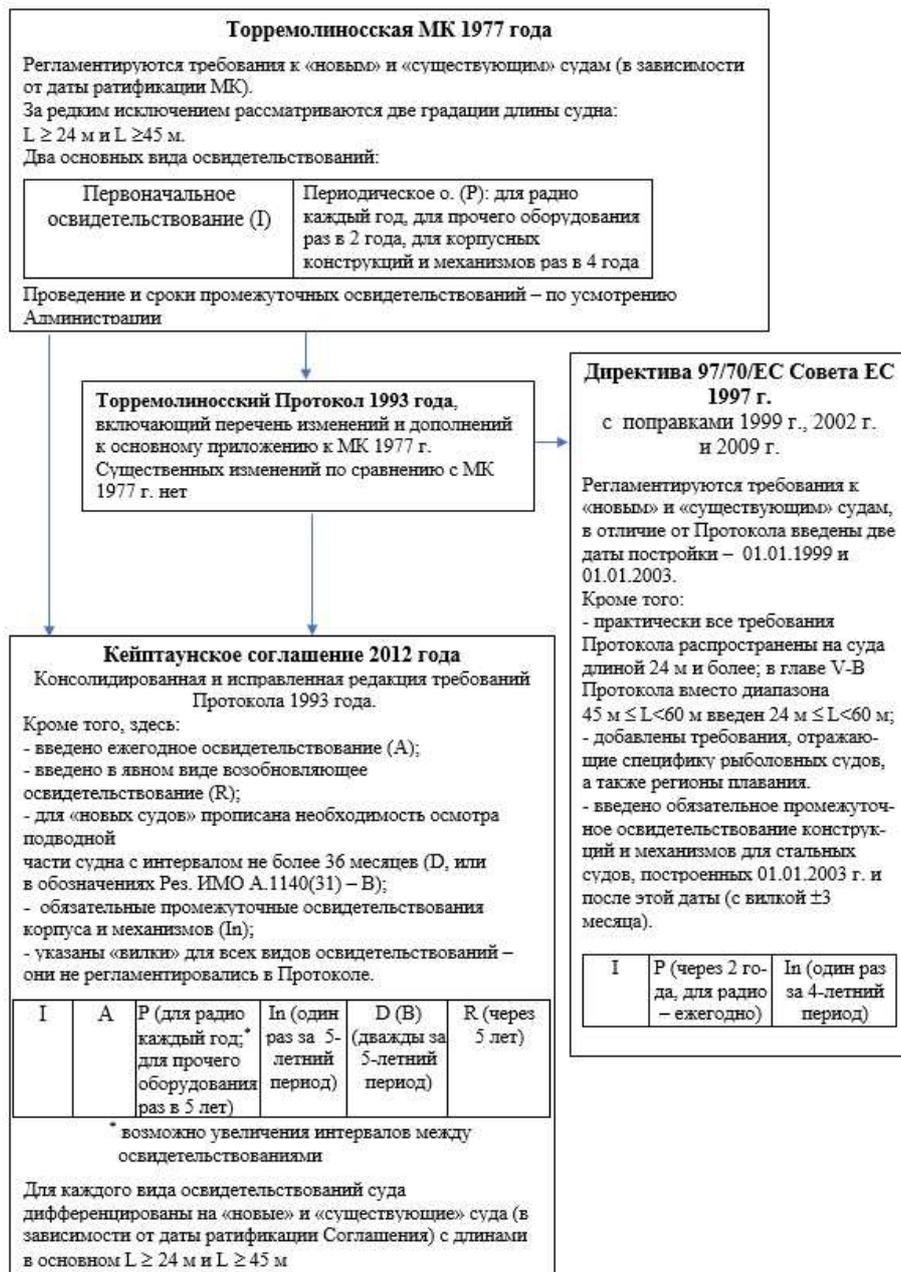


Рис. 1 Основные отличия в структуре МИБРС

## 2. АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

В рамках НИР был выполнен анализ требований к процедуре освидетельствования рыболовных судов некоторых иностранных классификационных обществ (далее – ИКО), входящих в МАКО, а именно: Lloyd's Register, Det Norske Veritas, Bureau Veritas, American Bureau of Shipping, Nippon Kaiji Kyokai, Korean Register of Shipping and China Classification Society. Данный анализ позволили сделать следующие выводы:

- рассмотренные разделы правил по освидетельствованию судов имеют общий характер и универсальны по отношению ко всем типам судов, за исключением тех, для которых требуется программа расширенного освидетельствования (ESP).

- в правилах освидетельствования ИКО отсутствуют какие-либо специфические требования Соглашения, равно как и упоминание Соглашения в качестве источника для формирования правил.

Дополнительно были проанализированы требования к рыболовным судам морских администраций следующих стран: Финляндия, Норвегия, Дания, Германия, Великобритания, Либерия, Панама, Исландия, США.

Финляндия, Дания, Германия, Исландия, входящие в состав ЕС, а также Великобритания, не имеют своих собственных правил, регламентирующих постройку и эксплуатацию рыболовных судов, и используют правила признанных классификационных обществ.

С 1997 года морские администрации стран ЕС используют единый региональный стандарт — Директиву 97/70/ЕС. Однако в некоторых государствах (в Финляндии, Германии, Дании, а также Великобритании) наряду с Директивой применяются дополнительные требования.

## 3. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗОЛЮЦИИ А.1140(31) В КАЧЕСТВЕ ШАБЛОНА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТРЕБОВАНИЙ РС

При подготовке предложений по корректировке РТНСЭ с РС первоначально был согласован подход, аналогичный использованному в 2.1 части III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» РТНСЭ в редакции 2018 года, где приводились весьма подробные указания для инспектора в процессе освидетельствований. В действующем РТНСЭ перечисление проверок и испытаний отсутствует, что стало возможным и целесообразным после появления резолюции ИМО А.1120(30) «Руководство по освидетельствованиям в соответствии с гармонизированной системой освидетельствования и оформления свидетельств (ГСОС)», ссылки на которое как раз и исключили необходимость расписывать действия инспектора.

В 2020 году вступила в силу резолюция ИМО А.1140(31), незначительно уточнившая и заменившая указанную выше. Анализ требований, содержащихся в обеих резолюциях (далее — Руководство ГСОС), показал, что они, как правило, соответствуют формулировкам, содержащимся в РТНСЭ 2018 года.

В Руководство ГСОС включены несколько приложений, в которых перечислены указания по освидетельствованиям судов применительно к различным международным конвенциям. Приложение 1 посвящено СОЛАС и состоит из разделов, отражающих требования к определенным группам объектов: оборудованию, конструкции, радиоустановкам грузовых судов, а также ко всем элементам пассажирских судов. Каждый из разделов описывает разные виды освидетельствований, вплоть до возобновляющего с получением соответствующего Свидетельства о безопасности.

Поскольку Регистром ставилась задача разработки требований для оформления существующих свидетельств о безопасности рыболовных судов (ф. 2.5.7, ф. 2.5.1, ф. 2.5.1-1), в которых фиксируется техническое состояние всех групп объектов, было принято решение принять за основу разд. 5 приложения 1 Руководства ГСОС, посвященный пассажирским судам, в котором реализован такой подход. При этом в новые главы РТНСЭ помещены общие положения об освидетельствованиях, специфичные для различных МИБРС, а перечень необходимых проверок и испытаний вынесен в специальное приложение.

#### 4. КОРРЕКТИРОВКА ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Освидетельствование судна, как строящегося, так и находящегося в эксплуатации — комплексная задача, для решения которой используются различные правила и руководства. Исходя из этого в 1.8.4 части III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» РТНСЭ процедура первоначального освидетельствования разбита на три составляющих, указанных на рис. 2.

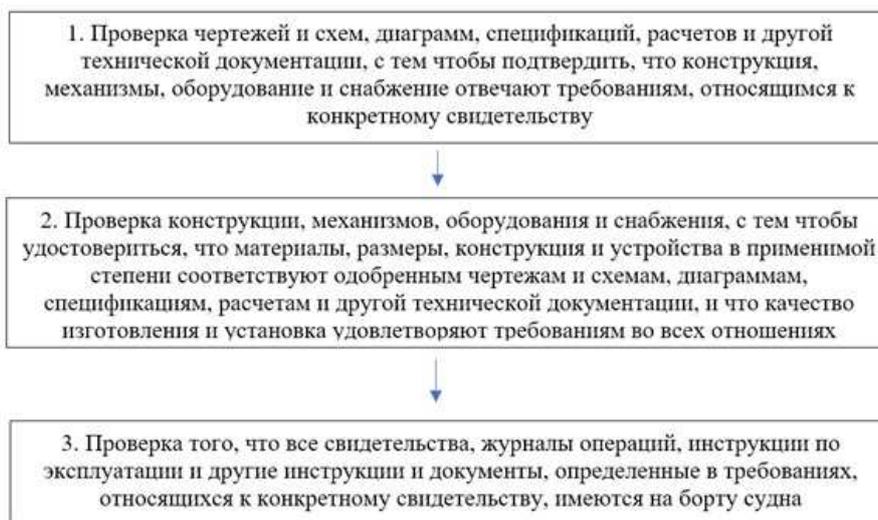


Рис. 2 Процедура первоначального освидетельствования

Мероприятия, указанные в первом блоке, должны быть выполнены в первую очередь, до непосредственного освидетельствования соответствующих объектов на судне инспектором РС. Поскольку требуемая нормативная база для их реализации применительно к рыболовным судам отсутствует, а необходимость внедрения МИБРС в НД РС в явном виде на данный момент не подтверждена, представляется целесообразным сделать обязательным предоставление в РС «Анализа соответствия рыболовного судна требованиям МИБРС», включающего в себя проверку, указанную в 1.8.4.1 части III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» РТНСЭ. Целесообразность данного требования подтверждена в отзыве на результаты НИР, полученном от Дальневосточного филиала РС. Подобный документ, устанавливающий связь между проектной документацией и требованиями МИБРС, существенно упростит процесс первоначального освидетельствования.

##### ***Предложения по корректировке Правил классификационных освидетельствований судов в эксплуатации***

Действующие требования Правил классификации и постройки морских судов применительно к рыболовным судам не в полной мере гармонизированы с требованиями МИБРС, а необходимость и возможность такой гармонизации составляют предмет отдельного исследования.

Поскольку ПКЭС регламентируют требования к освидетельствованию судов на соответствие Правилам РС, было решено сохранить процедуру освидетельствования с целью выдачи Свидетельства 3.1.2 прежней, добавив в разд. 18 части III «Дополнительные освидетельствования судов в зависимости от их назначения и материала корпуса» ПКЭС специфические объекты освидетельствования из МИБРС, свойственные в большей степени рыболовным судам. К таким объектам были отнесены: деревянные крышки люков (правило II/5 Соглашения) и съемные переборки рыбных трюмов (правило III/11 Соглашения).

### ***Предложения по корректировке Правил по оборудованию морских судов***

В соответствии с предложением РС при корректировке ПОМС рассматривались только требования Соглашения, как наиболее современного из МИБРС. При этом одной из главных задач была их гармонизация с действующими требованиями РС и исключение дублирования. Учитывая это, был принят следующий порядок корректировки ПОМС:

- если требования Соглашения совпадают по формулировкам и/или по смыслу с существующими требованиями ПОМС для грузовых судов, их действие предложено распространить и на рыболовные суда;
- если требования Соглашения отсутствуют в ПОМС либо значительно отличаются от аналогичных требований ПОМС для грузовых судов, в ПОМС предлагается добавить новые правила специально для рыболовных судов.

В результате в существующую главу 5.1 «Рыболовные суда» части II «Спасательные средства» ПОМС внесены корректировки, уточнены требования 5.1 для спусковых устройств рыболовных судов; добавлены требования для коллективных спасательных средств в главы 6.8 («Спасательные плоты»), 6.13 («Спасательные шлюпки») и 6.14 («Частично закрытые спасательные шлюпки»).

При сравнении положений Соглашения и частей IV «Радиооборудование» и V «Навигационное оборудование» ПОМС касательно радиооборудования и навигационного оборудования определено, что различий в требованиях к эксплуатационно-техническим и функциональным характеристикам практически нет (добавлено лишь указание по обязательной комплектации рыболовных судов длиной более 45 м приемником службы НАВТЕКС).

### ***Предложения по корректировке Руководства по техническому наблюдению за судами в эксплуатации***

Как отмечалось выше, в часть III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» РТНСЭ предложено добавить новые главы (2.8, 2.9 и 3.4), последняя из которых посвящена Директиве 97/70/ЕС и помещена в отдельный раздел «Конвенции, кодексы и другие документы международных организаций иных, чем ИМО»; подробные описания проверок и испытаний вынесены в специальное Приложение 55.

При корректировке РТНСЭ, а также при разработке Приложения 55 были учтены различия МИБРС между собой (см. выше рис. 1), из которых особо следует отметить понятия «нового» и «существующего» судна.

В Соглашении и Протоколе определение указанных терминов зависит от даты вступления в силу МИБРС. Следовательно, к настоящему времени под определение «новое судно» формально не попадает ни одно строящееся или даже проектируемое судно. Однако, имея в виду предстоящее вступление Соглашения в силу, в работе предусмотрено разделение на «новые» и «существующие» суда.

В Директиве понятие «новое судно» привязано к двум определенным датам, одна из которых — 01.01.1999 — включена в главе 3.4 части III «Освидетельствование судов в соответствии с международными конвенциями, кодексами, резолюциями и правилами по оборудованию морских судов» РТНСЭ в определение «нового судна», другая — 01.01.2003, если необходимо, используется в Приложении 55 в явном виде.

Кроме того, Протокол и Директива не предусматривают «ежегодных» освидетельствований — только «периодические»; в указанных МИБРС отсутствуют прямые указания о необходимости проверки подводной части судна за период между получениями Свидетельства (Сертификата) о безопасности, причем указанный период сокращен с 5 до 4 лет.

## **5. ПОДГОТОВКА ТАБЛИЦ STORM**

Для всех объектов освидетельствования подготовлены таблицы, адаптированные для внесения в систему STORM [3], с помощью которой инспекторский состав РС непосредственно выполняет освидетельствование. Всего подготовлено 845 таблиц, включающих:

- наименование объекта освидетельствования;
- ссылки на требования МИБРС;
- комментарий для инспектора, составленный на основе соответствующих формулировок РТНСЭ;
- объем работы, в соответствии с таблицами п. 2.1.1 части II «Периодичность и объемы освидетельствований» ПКЭСЭ;
- специализация инспектора;
- условия применимости требования, такие как длина по МК, дата постройки, валовая вместимость и т.п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной НИР предложены корректировки и дополнения в следующие действующие НД РС:

- Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации;
- Правила по оборудованию морских судов;
- Руководство по техническому наблюдению судов в эксплуатации.

Стоит отметить роль других специализированных и заинтересованных организаций в достижении основной цели НИР. Полученные отзывы от Дальневосточного, Калининградского и Мурманского филиалов РС, а также ФГБОУ ВО «ДВФУ», в которых содержится ряд практически ценных и значимых комментариев и предложений, учтены авторами при разработке проектов НД.

Результаты НИР, представленные в виде проектов изменений и дополнений к существующим НД РС, могут быть введены в нормативную базу РС в установленном порядке и адаптированы для совершенствования системы STORM в части освидетельствования рыболовных судов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Council Directive 97/70/EC of 11 December 1997 with amended 1999, 2002 and 2009.
2. The Cape Town Agreement on the implementation of the provisions of the Torremolinos Protocol of 1993 relating to the Torremolinos International Convention for the Safety of Fishing vessel, 1997.
3. Российский морской регистр судоходства внедрил систему управления технаблюдением за судами STORM [Электронный ресурс] / Информационно-аналитическое агентство «ПортНьюс». URL: <https://www.en.portnews.ru/news/print/52460/> (дата обращения: 02.11.2020).

## REFERENCES

1. Council Directive 97/70/EC of 11 December 1997 with amended 1999, 2002 and 2009.
2. The Cape town Agreement on the implementation of the provisions of the Torremolinos Protocol of 1993 relating to the Torremolinos International Convention for the Safety of Fishing vessel, 1997.
3. Russian Maritime Register of Shipping has implemented STORM system to manage ship surveys [Web resource] / Information Agency "PortNews". URL: <https://www.en.portnews.ru/news/print/52460/> (accessed on: 02.11.2020).



## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.12

### РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС ОДОБРЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СУДОВ И СИСТЕМ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СУДОВ

**В.В. Ефимов**, канд. техн. наук, АО «Кронштадт Технологии», Санкт-Петербург,  
e-mail: Viktor.Efimov@krontech.ru

В статье приводится описание процесса, целью которого — объективно подтвердить, что безопасность применения автономного судна и/или системы в составе автономного судна не ниже безопасности применения традиционного судна, которое соответствует действующим требованиям РС. Под автономными судами понимаются суда различной степени автономности по классификации Международной морской организации (ИМО), включая дистанционно управляемые, представленные разработчиками на присвоение специального знака автономного судна в символ класса. Оценка риска применения автономных судов опирается на решения и рекомендации ИМО, опыт Международной ассоциации классификационных обществ, а также на международные стандарты и их российские аналоги. Процесс охватывает этапы жизненного цикла автономных судов от разработки концепции до эксплуатации, в которых предполагается участие и требуется одобрение или освидетельствование РС. Для каждого этапа жизненного цикла определены необходимые действия разработчика, рекомендации по их выполнению и взаимодействию с Регистром. Последовательность этих действий представлена для наглядности в виде схем на языке графического моделирования процессов BPMN. Риск-ориентированный процесс предлагается использовать РС для одобрения и освидетельствования автономных судов и систем для автономных судов, что должно обеспечить доверие к безопасности их применения.

*Ключевые слова: автономное судно, система автономного судна, безопасность применения, оценка риска, этапы жизненного цикла, классификационное общество, процесс одобрения и освидетельствования*

### RISK-BASED APPROVAL FOR AUTONOMOUS VESSELS AND SYSTEMS FOR AUTONOMOUS VESSELS

**V.V. Efimov**, PhD, JSC "Kronstadt Technologies" JSC, St. Petersburg,  
e-mail: Viktor.Efimov@krontech.ru

The article describes a process that aims to confirm that the use of an autonomous vessel and/or system as part of an autonomous vessel provides a level of safety not lower than that of a conventional vessel complying with the requirements of the existing RS rules. Autonomous vessels are understood to be vessels of various degrees of autonomy according to the classification of the International Maritime Organization (IMO), including remotely operated vessels submitted by developers for assignment of a special distinguishing mark of an autonomous vessel to the class notation. The risk assessment of autonomous vessels is based on IMO decisions and recommendations, the experience of the International Association of Classification Societies, as well as international standards and their Russian counterparts. The process covers the stages in the life cycle of autonomous vessels, from concept development to commissioning and operation, in which participation is expected and approval or certification by the Register is required. For each

stage of the life cycle, the necessary developer actions, recommendations for their implementation and interaction with RS have been defined. The sequence of these actions has been presented for clarity in the form of diagrams using the BPMN graphical language. The risk-based process is proposed to be used by RS for approval and inspection of autonomous vessels and systems for autonomous vessels, which should ensure confidence in the safety of their use.

**Keywords:** *autonomous vessel, system for autonomous vessel, application safety, risk assessment, life cycle stages, classification society, approval and inspection process*

## ВВЕДЕНИЕ

Технологическое развитие судовых автоматизированных систем позволило сократить численность экипажа без ухудшения показателей эффективности использования судов. Стремительное расширение возможностей по сбору, обработке информации, развитие технологий искусственного интеллекта и цифровой радиокommunikации на море в будущем приведут к появлению дистанционно управляемых или полностью автономных судов без экипажа, что будет способствовать улучшению экологических показателей и обеспечению более экономичного судоходства. Основная проблема внедрения новых технологий состоит не только в обеспечении их работоспособности, но и в обеспечении безопасной эксплуатации судна.

В статье предлагаются описание и рекомендации по выполнению процесса, цель которого — подтвердить, что применение автономного судна и/или системы в составе автономного судна обеспечивает уровень безопасности не ниже традиционного судна, спроектированным и эксплуатируемым в соответствии с существующими правилами и нормами Российского морского регистра судоходства (РС). Этот процесс основан на оценке риска, что является частью процесса менеджмента риска, и распространяется на все этапы жизненного цикла автономного судна, в которых предполагается участие РС.

Далее под автономными судами понимаются суда различной степени автономности по классификации Международной морской организации (International Maritime Organization — IMO), включая дистанционно управляемые, представленные на присвоение специального знака автономного судна в символ класса. Под системами для автономных судов понимаются системы, степень новизны которых превышает существующие требования РС для присвоения знаков **AUT**, **ICS** или **OMVO** в символе класса.

В описании риск-ориентированного процесса одобрения автономных судов и систем для автономных судов используются термины и определения, не противоречащие ГОСТ Р 57193-2016 [1], ГОСТ Р 51897-2011[2] и ГОСТ 27.002-2015 [3].

## 1. ОБЩАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА

Разработчики автономных судов и систем могут руководствоваться различными методологиями. Эти методологии включают этапы жизненного цикла создаваемой продукции и являются систематизированной совокупностью шагов, определяющих процессы взаимодействия заинтересованных сторон по созданию и эксплуатации продукции. Сравнение различных методологий показывает, что названия этапов работ и процессов отличаются, но содержание и решаемые задачи на них сопоставимы. Поэтому в описании приняты наиболее общие названия этапов жизненного цикла: разработка концепции, проектирование, изготовление и ввод в действие, эксплуатация.

Общая схема процесса с разделением на эти этапы представлена на рис. 1. В табл. 1 приведены названия элементов этой и последующих схем, согласно графическому языку моделирования процессов BPMN. Все схемы, помимо разделения на этапы жизненного цикла, разделены на три вертикальные дорожки — пулы, объединяющие подпроцессы оценки риска применения судов, оценки риска систем и технического наблюдения РС. Выполнение подпроцессов из первых двух пулов является ответственностью разработчика судна или системы. Подпроцессы из третьего пула — ответственность Регистра.

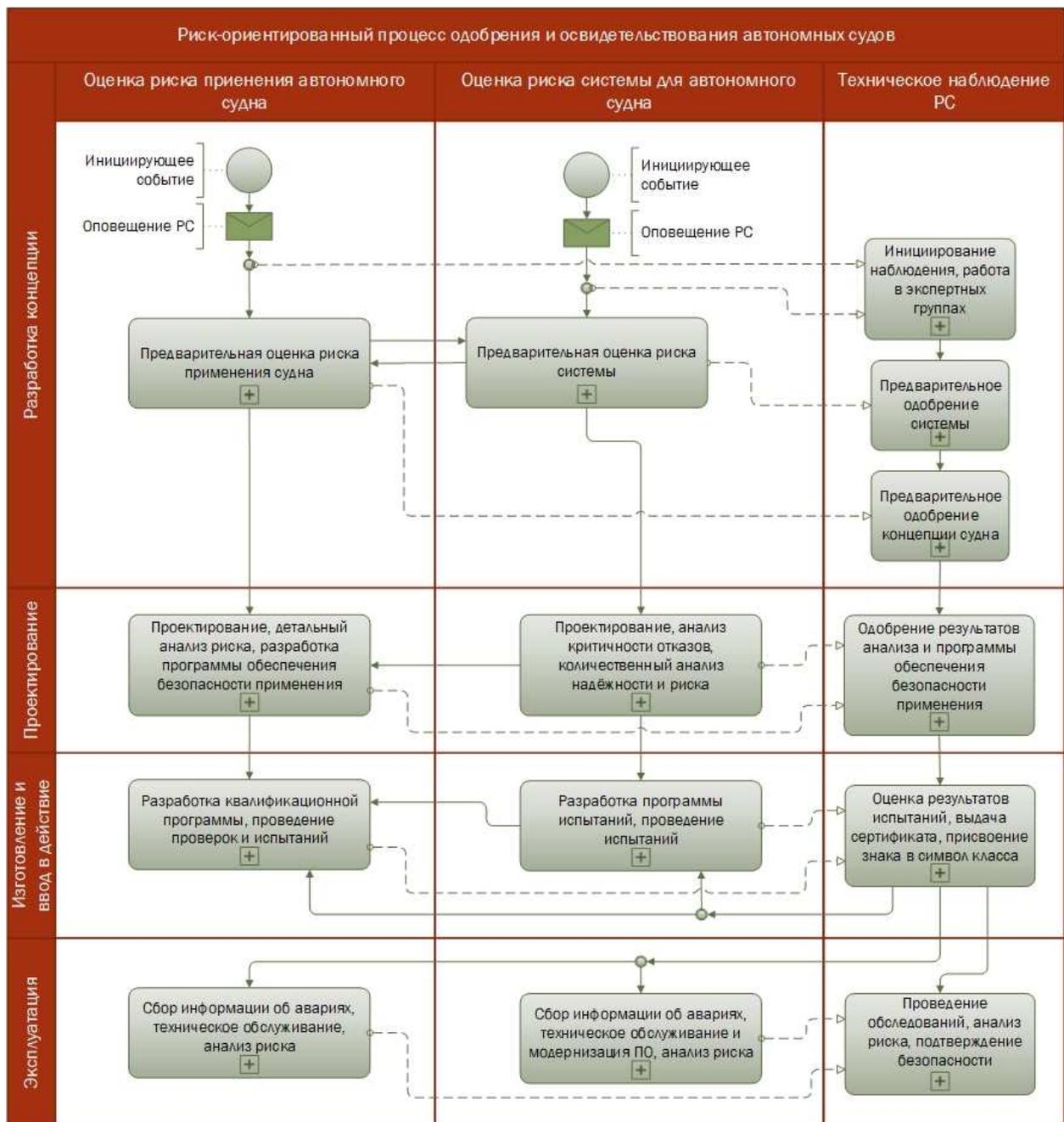
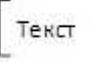


Рис. 1 Общая схема процесса одобрения и освидетельствования автономных судов и систем для автономных судов

Таблица 1

## Графические символы языка моделирования процессов

	— начальное событие		— промежуточное событие
	— свернутый подпроцесс		— развернутый подпроцесс
	— поток управления		— поток сообщений
	— задача		— хранилище данных
	— сообщение		— шлюз
	— примечание		— группа
	— завершающее событие		— объект данных

## 2. ЭТАП РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ

Схема процесса одобрения и освидетельствования автономных судов и систем для автономных судов с развернутыми подпроцессами для этапа разработки концепции представлена на рис. 2.

Особенностью схемы является наличие двух начальных событий, названных иницирующими. В отношении автономного судна таким событием может быть запрос или другой вид заинтересованности будущего судовладельца, инициатива разработчика или государственной структуры. В этом случае подпроцессы оценки риска применения судна и систем для него выполняются параллельно и согласованно.

В случае, если иницируется создание только системы для автономного судна, например, исключительно по инициативе разработчика, могут выполняться только подпроцессы оценки риска этой системы. В обоих случаях требуется оповещение о начале разработки и согласование с Регистром дальнейших действий. Далее приводятся рекомендации по выполнению задач из этих подпроцессов.

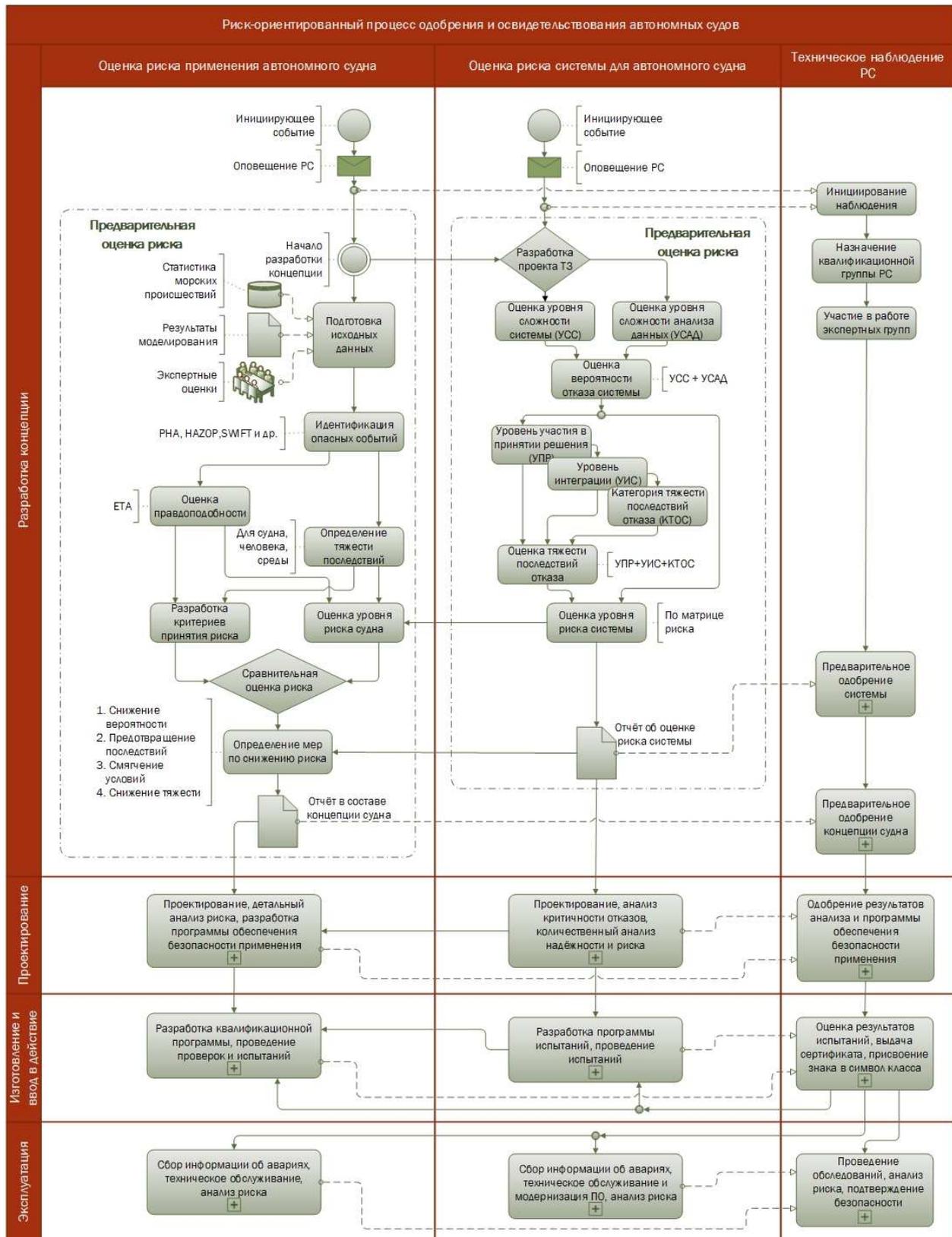


Рис. 2 Схема процесса с развернутыми подпроцессами для этапа разработки концепции

## 2.1 Оценка риска применения автономных судов на этапе разработки концепции

На этапе разработки концепции автономного судна должна быть выполнена предварительная оценка риска применения судна. Концепция должна определять факторы, принимаемые к учету при проектировании. К числу этих факторов должны быть отнесены, как минимум: категория судна, судовые системы или функции, районы эксплуатации и обслуживания судов, предельные условия эксплуатации, внешние коммуникации судна, опасности с их потенциальными последствиями.

На основании принятых решений должна быть выполнена подготовка исходных данных для предварительной оценки риска. В их число входят статистические данные о соответствующих авариях и инцидентах, а также данные о надежности систем и оборудования. Могут использоваться экспертные оценки, физические модели, численное моделирование и данные других отраслей промышленности, которые можно было бы использовать в качестве справочных.

Для получения информации о статистике морских аварий и инцидентов рекомендуется воспользоваться известными базами данных (см. табл. 2).

Таблица 2

**Рекомендуемые базы данных морских происшествий**

База данных	Адрес информационного ресурса	Доступ
Marine Casualties and Incidents	<a href="https://gisis.imo.org/Public/Default.aspx">https://gisis.imo.org/Public/Default.aspx</a>	Свободный
Marine Accident Investigation Branch (MAIB) reports	<a href="https://www.gov.uk/maib-reports">https://www.gov.uk/maib-reports</a>	Свободный
Marine Accident Reporting Scheme (MARS) reports	<a href="https://www.nautinst.org/resource-library/mars/mars-reports.html">https://www.nautinst.org/resource-library/mars/mars-reports.html</a>	Свободный
Marine Accident Reports (National Transportation Safety Board NTSB)	<a href="https://ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/marine.aspx">https://ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/marine.aspx</a>	Свободный
IHS Markit Casualty and Events	<a href="https://ihsmarkit.com/products/casualty-and-events.html">https://ihsmarkit.com/products/casualty-and-events.html</a>	Платный

Подготовленные исходные данные должны быть подвергнуты всестороннему анализу. Целью анализа является ранжирование рисков применения автономного судна, исходя из его предназначения. Его рекомендуется выполнить следующим образом.

### **Шаг 1. Идентификация опасных событий**

В зависимости от ранее принятого решения о подготовке исходных данных, их объема и глубины, можно выбрать один или более методов идентификации, представленных в ISO/IEC 31010:2019 [12] и ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010:2011 [13]. В результате должен быть определен конечный список опасных событий с описанием порядка идентификации, описанием самих событий, условий возникновения, источников опасности, количественными и/или качественными характеристиками правдоподобности. К числу этих событий могут быть отнесены, например, столкновение, посадка на мель, навал, пожар/взрыв, затопление, опрокидывание, получение опасного крена, повреждение корпуса, повреждения оборудования, потеря управления, пиратство, исчезновение по неизвестной причине.

Если в качестве исходных данных использовалась информация о ранее произошедших морских происшествиях, то результат идентификации опасных событий рекомендуется представлять в табличном виде (см. табл. 3).

Таблица 3

**Пример представления результатов идентификации опасных событий**

Период с ... по .... Всего = ...лет. Количество судов в эксплуатации в течение всего периода = ...		
Опасное событие	Количество событий за период	Частота события (для одного судна за год)

Полученные вероятности могут использоваться как начальные при анализе дерева событий на следующем шаге.

### Шаг 2. Оценка правдоподобности опасных событий

Задачей этого шага анализа является построение сценариев опасных событий и количественная и/или качественная оценка их правдоподобности. Оценку правдоподобности рекомендуется выполнять путем построения дерева событий, по аналогии с методом анализа дерева событий (ETA) по стандарту IEC 62502:2010 [14]. В качестве начальных событий принимаются опасные события, идентифицированные на первом шаге с их вероятностями. Далее перечисляют сопутствующие события, условия возникновения опасностей, результаты опасных событий так, чтобы они сформировали цепочки — сценарии событий, характеризуемые каждой своим значением вероятности, правдоподобности. Звеньями этих цепочек могут быть, например, районы возникновения опасных событий, этапы функционирования судна, источники опасности.

Последними звеньями сценарных цепочек рекомендуется сделать события, к которым может привести (привели в прошлом) первоначальные опасные события. Эти конечные события должны характеризовать вред, который возможен в случае реализации каждого из полученных сценариев. По рекомендации ИМО рассматриваются три категории вреда: ущерб или урон здоровью людей, ущерб от повреждения судна, ущерб окружающей среде.

В результате должны быть сформированы сценарии возникновения опасных событий с количественной и/или качественной оценкой их правдоподобности. С этой целью рекомендуется использовать предложенную ИМО таблицу частоты возникновения событий (см. табл. 4), в которой приводится соответствие между количественными и качественными характеристиками и вводятся индексы частоты.

Таблица 4

**Качественные и количественные показатели частоты событий**

Определение частоты события	Для одного судна за год		Индекс
	Качественный показатель	Количественный показатель	
Один раз в месяц на одном судне	Часто	10	7
Один раз в год на одном судне	Иногда	1	6
Один раз в год на флотилии из десяти судов или несколько раз за время жизни одного судна	Очень возможно	0,1	5
Один раз в год на флотилии из 100 судов	Возможно	10 <sup>-2</sup>	4
Один раз в год на флотилии из 1000 судов или в течение жизни нескольких однотипных судов	Вероятно	10 <sup>-3</sup>	3
Один раз за время жизни (20 лет) флотилии из 500 судов	Маловероятно	10 <sup>-4</sup>	2
Один раз за время жизни (20 лет) флотилии из 5000 судов	Крайне маловероятно	10 <sup>-5</sup>	1

### Шаг 3. Определение тяжести последствий опасных событий

Для оценки тяжести последствий каждого из сценариев, в соответствии с рекомендацией ИМО, должны быть рассмотрены три группы: последствия для людей, судна и окружающей среды. Количественные оценки последствий и соответствующие им словесные характеристики, а также значения индексов для этих групп представлены в табл. 5 — 7.

Таблица 5

**Показатели тяжести последствий для людей**

Определение последствия	Качественный показатель	Эквивалентные жертвы	Индекс
Единичные или незначительные травмы	Незначительные	0,01	1
Многочисленные или значительные травмы	Серьезные	0,1	2
Одна жертва или многочисленные значительные травмы	Тяжелые	1	3
Многочисленные жертвы	Катастрофические	10	4

Таблица 6

**Показатели тяжести последствий для судна**

Определение последствия	Качественный показатель	Эквивалентные повреждения	Индекс
Локальное повреждение оборудования	Незначительные	0,01	1
Незначительное повреждение судна	Серьезные	0,1	2
Значительное повреждение судна	Тяжелые	1	3
Полная потеря	Катастрофические	10	4

Таблица 7

## Показатели тяжести последствий для окружающей среды

Определение последствия	Качественный показатель	Эквивалентный разлив нефти или химических веществ	Индекс
Локальный разлив	Незначительные	< 1 тонны	1
Значительный локальный разлив	Серьезные	1 — 100 тонн	2
Серьезный крупный разлив	Тяжелые	100 — 10000 тонн	3
Очень большой разлив	Катастрофические	> 10000 тонн	4

В результате каждый из опасных сценариев, определенных на шаге 2, должен получить характеристику тяжести последствий для людей, судна и окружающей среды.

**Шаг 4. Оценка уровня риска**

На этом шаге должна быть получена количественная или качественная характеристика уровня риска каждого опасного сценария, определяемая вероятностью сценария и тяжестью его последствий. Рекомендуется оценивать уровень риска с помощью индекса риска путем сложения индексов частоты и тяжести последствий для каждой из трех групп последствий. Пример приведен в табл. 8.

Таблица 8

## Показатели степени риска (примеры)

Опасное событие	Сценарий (номер)	Индекс частоты	Индекс тяжести			Индекс риска		
			Человек	Судно	Среда	Человек	Судно	Среда
Столкновение	1	3	1	4	1	4	7	4
	2	4	2	2	1	6	6	5
	...							
	<i>n</i>	7	2	2	1	9	9	8
Пожар	1	4	1	4	2	5	8	6
	2	2	1	4	2	3	6	4
	...							
	<i>m</i>	1	2	3	3	3	4	4

**Шаг 5. Сравнительная оценка рисков**

Сравнительную оценку рисков всех опасных сценариев рекомендуется выполнять путем их ранжирования, например, упорядочивая по убыванию значений индексов риска или других количественных/качественных характеристик уровня риска. В результате должен быть сформирован список, в котором сценарии, имеющие начальными различными опасные события, сгруппированы по уровням риска. Рекомендуется сформировать три списка ранжированных сценариев: по тяжести последствий для людей, судна и окружающей среды.

Разработчик должен обосновать и предложить критерии риска для определения его приемлемости, применительно ко всем трем ранжированным спискам сценариев. В результате сравнения уровня риска с критерием риска для каждого сценария должны быть обоснованы решения о принятии или непринятии риска в процессе дальнейшей разработки автономного судна. Для всех сценариев, у которых определено неприятие риска, должны быть предложены меры по его снижению.

Определение мер по снижению рисков завершает предварительную оценку риска на этапе разработки концепции автономного судна. Меры по снижению риска должны быть направлены на достижение одного или нескольких следующих результатов:

- снижение вероятности риска в процессе проектирования, технической реализации, эксплуатации, обслуживания, обучения специалистов;
- предотвращение последствий риска путем, например, предотвращения опасных событий;
- смягчения условий возникновения риска;
- снижения тяжести последствий опасных событий.

Предлагаемые меры по снижению риска могут быть сгруппированы по достигаемым результатам или по этапам жизненного цикла автономного судна, на котором они должны быть реализованы. При этом следует учесть возможное влияние мер на достижение не одного, а сразу нескольких результатов и на их взаимное

влияние. Итоговый перечень мер по снижению рисков должен найти отражение в концепции применения автономного судна.

Разработчик должен принять решение о том, какие из функций, связанные с мерами по снижению рисков, которые традиционно выполнялись экипажем, будут выполняться либо путем дистанционного управления, либо автоматически. Иными словами, предварительная оценка риска должна заканчиваться конкретными решениями по снижению риска применения автономного судна и определением степени автоматизации.

Результаты предварительного анализа риска, включая описание всех шагов, используемых методов, исходных данных, принятых решений, и концепция применения предъявляются разработчиком для получения предварительного одобрения РС и подлежат итерационному рассмотрению и корректировке в процессе оценки риска на следующих этапах жизненного цикла автономного судна.

## 2.2 Оценка риска системы для автономного судна на этапе разработки концепции

Разработка концепции системы для автономных судов — это формулировка замысла, в котором должны найти отражение требования технического задания, основные и наиболее общие предложения по их выполнению, сравнение вариантов построения системы. Должны быть использованы результаты макетирования, и предварительные технико-экономические расчеты. Результаты разработки концепции оформляются в виде пояснительной записки и должны быть представлены РС разработчиком, либо самостоятельно, либо в составе концепции применения автономного судна.

Для всех и каждой системы, которая планируется к применению на автономном судне, ее разработчиком на этапе разработки концепции должна быть выполнена предварительная оценка риска. В случае сложной системы (системы систем), должна быть выполнена ее декомпозиция на отдельные функциональные подсистемы или функции. Оценка риска должна быть выполнена для каждой из них. Результаты оценки должны быть включены в пояснительную записку, представляемую РС.

Предварительная оценка риска применения системы включает следующие три шага.

### Шаг 1. Качественная оценка вероятности отказа системы

Оценку вероятности отказа следует определять по уровню технической сложности системы и уровню сложности применяемого в ней анализа данных. Качественные описания этих уровней представлены в табл. 9 и 10 соответственно.

Таблица 9

#### Уровни сложности системы (УСС)

УСС	Сложность системы
0	Простая система (Обособленная система)
1	Простая сеть (Частичная интеграция с другими системами, не все системы подключены к сети)
2	Сложная сеть (Сетевое подключение и полная интеграция, только на борту)
3	Многоагентная коммуникация (Удаленный и береговой доступ, бортовая функция полагается на наземную поддержку, непрерывную и надежную связь судно — берег)

Таблица 10

#### Уровни сложности анализа данных (УСАД)

УСАД	Сложность анализа данных
0	Базовый (Мониторинг параметров, статистика и тренды)
1	Физические модели и традиционные методы мониторинга состояния с аналитической поддержкой
2	Модели данных (Модели машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ) с использованием или без использования физической модели)

В результате уровни вероятности отказа системы должны быть определены суммой УСС+УСАД. Соответствие этой суммы трем уровням вероятности возникновения отказа: низкого, среднего и высокого, с примерами систем, приведено в табл. 11.

Таблица 11

**Уровни вероятности возникновения отказа с примерами систем**

Уровень вероятности отказа	УСС+УСАД	Пример системы
Н (Низкий)	0, 1	Контроль изгибающего момента и слеминга корпуса с помощью тензометрических датчиков и акселерометров
С (Средний)	2, 3	Контроль температуры и давления в цилиндре двигателя со встроенными датчиками температуры и давления
В (Высокий)	4, 5	Оптимизация рейса (периодическое использование прогноза погоды, учет параметров работы соответствующих бортовых систем, управляемая данными модель расхода топлива)

**Шаг 2. Качественная оценка возможных последствий отказа системы**

Оценка возможных последствий отказа системы должна быть выполнена на основе качественно определенных уровней:

- участия системы в принятии решения и его выполнении;
- интеграции в бортовую систему;
- категории тяжести последствий отказа системы.

Соответствующие уровни приведены в табл. 12 — 14.

Таблица 12

**Уровни участия в принятии решения и его выполнении (УПР)**

УПР	Обработка данных	Принятие решения	Выполнение действия
0	Система и человек	Человек	Человек
1	Система и человек	Человек с поддержкой системы	Человек
2	Система	Система под наблюдением человека	Система под наблюдением человека
3	Система	Система	Система

Таблица 13

**Уровни интеграции в бортовую систему (УИС)**

УИС	Уровень интеграции
1	Обособленный (Изолирована от других систем или пассивно подключена только для сбора данных при интеграции с бортовыми системами. Отсутствует потенциальное влияние на безопасность и производительность интегрированной системы)
2	Частичный (Односторонняя передача данных в систему с активным запросом. Может привести к снижению производительности, но не влияет на безопасность интегрированной бортовой системы)
3	Полностью интегрированный (Двусторонняя связь с бортовыми системами с возможностью отправки команд в системы для оперативной настройки или оптимизации. Возможно влияние на безопасность применения интегрированной системы)

Таблица 14

**Категории тяжести последствий отказа системы (КТОС)**

Категория	Влияние отказа	Примеры функции систем
1	Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования системы, но не представляет опасности для окружающей среды, судна и здоровья людей	Функция мониторинга для информационных/административных задач
2	Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности применения судна, но не представляет опасности для окружающей среды, судна и здоровья людей	Функции аварийной сигнализации и мониторинга. Функции управления, необходимые для поддержания судна в нормальных эксплуатационных и обитаемых условиях
3	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для судна и/или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей	Функции управления по поддержанию скорости и направления движения
4	Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для судна и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи	Функции обеспечения безопасности судна (навигационной, взрыво-пожаробезопасности)

Возможные последствия отказа системы определяются суммой УПР + УИС + КТОС и характеризуются четырьмя уровнями (см. табл. 15).

Таблица 15

**Уровни тяжести последствий отказа системы с примерами систем**

Уровень тяжести последствия	УПР + УИС + КТОС	Пример системы
Н (Низкий)	0, 1, 2	Контроль состояния набора корпуса судна (приборная панель с установленными тензометрическими датчиками)
С (Средний)	3, 4, 5	Учет фактической погоды на маршруте (рекомендации по маршруту и пассивный сбор данных из соответствующих систем)
В (Высокий)	6, 7, 8	Управление мощностью и оптимизация (автоматическая регулировка рабочих параметров двигателя с определением диапазона для лучшей производительности)
ОВ (Очень высокий)	9, 10	Дистанционное управление судном или управление полностью автономным судном

**Шаг 3. Оценка уровня риска, связанного с применением системы**

Четыре уровня риска применения системы: Н — низкий (зеленый), С — средний (желтый), В — высокий (оранжевый) и ОВ — очень высокий (красный), — должны быть определены на основании качественных уровней вероятности отказа и тяжести последствий отказа системы) с помощью матрицы рисков, представленной в табл. 16.

Таблица 16

**Матрица уровней рисков применения системы**

Уровень тяжести последствия	Уровень вероятности отказа		
	Н	С	В
Н	Н	Н	С
С	С	С	В
В	С	В	В
ОВ	В	ОВ	ОВ

Результаты предварительного анализа риска, включая описание всех шагов, исходных данных, принятых решений, и концепция применения предъявляются разработчиком в составе концепции для получения предварительного одобрения РС. Далее результаты подлежат итерационному рассмотрению и корректировке в процессе оценки риска на следующих этапах жизненного цикла системы.

### 3. ЭТАП ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Схема процесса одобрения и освидетельствования автономных судов и систем для автономных судов с развернутыми подпроцессами для этапа проектирования представлена на рис. 3.

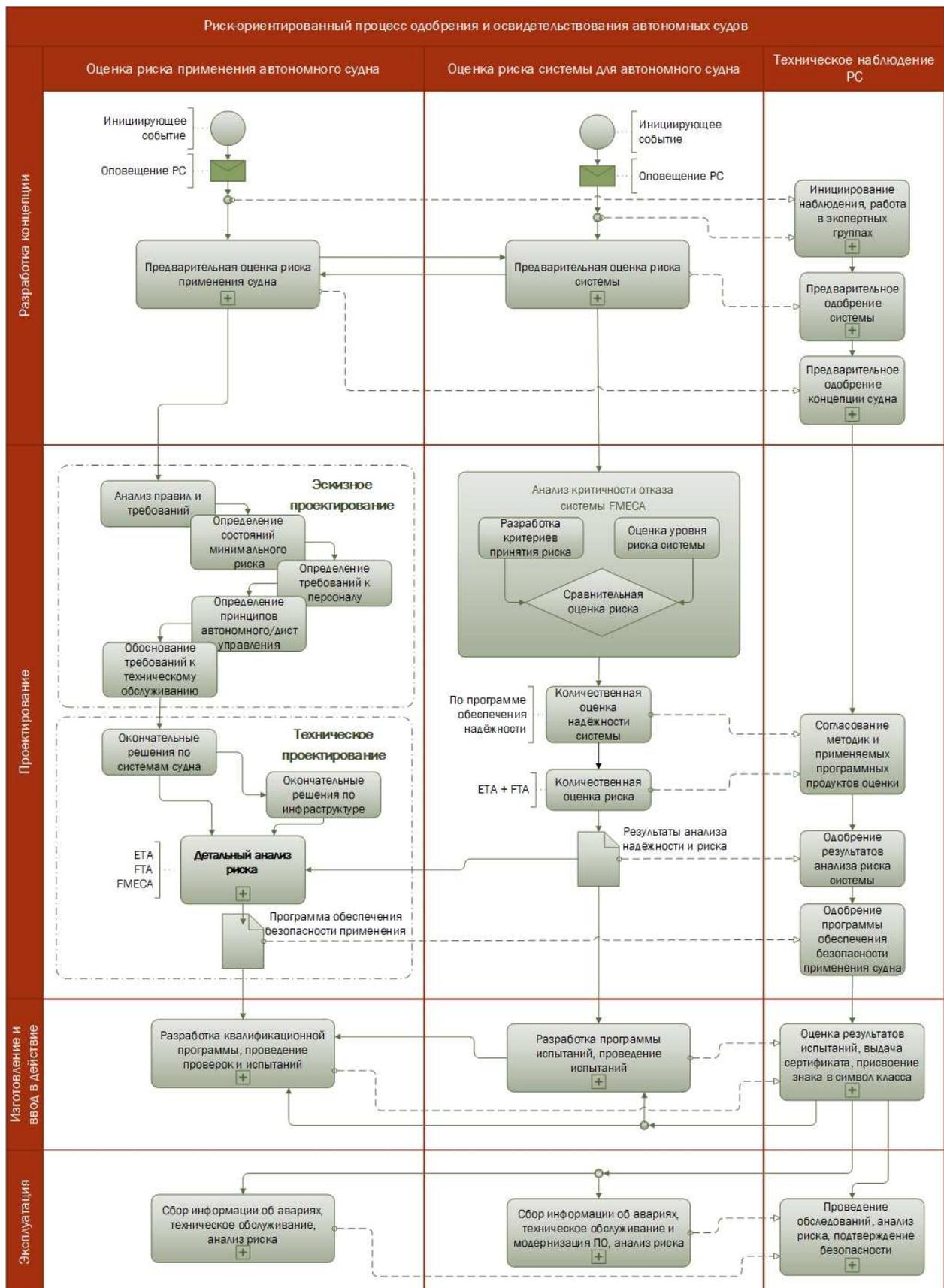


Рис. 3 Схема процесса с развернутыми подпроцессами для этапа проектирования

### 3.1 Оценка риска применения автономного судна на этапе проектирования

Этап проектирования принято разделять на два подэтапа: эскизное (высокоуровневое, общее) и техническое (детализированное, подробное).

#### *Эскизное проектирование*

Основными задачами эскизного проектирования являются: разработка вариантов создания автономного судна, их сравнение и выбор оптимального по заданным показателям. В результате выбирается вариант, уравновешенный по требуемой функциональности, эксплуатационным характеристикам, реализуемости, безопасности и ремонтпригодности. При этом должно быть принято решение, какая из систем является традиционной и должна быть одобрена РС по существующим нормам и правилам, а какая не попадает под эти нормы и правила и должна получить одобрение РС после проверки на соответствие требованиям к автономным судам. Потенциальные поставщики традиционных систем должны предоставить соответствующие сертификаты одобрения РС.

С целью подтверждения того, что применение проектируемого автономного судна обеспечивает уровень безопасности, эквивалентный или лучший по сравнению с обычным судном, содержание пояснительной записки эскизного проекта должно содержать следующие три раздела (но не ограничиваться).

#### *Раздел 1 пояснительной записки эскизного проекта. Основные меры обеспечения безопасного применения*

В этом разделе должен быть изложен, во-первых, анализ существующих правил и требований к применению судов подобного назначения, где будут выявлены несоответствия и противоречия с предполагаемым применением проектируемого автономного судна. На этой основе должны быть намечены альтернативные решения с вытекающими требованиями к поставляемым системам. В некоторых случаях должен быть приведен целенаправленный анализ рисков для уточнения того, что предложенное альтернативное решение приведет к эквивалентному уровню безопасности.

Во-вторых, должны быть предложены состояния минимального риска (СМР), в которые судно должно войти, когда внешние условия выходят за допустимые пределы, и, — возможно, — выйти, когда условия позволят функционировать в обычном режиме. Эти состояния должны быть детализированы и их место должно быть определено в иерархии дерева событий и/или дерева принятия решений. Одни и те же СМР могут быть структурированы в разных деревьях для разных сценариев. Следует четко указать СМР, которые будут последним звеном в иерархии событий и решений. Эти состояния должны быть такими, что никакие обстоятельства не могут ухудшить уровень безопасности судна, находящегося в них.

В-третьих, должны быть сформулированы формальные и неформальные требования к компетентности персонала, участвующего в эксплуатации, техническом обслуживании автономного судна, выполняющего дистанционное управление, наблюдение и контроль работы систем.

#### *Раздел 2 пояснительной записки эскизного проекта. Основные принципы автономного/удаленного управления*

Это раздел должен содержать описание общих проектных решений, требований и ограничений для систем, предназначенных для реализации функций автономного/удаленного управления. Должна быть предусмотрена такая избыточность и отказоустойчивость для этих систем, чтобы обеспечить возможность ввода и поддержания судна в СМР при любом опасном сценарии.

Должны быть определены границы каждой системы от различных поставщиков. При этом, в целях конкретизации необходимого объема работ по одобрению систем РС, они должны быть распределены по следующим категориям:

- имеющие одобрение и используемые для обычного применения;
- имеющие одобрение, но используемые для новых целей или в новых условиях;
- традиционные системы без одобрения, используемые для обычного применения;
- традиционные системы без одобрения, используемые для новых целей или в новых условиях;
- новые системы, имеющие одобрение для применения на автономных судах;
- вновь создаваемые системы для проектируемого автономного судна, и не имеющие одобрения РС.

#### *Раздел 3 пояснительной записки эскизного проекта. Основные решения по техническому обслуживанию в процессе эксплуатации*

Этот раздел должен обосновывать снижение количества необходимого персонала в непосредственной близости от систем и механизмов при внедрении автономных и дистанционно управляемых систем.

Особое внимание должно быть уделено обслуживанию систем, реализующих функции дистанционного управления судном. Должно быть представлено описание, как каждая система будет контролироваться, диагностироваться, обслуживаться и ремонтироваться. В число этих систем должны включаться как программные, так и механические подсистемы/элементы.

Должны быть определены основные обязанности различных должностных лиц, как на борту судна, так и на берегу.

### **Техническое проектирование**

Основными задачами технического проектирования являются обоснование и описание ранее выбранного варианта автономного судна.

На этом подэтапе должны быть приняты окончательные проектные решения по всем системам автономного судна. В отношении автономных функций основное внимание на этом подэтапе должно быть уделено их обеспечению выбранными к поставке системами и однозначному определению интерфейсов между этими системами.

Проектная документация судна и документация по проектированию судовых систем должны так представить общую инфраструктуру, чтобы можно было принять решение о безопасности применения автономного судна. С этой целью проектная документация судна должна в дополнение к обычному содержанию также предусматривать специальные меры, необходимые для выполнения требований к функциональности автономного управления и комплектующим системам, обеспечивающим эту функциональность.

В проектной документации должна быть определена инфраструктура вне судна, необходимая для безопасного выполнения автономных функций. Это может быть проектной документацией центра дистанционного управления и систем связи, соединяющих судно с ЦДУ. Кроме того, в проектную документацию должны быть включены другие системы вне автономного судна, без которых его эксплуатация невозможна, исходя из его концепции. К таким системам могут относиться, например, системы разметки морских путей, обеспечения буксировки и автоматической швартовки.

Проектная документация должна содержать отдельный документ по детальному анализу рисков применения автономного судна. Этот анализ в целом должен проводиться на основе концепции применения, принятых решений в процессе проектирования, информации о судовых системах и информации о конструкции судна. Цель состоит в том, чтобы гарантировать способность автономного судна и обеспечивающей инфраструктуры безопасно справляться с соответствующими сбоями, отказами и опасными ситуациями на море.

Анализ рисков рекомендуется проводить с использованием одного или нескольких стандартных (ISO/IEC 31010:2019 [12], ГОСТ Р 51901.1-2002 [15]) методов оценки рисков:

- FTA — анализ дерева неисправностей (IEC 61025:2006 [16], ГОСТ Р 51901.13-2005 [17]);
- ETA — анализ дерева событий (IEC 62502:2010 [18]);
- FMEA (FMESA) — анализ видов и последствий отказов (IEC 60812:2018 [19], ГОСТ Р 51901.12-2007 [20]).

Программные продукты, используемые для выполнения количественной оценки риска, должны быть согласованы с РС и/или иметь сертификаты одобрения соответствующих регулирующих органов и государственных структур. Все меры по снижению рисков, предложенные на этапе разработки концепции, должны получить обоснованное подтверждение в результате этого анализа. Вновь выявленные риски должны сопровождаться обоснованием мер по их снижению.

Все риски должны быть задокументированы. Меры по снижению рисков должны планироваться, выполняться и отслеживаться на всех последующих этапах жизненного цикла. С этой целью рекомендуется на этапе проектирования разработать и представить РС, в дополнение к проектной документации и анализу рисков, программу обеспечения безопасности применения автономного судна.

## **3.2 Оценка риска системы для автономного судна на этапе проектирования**

На этапе проектирования, в зависимости от уровня риска системы (см. табл. 16), должен быть выполнен количественный или качественный анализ критичности отказа системы:

- ОВ — обязателен углубленный количественный анализ критичности;
- В — желателен количественный анализ критичности;
- С — можно ограничиться качественным анализом;
- Н — анализ не требуется.

Целью анализа критичности является установление совокупности признаков отказа системы или ее элементов, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением.

Разработчик должен обосновать и предложить на этом этапе критерии риска для определения его приемлемости. В результате сравнения уровня риска с критерием риска для каждой системы должны быть обоснованы решения о принятии или непринятии риска в процессе дальнейшей разработки. Анализ критичности рекомендуется проводить с использованием метода FMECA — анализа видов, последствий и критичности отказов (IEC 60812:2018 [19], ГОСТ Р 51901.12-2007 [20]).

Количественную оценку риска системы рекомендуется выполнять, применяя один или несколько стандартных методов, указанных в 3.1 выше. Программные продукты, используемые для выполнения количественной оценки риска, должны быть согласованы с РС и/или иметь сертификаты одобрения соответствующих регулирующих органов и государственных структур.

Рекомендуется также совмещать оценку риска с оценкой надежности системы по показателям, указанным в техническом задании, например, по показателям безотказности, ремонтпригодности, долговечности. В этом случае следует руководствоваться программой обеспечения надежности, если ее разработка предусмотрена техническим заданием или методологией разработки. Расчеты для различных вариантов построения системы должны однозначно показывать эффективность предлагаемых мер по снижению риска системы.

Количественный и/или качественный анализ риска системы в итоге должен показать, как спроектированная конструкция системы поддерживает требуемую функциональность и обеспечивает безопасность для людей, судна и окружающей среды, эквивалентные (как безопасные или более безопасные) существующим традиционным решениям. Анализ риска и расчет надежности системы в составе проектной документации должен быть представлен РС.

## 4. ЭТАП ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВВОДА В ДЕЙСТВИЕ

Схема процесса одобрения и освидетельствования автономных судов и систем для автономных судов с развернутыми подпроцессами для этапа изготовления и ввода в действие представлена на рис. 4.

### 4.1 Оценка риска применения автономного судна на этапе изготовления и ввода в действие

На этом этапе должна быть разработана всеобъемлющая программа проверки и одобрения — квалификационная программа, в которой будет представлено описание того, каким образом будут проверяться функциональные возможности автономного судна до начала его использования.

Программа должна охватывать все необходимые экспертизы, этапы проверок, типы испытаний (предварительные, швартовные, ходовые и пр.) с местами их проведения, которые автономное судно должно пройти до окончательного одобрения РС. Для каждого вида проверки должна быть определена цель, обозначены сфера охвата и обязанности участвующих сторон. Для каждого испытания также должна быть определена тестовая среда, ее возможности и ограничения. Программа должна учитывать, что системы, уже получившие одобрение типа РС, еще могут нуждаться в проверке в реальной среде функционирования.

Для успешного выполнения квалификационной программы важно, чтобы автономная инфраструктура была проверена на предельную нагрузку и была определена ее фактическая производительность на соответствие требуемым характеристикам надежности и безопасности.

Для отдельных экспертиз, проверок и испытаний, указанных в квалификационной программе, должны быть разработаны отдельные программы и методики их проведения. Методики должны включать подробную информацию о системе, предназначенной для испытания, включая тип системы, идентификацию оборудования и версии программного обеспечения. Любые имитаторы, используемые в испытательной установке, также должны быть подробно описаны с указанием типа и версии.

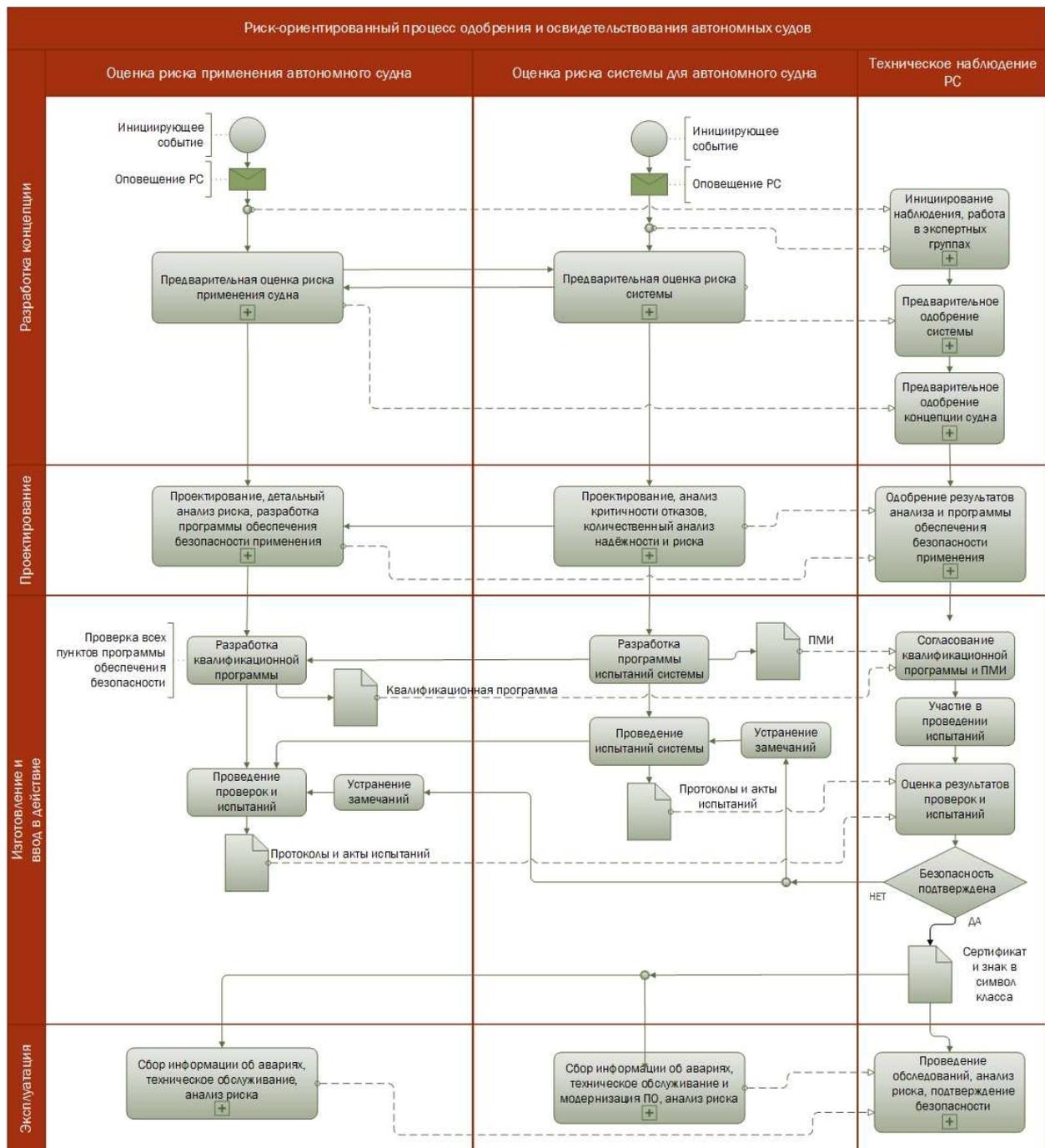


Рис. 4 Схема процесса с развернутыми подпроцессами для этапа изготовления и ввода в действие

Для резервных систем должны быть предусмотрены проверки в рамках проверки каждой резервируемой системы. При этом должны быть проверены выводы и рекомендации, сделанные ранее при оценке риска, в частности, требования к отказоустойчивости, необходимость в резервировании, или, наоборот, в отсутствии этой необходимости. Испытания должны охватывать все указанные конфигурации технических систем. Испытания на подтверждение необходимости в резервировании и на отказоустойчивость должны проводиться в максимально реалистичных условиях, например, с использованием имитаторов или симуляторов.

При проведении экспертиз, проверок и испытаний все результаты должны фиксироваться вместе с любыми несоответствиями ожидаемым результатам. Результаты всех испытаний должны быть проанализиро-

ваны и сделаны выводы о том, что цели программы квалификации достигнуты. Протоколы и акты экспертиз, проверок и испытаний должны быть представлены РС для информации и проверки.

Для получения одобрения должен быть подготовлен и представлен РС отчет о выполнении квалификационной программы автономного судна. В этом отчете должны быть обоснованы выводы, что все ранее намеченные меры по снижению риска (программа обеспечения безопасности) выполнены, и автономное судно вместе с береговой и морской инфраструктурой обеспечивает уровень безопасности, эквивалентный или лучший по сравнению с обычным судном.

#### **4.2 Оценка риска системы для автономного судна на этапе изготовления и ввода в действие**

На этом этапе параллельно с изготовлением системы должны быть разработаны и согласованы с РС программы и методики проверок и всех видов испытаний (предварительных, приемочных, швартовных и пр.). Системы, которые ранее попали в разряд систем с высоким и очень высоким уровнем риска, а также системы, обеспечивающие важные функции управления автономным судном, должны быть проверены с использованием симуляторов.

Тестирование на основе симуляторов должно обеспечивать объективное подтверждение пригодности функционирования (в нормальном, ненормальном и деградированном состоянии) системы управления в соответствии с функциональными требованиями и требованиями безопасности, определенными в правилах или вытекающими из ранее выполненного анализа риска. Такое тестирование должно быть обязательно выполнено для функциональности, где требуется проверить, что функция или вся система будет работать удовлетворительно в большом диапазоне рабочих сценариев, включая сценарии возникновения и развития опасных событий. К числу таких функций относятся, например:

- планирование перехода и предварительная прокладка маршрута;
- обеспечение непрерывного наблюдения и ситуационной осведомленности;
- обнаружение, оценка параметров движения, распознавание судов, морских объектов и навигационных опасностей;
- вычисление дистанции и времени опасного сближения с судами и другими морскими объектами;
- распознавание опасной ситуации, например, пересечение запрещенных районов, интенсивное и стесненное движение, прибрежное плавание, ухудшение погодных условий, необходимость в помощи лоцмана;
- предотвращение столкновения или посадки на мель;
- корректировка маршрута по погодным условиям.

Для резервных систем должны быть предусмотрены проверки в рамках проверки каждой резервируемой системы. При этом должны быть проверены выводы и рекомендации, сделанные ранее при оценке риска, в частности, требования к отказоустойчивости, необходимость в резервировании, или, наоборот, в отсутствии этой необходимости.

Испытания должны охватывать все указанные конфигурации технических систем. Испытания на подтверждение необходимости в резервировании и на отказоустойчивость должны проводиться в максимально реалистичных условиях, например, с использованием имитаторов сопрягаемых систем и симуляторов обстановки. Все используемые имитаторы и симуляторы, интерфейсы их подключения к проверяемым системам и создаваемые ими параметры обстановки должны быть представлены РС на согласование.

Интегрированные системы с высоким уровнем сложности должны подлежать дополнительной проверке на наличие и соответствие требованиям функций, являющихся результатом интегрирования. Интеграция таких систем обычно осуществляется во время ввода в эксплуатацию и тестирования, близкого к завершению проекта. В некоторых случаях это тестирование может быть невозможно из-за риска повреждения системы. Поэтому следует тщательно планировать такие испытания и при необходимости рассматривать альтернативные варианты, например, моделирование.

Испытания интегрированных систем может проводиться в среде симулятора с использованием моделей и эмулированных или встроенных систем управления. Объем испытания должен также включать критические режимы отказа (например, короткое замыкание) которые трудны/невозможны для их выполнения на реальном оборудовании.

Тестирование программного обеспечения должно проводиться на самой ранней стадии. Целью испытаний программного обеспечения является обеспечение максимальной готовности, одновременно с

уверенностью в том, что оно прошло максимально тщательные проверки до начала пусконаладочных и морских испытаний. Разработчик отвечает за регистрацию версий загруженного для проверки программного обеспечения. Оно не должно изменяться во время испытаний, если это не является обязательным по методике их проведения.

Разработчик несет ответственность за документирование изменений в программном обеспечении. Номера версий программного обеспечения имитаторов и симуляторов, используемых во время тестирования, также должны быть задокументированы.

После установки системы на борт судна она должна пройти обязательные испытания на взаимодействие с сопрягаемыми системами.

При проведении проверок и испытаний все результаты должны фиксироваться вместе с любыми несоответствиями ожидаемым результатам. Результаты всех испытаний должны быть проанализированы и сделаны выводы о том, что требования технического задания выполнены, система пригодна для применения на автономном судне.

Протоколы и акты проверок и испытаний должны быть представлены РС для информации и проверки. Для получения одобрения должен быть подготовлен и представлен РС отчет об оценке риска, основанный на результатах испытаний. В этом отчете должны быть обоснованы выводы, что все ранее намеченные меры по снижению риска и надежности системы (программа обеспечения надежности) выполнены и она может быть применена на автономном судне. При этом будет обеспечен уровень безопасности, эквивалентный или лучший по сравнению с обычным судном.

## 5. ЭТАП ЭКСПЛУАТАЦИИ

Схема процесса одобрения и освидетельствования автономных судов и систем для автономных судов с развернутыми подпроцессами для этапа эксплуатации представлена на рис. 5.

### 5.1 Обеспечение безопасности применения автономного судна на этапе эксплуатации

Для того чтобы РС разрабатывал будущие схемы освидетельствования, а также для совершенствования технических указаний и правил, данные о функционировании автономного судна должны собираться, анализироваться и предоставляться РС по согласованию с владельцем и оператором судна. Эти данные должны включать:

- часы работы;
- обнаруженные сбои;
- вход и выход из СМР;
- другие технические параметры, используемые для мониторинга состояния систем и судна в целом.

Конкретный перечень данных и порядок доступа к ним, будет определяться для каждого автономного судна во взаимодействии с соответствующими заинтересованными сторонами. Роль разработчика состоит в том, что он должен предусмотреть техническую возможность сбора, хранения, обработки и передачи такой информации РС.

Для автономных и дистанционно управляемых судов схемы освидетельствования пока не установлено. Предполагается, что это будет схема ежегодных, промежуточных и возобновляемых освидетельствований в дополнение к возможным освидетельствованиям после инцидентов или повреждений, а также возможных изменений и модификаций систем.

Учитывая то, что автономное судно будет использовать новые технологические решения, а многие из автономных функций не могут быть адекватно и эффективно обследованы с помощью традиционных методов, роль разработчика состоит в предложении и создании новых методов освидетельствования. Эквивалентный или более высокий уровень проверки может быть обеспечен, например, новыми цифровыми решениями.

В их число могут входить новые возможности, предоставляемые цифровизацией морских коммуникаций, например, удаленные опросы, тестирование с помощью симуляторов, встроенные средства тестирования с автоматической передачей данных.

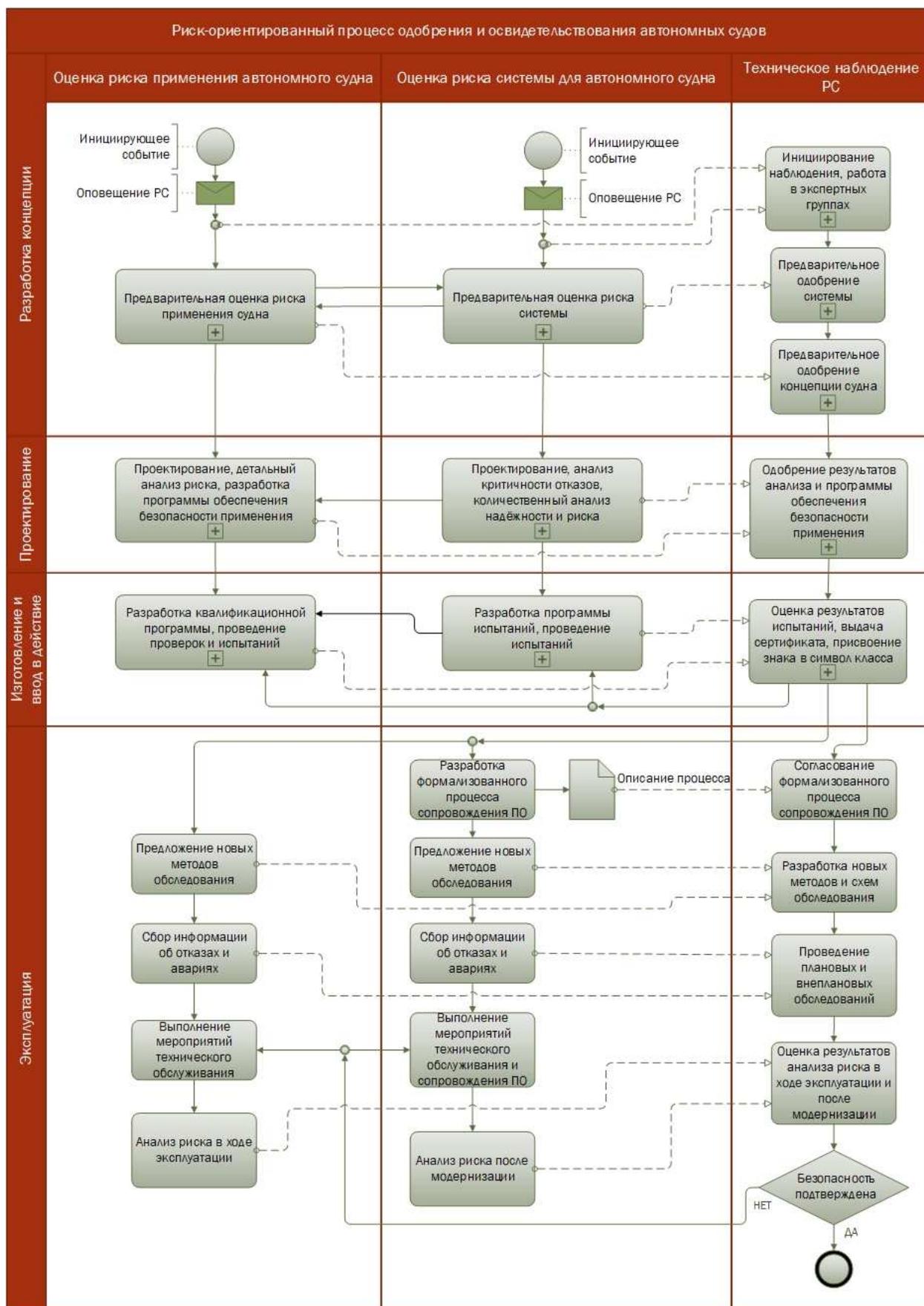


Рис. 5 Схема процесса с развернутыми подпроцессами для этапа эксплуатации

С учетом того, что в состав инфраструктуры автономного судна могут входить средства и системы, без которых его функционирование невозможно, например, центр дистанционного управления, средства разметки морских путей, средства связи, — схема освидетельствования должна включать в себя проверку как технических, так и организационных аспектов обеспечивающей инфраструктуры. Одним из них является кибербезопасность.

Функционирование автономного судна зависит от программного обеспечения, а ключевые функции зависят от систем, построенных как программно-аппаратные комплексы. Управление модернизацией этих систем, в частности, изменениями программного обеспечения на этапе эксплуатации станет более важным, чем для обычного судна. Здесь роль разработчика состоит в обеспечении высокой модернизационной готовности автономного судна.

## 5.2 Обеспечение безопасности системы для автономного судна на этапе эксплуатации

РС должен быть информирован о необходимости внесения изменений в системы автономного судна путем предоставления разработчиком извещения о внесении изменений в конструкторскую и программную документацию, а также описание процесса модернизации. Для этапа эксплуатации разработчик должен представить формализованный процесс сопровождения и смены версий программного обеспечения (ПО). Этот процесс должен содержать описание:

- причины обновления версии ПО;
- спецификации обновляемого ПО;
- результатов тестирования новой версии ПО, включая тестирование с помощью симуляторов;
- инструкции по установке новой версии ПО;
- инструкции по проверке и получению одобрения на применение новой версии ПО.

Разработчик должен обеспечить сохранение предыдущих версий ПО с возможностью возврата к их использованию. Системы, включающие механизмы машинного обучения, искусственного интеллекта, могут быть обучены по накопленным наборам данных в результате эксплуатации, но не должны использовать результаты обучения до развертывания новой версии. В этом случае действующие системные возможности должны обновляться только через определенные интервалы времени после успешной проверки и одобрения обновлений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У разработчиков риск-ориентированного процесса одобрения автономных судов и систем для автономных судов нет точного знания о том, в каком направлении будет происходить технологическое развитие с точки зрения степени автономности или дистанционного управления и участия людей в судовождении. Вместо этого РС предлагается поддержать судостроительную отрасль путем предоставления надежных услуг по одобрению и освидетельствованию автономных судов, которые обеспечат доверие к безопасности их применения.

Этому должны способствовать понятные, обзримые, выполнимые требования, основанные на современных методах по оценке риска на всех этапах жизненного цикла автономных судов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57193-2016 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
2. ГОСТ Р 51897-2011/Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения.
3. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения.
4. Guidelines for Application of Formal Safety Assessment to Ships. China Classification Society. Beijing, 2015.
5. Guide for Smart Functions for Marine Vessels and Offshore Units. American Bureau of Shipping May 2019.
6. Guidance Notes on Smart Function Implementation. American Bureau of Shipping, November 2018.
7. Guidance Notes on Review and Approval of Novel Concepts. American Bureau of Shipping, April 2017.
8. Guidance Notes on Qualifying New Technologies. American Bureau of Shipping, April 2017.
9. Class guideline — DNVGL-CG-0264. Autonomous and remotely operated ships. Edition September 2018.
10. Guidelines for Autonomous Shipping. Bureau Veritas, December 2017.
11. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process. MSC-MEPC 2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018.
12. ISO/IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques.
13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска.
14. IEC 62502-2010 Analysis techniques for dependability — Event tree analysis (ETA).
15. ГОСТ Р 51901.1-2002 Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
16. IEC 61025:2006 Fault Tree Analysis (FTA).
17. ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990) Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей.
18. IEC 62502:2010 Analysis techniques for dependability — Event tree analysis (ETA).
19. IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).
20. ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006) Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.

## REFERENCES

1. GOST R 57193-2016 Systems and software engineering. System life cycle processes. (In Russian)
2. GOST R 51897-2011/ ISO Guide 73:2009 Risk management. Terms and definitions. (In Russian)
3. GOST 27.002-2015 Dependability in technics. Terms and definitions. (In Russian)
4. Guidelines for Application of Formal Safety Assessment to Ships. China Classification Society. Beijing, 2015.
5. Guide for Smart Functions for Marine Vessels and Offshore Units. American Bureau of Shipping May 2019.
6. Guidance Notes on Smart Function Implementation. American Bureau of Shipping, November 2018.
7. Guidance Notes on Review and Approval of Novel Concepts. American Bureau of Shipping, April 2017.
8. Guidance Notes on Qualifying New Technologies. American Bureau of Shipping, April 2017.
9. Class guideline — DNVGL-CG-0264. Autonomous and remotely operated ships. Edition September 2018.
10. Guidelines for Autonomous Shipping. Bureau Veritas, December 2017.
11. Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. 9 April 2018.
12. ISO/IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques.
13. GOST R ISO/MEK 31010-2011 Risk management. Risk assessment methods. (In Russian)
14. IEC 62502-2010 Analysis techniques for dependability — Event tree analysis (ETA).
15. GOST R 51901.1-2002 Risk management. Risk analysis of technological systems. (In Russian)
16. IEC 61025:2006 Fault Tree Analysis (FTA).
17. GOST R 51901.13-2005 (MEK 61025:1990) Risk management. Fault tree analysis. (In Russian)
18. IEC 62502:2010 Analysis techniques for dependability — Event tree analysis (ETA).
19. IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).
20. GOST R 51901.12-2007 (MEK 60812:2006) Risk management. Procedure for failure mode and effects analysis. (In Russian)

УДК 656.615+338.12.017+519.2

## МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГРУЗОБОРОТА МОРСКИХ ПОРТОВ

**А.Н. Гаврилов**, ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Владивосток, e-mail: gavrilov@msun.ru

Прогнозирование грузооборотов морских портов является неотъемлемой частью управления портовой деятельностью. Так как портовое строительство является капиталоемким, а потребности в портовых мощностях напрямую зависят от прогнозов грузооборота, повышение точности прогнозов может существенно сэкономить инвестиции на строительство/реконструкцию портовых мощностей, а также снизить эксплуатационные затраты. В настоящей статье предложен вероятностный подход к прогнозированию грузооборотов портов, который может существенно сократить длину интервала неопределенности грузооборота, вычисляемого как сумма грузооборотов независимых сегментов, заданных интервально. Показано, что подход можно реализовать, если рассматривать сегменты грузооборота как независимые нормально или равномерно распределенные случайные величины. Установлено, что в обоих случаях результат сложения сегментов можно аппроксимировать нормально распределенной случайной величиной и вычислить для нее интервал значений. Показано, что предложенный метод сокращает интервал неопределенности грузооборота в сравнении с классическим подходом.

*Ключевые слова:* порты, методы прогнозирования, грузооборот, сегментирование, вероятность, интервальная оценка, интервал неопределенности, математическое ожидание, дисперсия, нормальное распределение, равномерное распределение, распределение Ирвина — Холла

## METHOD OF REDUCING UNCERTAINTY INTERVALS IN FORECASTING CARGO TURNOVER IN SEA PORTS

**A.N. Gavrilov**, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, e-mail: gavrilov@msun.ru

Forecasting the turnover of seaports is an integral part of port management. Since port construction is capital-intensive and the demand for port capacity directly depends on forecasts of cargo turnover, improved accuracy of forecasts can significantly reduce investment volumes in the construction/reconstruction of port facilities, as well as operating costs. The present article proposes a probabilistic approach to forecasting port cargo turnover, which can significantly reduce the length of the uncertainty interval of cargo turnover, calculated as the sum of the cargo turnover of independent segments specified at intervals. This approach can be successfully applied if the cargo turnover segments are considered as independent normally or uniformly distributed random variables. It has been found that, for both cases, the result of adding segments can be approximated by a normally distributed random variable, and an interval of values can be calculated for it. The method reduces the interval of cargo turnover uncertainty in comparison with the classical approach.

*Keywords:* ports, forecasting methods, cargo turnover, segmentation, probability, interval estimation, uncertainty interval, mathematical expectation, variance, normal distribution, uniform distribution, Irwin — Hall distribution

## ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование грузооборотов портов является важнейшим элементом стратегирования перегрузочной деятельности. Без прогнозов невозможно управлять строительством и/или реконструкцией причальных и тыловых сооружений в порту. Портовое строительство очень капиталоемкое, поэтому ошибки в прогнозных оценках могут привести к существенным ошибкам в определении потребных инвестиций, планируемых операционных доходов и затрат, и, как следствие, к негативным финансовым результатам для участников рынка перевалки.

Существует множество способов классификации прогнозов в зависимости от классифицирующего признака [1]. Если таким признаком служит степень детерминированности результата прогноза, то прогнозы подразделяются на точечные (результат прогноза — точное значение прогнозного параметра) и интервальные (результат — интервал значений прогнозного параметра). В данной статье рассматриваются интервальные прогнозы грузооборота.

## 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

При прогнозировании грузооборота удобно раскладывать его на составляющие, называемые сегментами грузооборота. Наиболее частые способы сегментирования:

- по видам плавания (экспорт, импорт, транзит, каботаж);
- по укрупненной номенклатуре (наливные, навалочные, генеральные грузы);
- по расширенной номенклатуре, когда каждый из сегментов укрупненной номенклатуры делится на подсегменты (например, генеральные грузы могут подразделяться на металлы, машины и оборудование, контейнерные грузы, тарно-штучные грузы и т.п.);
- по географии перевозок (например, перевозки Россия — Китай, Россия — Республика Корея, Россия — Япония и пр.).

Независимо от способа сегментирования сегменты должны покрывать весь рассматриваемый грузооборот.

Поскольку на различные сегменты грузооборота могут влиять различные факторы, для повышения точности прогноз выполняется по каждому сегменту отдельно, а совокупный прогноз представляет собой сумму прогнозов по каждому сегменту:

$$G = \sum_{i=1}^n g_i \tag{1}$$

где  $G$  — прогноз совокупного грузооборота;  
 $g_i$  — прогноз грузооборота  $i$ -го сегмента;  
 $n$  — количество сегментов.

С учетом неопределенности прогноз по каждому из сегментов грузооборота на конкретную будущую дату может быть задан интервально:

$$g_i \in [a_i; b_i], i = 1, 2, 3 \dots n, \tag{2}$$

где  $a_i$  — нижние границы интервалов;  
 $b_i$  — верхние границы интервалов.

С учетом правил сложения в интервальной математике [2] суммарный прогноз также будет представлять собой интервал, границы которого представляют собой суммы границ интервалов прогнозов для сегментов:

$$G \in [a; b] = \sum_{i=1}^n a_i; \sum_{i=1}^n b_i. \tag{3}$$

Пусть  $L = b - a$  — длина интервала совокупного грузооборота,  $l_i = b_i - a_i$  — длины интервалов его отдельных сегментов. Из (3) следует, что

$$L = \sum_{i=1}^n l_i. \tag{4}$$

Рассмотрим условный пример контейнерного терминала, в котором прогноз контейнерооборота складывается из прогнозных оценок по экспорту, импорту, каботажу и транзиту (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние интервалов неопределенности сегментов контейнерооборота на неопределенность совокупного контейнерооборота\***

Сегмент контейнерооборота	Прогнозный объем перевалки на некоторую дату, млн. TEU в год	Длина интервала неопределенности, млн. TEU в год
Экспорт	[0,5; 0,6]	0,1
Импорт	[0,6; 0,7]	0,1
Каботаж	[0,4; 0,5]	0,1
Транзит	[0,3; 0,4]	0,1
<b>Итого, в совокупности</b>	<b>[1,8; 2,2]</b>	<b>0,4</b>

\* Составлено автором.

Хотя интервалы неопределенности по каждому из сегментов не превосходят 100 тыс. TEU, итоговый интервал составляет уже 400 тыс. TEU, что сопоставимо со значением прогнозного грузооборота одного сегмента. Очевидно, совокупная неопределенность будет возрастать с ростом числа сегментов.

Сегодня строительство контейнерного терминала мощностью 100 тыс. TEU в год оценивается величиной от 1,5 — 2 млрд рублей и выше, в зависимости от условий строительства, объема земляных работ и пр. [3], [4]. Тогда в объеме инвестиций длина интервала неопределенности для примера из табл. 1 составляет от 6 млрд рублей (1,5 млрд рублей  $\times$  400 тыс. TEU в год) и более. Поэтому для снижения инвестиционных затрат задача разработки методики уменьшения интервала неопределенности совокупного грузооборота является чрезвычайно актуальной.

## 2. ОБЩИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Предположим, что объемы  $g_i$ , заданные интервально в соответствии с (2), представляют собой независимые непрерывно распределенные случайные величины  $\xi_i$  с математическими ожиданиями  $\mu_i$  и конечными дисперсиями  $\sigma_i^2$ . Тогда совокупный грузооборот можно интерпретировать как непрерывную случайную величину  $S_n$ , являющуюся суммой  $n$  независимых непрерывных случайных величин  $\xi_i$ . В соответствии со свойствами математического ожидания и дисперсии для  $S_n$  имеем [5]:

$$\begin{cases} \mu = \sum_{i=1}^n \mu_i \\ \sigma^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \end{cases}; \quad (5)$$

из второго равенства (5) следует, что

$$\sigma < \sum_{i=1}^n \sigma_i. \quad (6)$$

Предположим, что длины интервалов совокупного грузооборота и его сегментов пропорциональны соответствующим стандартным отклонениям с одинаковым коэффициентом пропорциональности  $k$ :

$$L = k\sigma, \quad l_i = k\sigma_i. \quad (7)$$

Тогда из (5 — 7) получим:

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^n l_i^2} < \sum_{i=1}^n l_i. \quad (8)$$

Сравнение (8) с (4) показывает, что применение вероятностного подхода приводит к уменьшению интервала неопределенности для совокупного грузооборота по сравнению с классическим подходом.

Пусть выполняется условие

$$\mu = (a + b)/2. \quad (9)$$

Например, распределение случайной величины  $S_n$  симметрично относительно середины отрезка  $[a; b]$ . Тогда, с учетом (5), (7) и (9) получим:

$$\begin{cases} a = \sum_{i=1}^n \mu_i - 1/2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)^2} \\ b = \sum_{i=1}^n \mu_i + 1/2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)^2} \end{cases}. \quad (10)$$

Если при этом  $\mu_i$  однозначно определяются через границы соответствующих интервалов

$$\mu_i = F_i(a_i; b_i), \quad (11)$$

то (10) дает метод расчета границ интервала совокупного грузооборота по известным границам интервалов отдельных сегментов.

Осталось проверить, насколько условия (7), (9) и (11) являются реализуемыми на практике, и не противоречат ли они смыслу поставленной задачи.

### 3. НОРМАЛИЗАЦИЯ СЕГМЕНТОВ ГРУЗОБОРОТА

Предположим, что каждая из случайных величин  $\xi_i$  подчиняется нормальному (гауссову) закону распределения с плотностью вероятности, см. рис. 1:

$$f_i(x) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-1/2((x - \mu_i)/\sigma_i)^2}. \quad (12)$$

Такой подход целесообразен, когда относительно каждого из сегментов грузооборота можно предположить, что наиболее вероятные значения сосредоточены в окрестности центра интервала неопределенности, а наименее вероятные — у концов интервала.

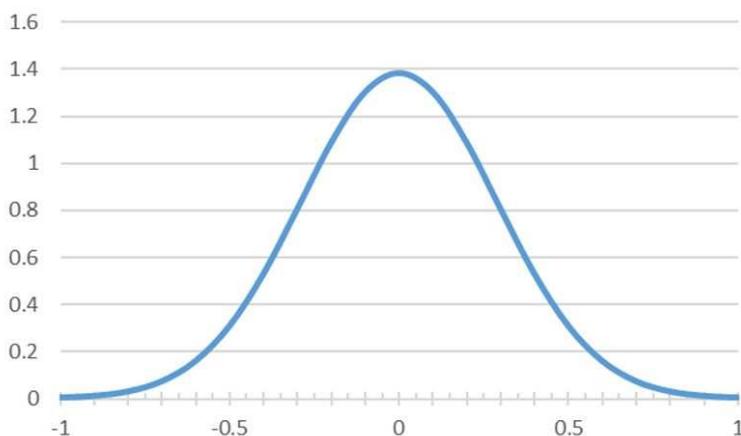


Рис. 1 Плотность вероятности нормального распределения при  $\mu=0$  и  $\sigma=0,29$

Из свойств нормального распределения известно [6], что результатом суммы нормальных распределений с математическими ожиданиями  $\mu_i$  и дисперсиями  $\sigma_i^2$  является нормальное распределение с математическим ожиданием  $\mu$  и дисперсией  $\sigma^2$ , которые удовлетворяют соотношениям (5).

Рассмотрим интервал  $[a; b] = [\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$ . В соответствии с «правилом трех сигм» [6] в данном интервале лежит 99,73% значений величины, подчиняющейся нормальному распределению с параметрами  $\mu$  и  $\sigma^2$ . Поэтому указанный интервал с достаточной точностью моделирует прогнозный грузооборот. Потребуем, чтобы для каждого из сегментов исходные интервалы неопределенности  $[a_i; b_i]$  моделировались аналогичным образом:

$$\begin{cases} a_i = \mu_i - 3\sigma_i \\ b_i = \mu_i + 3\sigma_i \end{cases}, \quad (13)$$

откуда

$$\begin{cases} \mu_i = (a_i + b_i)/2 \\ \sigma_i = (b_i - a_i)/6 \end{cases}. \quad (14)$$

Для границ интервала  $[a; b] = [\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$  с учетом (5) и (14) и получим

$$\begin{cases} a = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (a_i + b_i) - \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \\ b = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (a_i + b_i) + \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \end{cases}. \quad (15)$$

Система (15) совпадает с (10) с точностью до представления  $\mu_i$  через границы соответствующих интервалов.

Отметим, что первое равенство системы (14) соответствует условию (11), а второе — условию (7) при  $k = 6$ . Условие (9) выполнено в силу построения интервала  $[a; b]$ .

Применяя (15) к примеру из табл. 1, получим интервал неопределенности для совокупного контейнерооборота  $[1,9; 2,1]$  млн. TEU. Длина интервала составляет 0,2 млн. TEU, что ровно в 2 раза меньше, чем при использовании классического метода сложения интервалов.

## РАВНОМЕРИЗАЦИЯ СЕГМЕНТОВ ГРУЗОБОРОТА

Предположим, что  $\xi_i$  представляют собой случайные величины, каждая из которых равномерно распределена внутри своего интервала. Применительно к рассматриваемой задаче это означает, что все значения грузооборота сегментов внутри своих интервалов предполагаются равновероятными.

Функция плотности вероятности (см. рис. 2) равномерно распределенной случайной величины  $\xi_i$ , лежащей в интервале  $[a_i; b_i]$ , имеет вид [7]:

$$f_i(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [a_i; b_i] \\ 1/(b_i - a_i), & x \in [a_i; b_i] \end{cases} \quad (16)$$

Для математического ожидания и дисперсии равномерного распределения справедливы соотношения [7]:

$$\begin{cases} \mu_i = (a_i + b_i)/2 \\ \sigma_i^2 = (b_i - a_i)^2/12 \end{cases} \quad (17)$$

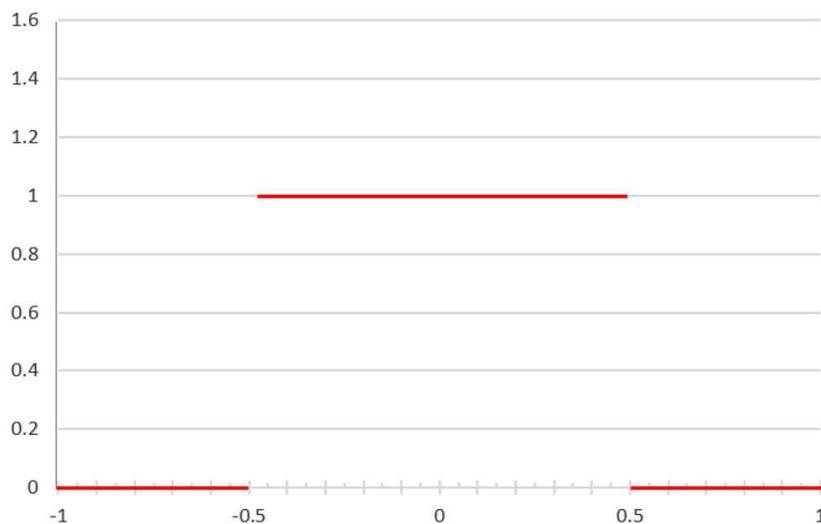


Рис. 2 Плотность вероятности равномерного распределения, заданного на отрезке  $[0,5; 0,5]$

Введем понятие расширенного распределения Ирвина — Холла (РРИХ) как распределения суммы  $n$  непрерывных случайных величин, каждая из которых равномерно распределена на своем отрезке  $[a_i; b_i]$ . Если для любых  $i$  от 1 до  $n$   $a_i = 0$  и  $b_i = 1$ , то РРИХ вырождается в классическое распределение Ирвина-Холла, свойства которого хорошо изучены [8].

В соответствии с Центральной предельной теоремой [9], при  $n \rightarrow \infty$  кривые плотности вероятности РРИХ приближаются к кривым плотности вероятности нормального распределения, параметры  $\mu$  и  $\sigma^2$  которого определены по (5).

Формулы плотностей вероятности РРИХ для  $n = 1, 2, 3$  представлены в [10]. С ростом  $n$  сложность аналитического представления плотности вероятности для РРИХ сильно возрастает. Уже для  $n = 3$  плотность вероятности представляется собой кривую, гладко склеенную из девяти функций, из которых шесть функций

представляют собой куски парабол, а три функции — отрезки прямых. Установлено [10], что РРИХ достаточно точно аппроксимируется нормальным распределением даже при небольших  $n$ . Эта особенность РРИХ использована для решения поставленной задачи.

Примеры РРИХ для  $n=2$ ,  $n=3$ , а также соответствующих аппроксимирующих нормальных распределений представлены на рис. 3 — 4.

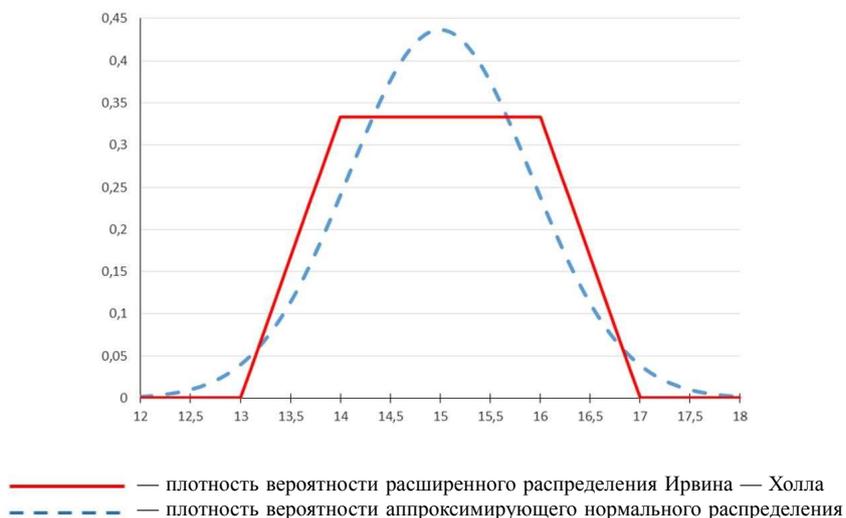


Рис. 3 Аппроксимация суммы 2-х случайных величин, равномерно распределенных на отрезках [5; 6] и [8; 11], нормальным распределением

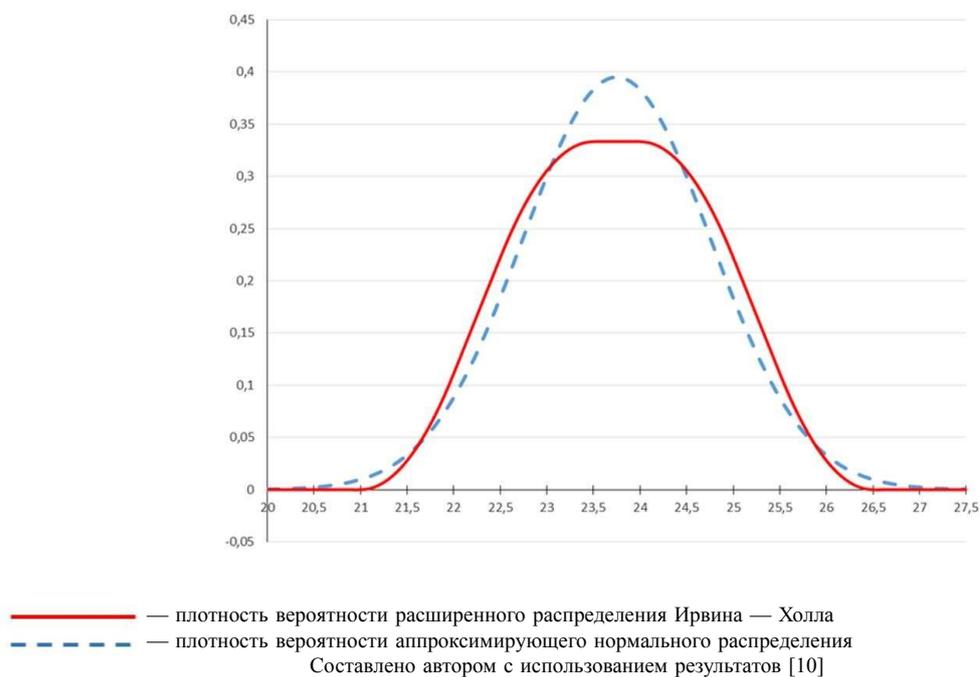


Рис. 4 Аппроксимация суммы 3-х случайных величин, равномерно распределенных на отрезках [5; 6], [7; 8,5] и [9; 11], нормальным распределением

Из (17) следует, что для сегментов грузооборота  $k=2\sqrt{3}$ . Для выполнения условия (7) потребуем, чтобы для совокупного грузооборота, представленного аппроксимирующим нормальным распределением, длина интервала была пропорциональна  $\sigma$  с таким же коэффициентом пропорциональности. Тогда искомым интервал будет  $[\mu - \sqrt{3\sigma}; \mu + \sqrt{3\sigma}]$ . В данном интервале содержится не менее 91,6 % всех значений грузооборота, что вполне достаточно для решения практических задач:

$$\int_{\mu - \sqrt{3\sigma}}^{\mu + \sqrt{3\sigma}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2((x-\mu)/\sigma)^2} dx = \text{erf}(\sqrt{3/2}) \approx 0,9167. \quad (18)$$

С учетом (5), (17) границы интервала  $[a; b] = [\mu - \sqrt{3\sigma}; \mu + \sqrt{3\sigma}]$  удовлетворяют соотношениям (15). При этом условия (7), (9), (11) выполняются в силу построения интервала  $[a; b]$  и свойств равномерного и нормального распределений.

Оценим ошибку аппроксимации РРИХ нормальным распределением. Для этого определим ее как относительную разницу между площадями фигур, ограниченных осью абсцисс, вертикальными линиями  $\mu - \sqrt{3\sigma}$ ;  $\mu + \sqrt{3\sigma}$  и графиками плотностей вероятности для нормального распределения и РРИХ:

$$\Delta_n = \frac{|P_{\text{РРИХ}} - P_{\text{норм}}|}{P_{\text{РРИХ}}}, \quad (19)$$

где  $P_{\text{РРИХ}}$  и  $P_{\text{норм}}$  — площади под графиками плотностей вероятности соответствующих распределений на интервале  $[\mu - \sqrt{3\sigma}; \mu + \sqrt{3\sigma}]$ .

Для примеров, представленных на рис. 3 и 4,  $\Delta_2 = 4,7\%$  и  $\Delta_3 = 2,2\%$  соответственно. С ростом  $n$  ошибка аппроксимации уменьшается.

## ВЫВОДЫ

Применение аппарата теории вероятностей к суммированию прогнозных оценок сегментов грузооборота, заданных интервально, позволяет существенно уменьшить длину интервала неопределенности совокупного грузопотока по сравнению с классическим подходом. В рамках предложенного подхода рассмотрены примеры, в которых суммы случайных величин, заданных интервально, аппроксимируются нормально распределенной случайной величиной. При этом ошибка аппроксимации не превысила нескольких процентов, что вполне удовлетворительно для решения практических задач.

Данный подход носит самый общий характер и может быть рекомендован во всех случаях, когда в отношении суммируемых интервально заданных величин можно сделать предположение о их независимости и о нормальном либо равномерном характере их распределений.

При реализации на практике предложенного подхода, уточняющего прогноз грузооборота, экономический эффект только от экономии инвестиций на строительство/модернизацию портовых мощностей может исчисляться миллиардами рублей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Светульников И.С., Светульников С.Г. Методы социально-экономического прогнозирования. Т. 1. Теория и методология. Москва: Юрайт, 2015. — 351 с.
2. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987 — 356 с.
3. Холдинг «Форум» построит в Тамани один из крупнейших в России контейнерных терминалов. — [Электронный ресурс]. — <https://www.tks.ru/logistics/2015/06/22/0001> (дата обращения 10.09.2020).
4. Еще один контейнерный терминал на Камчатке. — [Электронный ресурс]. — <https://seanews.ru/2019/05/06/ru-eshhe-odin-kontejnernyj-terminal-na-kamchatke> (дата обращения 10.09.2020).
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1/ перевод с англ. Р.Л. Добрушина, А.А. Юшкевича, С.А. Молчанова. Под ред. Е.Б. Дынкина с предисловием А.Н. Колмогорова. — 2-е изд. — М.: Мир, 1964. — 511 с.
6. Брус W. The Normal Distribution: Characterizations with Applications. — Springer-Verlag, 1995, p. 139.
7. Ребро И.В. и др. Прикладная математическая статистика для технических специальностей: учеб. пособие/И.В. Ребро, В.А. Носенко, Н.Н. Короткова; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. — Волгоград: ИУНЯ ВолгГТУ, 2011. — 149 с.
8. Johnson N L., Kotz S., Balakrishnan N. Continuous Univariate Distributions, Vol. 2, 2nd Edition. Wiley, 1995.
9. Montgomery, D.C., Runger G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers (6th ed.) Wiley, 2014, p. 241.

10. Жаринов И.О., Жаринов О.О. Теоретическая оценка функции плотности вероятности распределения координат цвета в системах бортовой индикации. «Программная инженерия» № 3, 2015, с. 35 — 43. — [Электронный ресурс]. <http://window.edu.ru/resource/584/80584/files/pi2015n3.pdf> (дата обращения: 10.09.2020).

## REFERENCES

1. Svetunkov I.S., Svetunkov S.G. *Metody sotsialno-ekonomicheskogo prognozirovaniya. T. 1. Teoriya i metodologiya* [Social and economic forecasting methods. Vol. 1. Theory and Methodology]. M: Urite, 2015, 351 p.
2. Alefeld G., Hercberger U. *Vvedenie v intervalnye vychisleniya*. [Introduction to interval computing]. M.: Mir, 1987, 356 p.
3. Holding "Forum" postroit v Tamani odin iz krupneyshikh v Rossii konteynernykh terminalov [Forum Holding will build one of the largest container terminals in Russia in Taman]. <https://www.tks.ru/logistics/2015/06/22/0001> (accessed on 10.09.2020).
4. *Eshhe odin konteynernyy terminal na Kamchatke* [Another container terminal in Kamchatka] <https://seanews.ru/2019/05/06/ru-eshhe-odin-kontejnernyj-terminal-na-kamchatke> (accessed on 10.09.2020).
5. Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnosti i yeyo prilozheniya. Tom 1. 2-e izd.* [Introduction to probability theory and its applications. Volume 1, 2nd Edition] — M.: Mir, 1964, 511 p.
6. Bryc W. *The Normal Distribution: Characterizations with Applications*. — Springer-Verlag, 1995, p. 139.
7. Rebro I.V. et al. *Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya tehnikeskih specialnostey uchebnoe posobie*. [Applied Mathematical Statistics for Technical Specialties: A Study Guide]. Volgograd: IUNYA VolgGTU, 2011, 149 p.
8. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. *Continuous Univariate Distributions, Vol. 2, 2nd Edition*. Wiley, 1995.
9. Montgomery D.C., Runger G.C. *Applied Statistics and Probability for Engineers (6th ed.)*. Wiley, 2014, p. 241.
10. Zharinov I.O., Zharinov O.O. *Teoreticheskaya ocenka funkciy plotnosti veroyatnosti raspredeleniya koordinat cveta v sistemah bortovoi indikacii*. [Theoretical estimate of the probability density function of color coordinates distribution in on-board display systems]. *Programmnaya inzheneriya* [Software engineering], 2015, Vol. 3, pp. 35 — 43. <http://window.edu.ru/resource/584/80584/files/pi2015n3.pdf> (accessed on 10.09.2020).



## МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

---

УДК 629.5.028/627.231.8

### ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УДЕРЖАНИЯ МОРСКИХ ПЛАВУЧИХ ЗАЯКОРЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

**А.С. Большев**, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, e-mail: Bolshev\_as@spbstu.ru

**С.А. Фролов**, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, e-mail: Frolov\_sa@spbstu.ru

**Е.В. Шонина**, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, e-mail: katerinashonina@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы проектирования и настройки якорных систем удержания плавучих морских сооружений. Обсуждаются способы совершенствования и оптимизации систем удержания, представленные в публикациях российских и зарубежных авторов. Выявляются параметры, влияющие на безопасность функционирования плавучих морских сооружений, обсуждаются параметры, которые целесообразно принять в качестве критериальных. Рассматриваются ограничения, накладываемые на некритериальные параметры. Формулируется критерий оптимизации систем удержания морских плавучих сооружений в экстремальных режимах функционирования. Предлагается способ оптимизации систем удержания в соответствии с предложенным критерием. Приводится пример реализации предложенной процедуры оптимизации.

*Ключевые слова: морские плавучие заякоренные сооружения, системы заякорения, многопараметрическая оптимизация систем заякорения, режим выживания, метод штрафных функций, метод золотого сечения*

### OPTIMIZATION OF ANCHORING SYSTEMS OF OFFSHORE FLOATING STRUCTURES

**A.S. Bolshev**, DSc, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: Bolshev\_as@spbstu.ru

**S.A. Frolov**, PhD, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: Frolov\_sa@spbstu.ru

**E.V. Shonina**, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: katerinashonina@mail.ru

The article considers the problems of design and configuration of anchoring systems for floating marine structures, while discussing the methods of improving and optimizing of anchoring systems presented in the publications of Russian and foreign authors. The parameters that affect the safety of functioning of floating marine structures have been identified and potential criteria have been discussed. The restrictions imposed on non-critical parameters have also been considered. The optimization criterion of anchoring systems of marine floating structures in extreme modes of operation has been formulated and a method for optimizing of anchoring systems in accordance whereof has been suggested. An example of the implementation of the proposed optimization procedure has also been presented.

*Keywords: marine floating anchored structures, anchoring systems, multiparametric optimization of anchoring systems, survival mode, penalty function method, golden section method*

Задачи освоения ресурсов Мирового океана приводят к необходимости строительства и эксплуатации самых разнообразных сооружений, длительное время функционирующих в условиях открытого моря. Многие из этих сооружений обладают свойством мобильности, перемещаясь в те или иные моря и фиксируясь в необходимой акватории с помощью якорной системы удержания. К таким плавучим объектам относятся полупогружные буровые платформы, плавучие причалы, плавучие энергетические объекты, морские трубоукладчики, и т.п. [1].

Эксплуатация морских сооружений всегда связана с риском серьезных аварий вследствие воздействия экстремальных природных нагрузок. Очень часто подобные сооружения работают в условиях открытого моря, где воздействие ветровых порывов и экстремальных штормовых волн могут привести к необратимым последствиям. Высокая стоимость сооружений, удаленность их от береговых баз и наличие обслуживающего персонала, постоянно работающего на этих объектах, обуславливают самые высокие требования к надежности и безопасности.

Одним из важнейших факторов, определяющих безопасность работы рассматриваемых плавучих сооружений, является безотказная работа системы их удержания, которая при любых внешних воздействиях должна обеспечивать выполнение всех ограничений, обусловленных продолжением нормальной эксплуатации или сохранением жизнеспособности морского сооружения [2].

На этапе проектирования морского плавучего заякоренного сооружения или на этапе проектирования постановки его в той или иной акватории всегда необходимо решать вопросы состава и конфигурации системы его удержания, плановой ориентации сооружения, выбора длин и натяжения якорных связей, плановых углов заложения связей и т.п. Эта задача приводит к различным решениям в зависимости от характеристик самого плавучего сооружения, интенсивности ожидаемых природных воздействий, глубины моря и т.п.

Поиск наилучшего решения по параметрам системы удержания предполагает обеспечение наивысшего уровня безопасности функционирования сооружения в заданных условиях работы.

## 1. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УДЕРЖАНИЯ И УСТАНОВКИ СООРУЖЕНИЯ

Проблемы, возникающие на этапе проектирования системы удержания создаваемого сооружения, связаны с неопределенностью условий его практического использования. Мобильность морских плавучих заякоренных сооружений предполагает их потенциальное использование различных морях, на разных глубинах, в акваториях, где параметры ветро-волновых условий отличаются весьма существенно. При проектировании вновь создаваемой системы удержания необходимо определить ряд параметров: число линий системы удержания, их максимальную длину, калибр цепей или тросов, составляющих эти линии, расположение клюзов на корпусе сооружения, погонную массу и упруго-прочностные характеристики элементов якорной линии, тип, массу и держащую силу применяемых якорей.

Ввиду неопределенности условий на акватории при выборе параметров обычно приходится ориентироваться на максимально допустимые значения скорости ветра, высоты и периода волнения, глубины моря, обеспечивая безопасность постановки сооружения при использовании созданной системы удержания. В любом случае процесс создания системы удержания оказывается связан с варьированием значений множества параметров и поиска таких сочетаний этих параметров, при которых сооружение способно безопасно функционировать под действием экстремальных природных нагрузок.

Проблемы, возникающие на этапе постановки сооружения в известной акватории, выглядят более определенными. В этом случае уже известны внешние условия, число и состав якорных линий, их упруго-весовые характеристики, параметры якорей, которыми оснащено плавучее сооружение. Для обеспечения безусловной безопасности сооружения в период экстремальных штормов, ожидаемых в данной акватории, необходимо определить наилучшую плановую ориентацию сооружения, плановое расположение якорных связей, их длину и натяжение, а также подобрать наилучшее сочетание перечисленных характеристик, обеспечивающих наибольшую безопасность функционирования сооружения при самых худших внешних условиях.

При оценке поведения сооружения в период эксплуатации, при развернутой уже системе удержания обычно возможно только изменение натяжения связей, с помощью которого обеспечивается выполнение условий работоспособности сооружения. В этом режиме необходимо подбирать натяжение связей для выполнения ограничений работоспособности сооружения (более жестких, чем в режиме штормового отстоя) или подбирать предельные внешние условия, при которых допустима эксплуатация сооружения.

В настоящей работе рассматривается задача оптимизации систем удержания плавучих заякоренных сооружений в режиме штормового отстоя (выживания). Эта задача шире по сравнению с задачей оптимизации в режиме эксплуатации. В то же время, эта задача является одним из главных элементов оптимизации систем удержания на этапе ее начального проектирования.

## 2. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАЯКОРЕНИЯ

Опыт проектирования систем удержания и способы определения параметров этих систем представлены в ряде российских и зарубежных публикаций.

В частности, в нормативном документе Российского морского регистра судоходства (РС) [3] для плавучих буровых установок есть рекомендации по выбору якорных линий для использования на стадии перегона платформ к точке постановки: способ оценки длины якорных связей, их калибра и массы якорей на основании заданного водоизмещения плавучего объекта и его надводной парусности. Этот способ носит весьма приблизительный характер, применим для ограниченного диапазона скоростей ветра и волнения, не учитывает пространственной ориентации якорных линий и поэтому применение его к анализу системы удержания платформы в режимах эксплуатации или выживания проблематично. В том же нормативном документе предлагается для выбора параметров системы удержания платформы изучать ее поведение в различных режимах функционирования, определять экстремальные усилия в элементах системы удержания, сопоставлять их с критериями безопасности и на этой основе совершенствовать состав системы удержания. Однако каким образом можно организовать процедуру улучшения параметров системы удержания — в нормативном документе не излагается.

Тем не менее инженерная практика конструкторских организаций при проектировании морских заякоренных сооружений в целом соответствует рекомендациям нормативного документа РС [3]. Например, в работе [4] авторы показывают расчет системы заякорения, выполненный с помощью пакета программы "POSITION", обеспечивающий достижение критериев безопасности в соответствии [3]. Результаты работы позволяют определить основные параметры системы удержания, а также сделать вывод о возможности обеспечения системой заякорения надежной установки платформы с допустимым смещением.

В работе [5] изучено влияние различных нагрузок на движение плавучего сооружения и на саму систему заякорения. К основным параметрам, характеризующим безопасность работы, авторы также относят горизонтальную жесткость системы, но при предварительном проектировании системы заякорения учитывают следующий критерий безопасности: максимальное натяжение якорной линии не должно превышать допустимо возможное. Динамический анализ для трех различных глубин проведен во временной области с использованием программных комплексов Simo-Riflex-AeroDyn.

Аналогичные критерии рассмотрены в статье [6]. Авторы представили результаты анализа заякорения полупогружной платформы Scarabeo 7 по правилам двух классификационных обществ: American Petroleum Institute (API) и Det Norske Veritas (DNV). Целью исследования было сравнение полученных результатов. В процессе эксплуатации морского заякоренного объекта должны соблюдаться основные критерии, к которым авторы относят максимальное смещение объекта, ограниченное во избежание повреждения или поломки, и максимальное натяжение якорных связей, определяемое коэффициентом безопасности.

Требования к коэффициенту безопасности в качестве критерия оценки системы позиционирования также рассматривают авторы [7]. Коэффициенты безопасности представляют собой отношение разрывной нагрузки к максимальному усилию в наиболее нагруженной якорной связи. Численное моделирование проводилось во временной области в программном комплексе "Anchored Structures", анализ расчетов дал высокую сходимость результатов с реальными процессами.

Аналогично в качестве основных критериев для определения параметров якорных связей приняты требования [3] в статье [8]. Для определения расчетной длины якорной связи авторы [8] выполнили серию предварительных расчетов и выбрали такую длину связей, при которой вертикальное усилие, передаваемое на якорь, равно нулю. Оценка параметров якорных связей производилась с помощью пакетов программ "POSITION" и "Anchored Structures".

Авторы перечисленных выше работ выполняют проектирование и анализ работы систем удержания, выбирая в качестве критерия оценки те или иные параметры системы. Как правило, сформированные системы удержания обеспечивают выполнение критериев безопасности, но не являются наилучшими вариантами инженерного решения. Из-за больших вычислительных затрат, связанных с моделированием поведения заякоренных сооружений при различных сочетаниях внешних воздействий, алгоритмы оптими-

зации в цикле проектирования не используются. Без применения формальных подходов к оптимизации, проектирование систем удержания на практике обычно ограничивается итеративным подходом, основанным на личном опыте и поиске приемлемого инженерного решения.

В ряде зарубежных работ авторы более детально подходят к вопросу оптимизации, используя эвристические методы [9 — 18]. Одним из таких методов является генетический алгоритм. Генетический алгоритм является разновидностью эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи с использованием методов естественной эволюции. По своей сути, алгоритм сводится к неполному перебору вариантов систем удержания, обеспечивающему улучшение значения целевой функции. При этом моделирование поведения заякоренного сооружения, расчет и оценка значений целевой функции производятся не одновременно и в разных программных комплексах.

Некоторые авторы для процесса оптимизации применяют метод роя частиц, который предполагает расчет большого числа систем удержания для создания облака точек, внутри которого можно искать наилучшее значение целевой функции. Такой подход используется для решения задачи заякорения плавучих платформ в работах [19, 20].

Обзор существующих работ российских авторов позволяет прийти к выводу, что большинство указанных выше методов моделирования и расчета позволяют рассчитать заранее выбранные якорные связи, но вопрос выбора оптимальной системы удержания и ее настройки не решается. Из-за чего при проектировании инженеру приходится выбирать систему удержания по опыту проектирования, моделировать и рассчитывать ее, а затем методом итераций улучшать параметры до значений, приемлемых с точки зрения критериев безопасности.

Что касается зарубежных исследований, по вопросу оптимальности систем заякорения представлены работы с применением нечеткой логики. Используемые подходы позволяют сформировать нечеткое множество, а задача оптимизации подразумевает выбор «серединного» варианта, удовлетворяющего заданным ограничениям. В результате получается не оптимальное решение, а близкое к оптимальному. Кроме того, в рассмотренных решениях моделирование поведения заякоренного сооружения и работа его системы удержания рассматриваются отдельно от самой процедуры оптимизации, в различных программных средах. Такой подход исключает возможность получения точного оптимального решения.

Таким образом, можно заключить, что развитие методов, позволяющих получить точное оптимальное решение для параметров системы удержания плавучих заякоренных сооружений, является логичным завершением идеологии российских нормативных документов, совершенствует и приемы поиска оптимальных решений на основе планирования численных экспериментов [21, 22], а также позволяет отказаться от приближенных решений нечеткой логики в ряде практических задач.

### 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках настоящей работы ставятся следующие задачи:

- выявить параметры, влияющие на безопасность работы плавучего сооружения в целом и системы удержания в частности;
- определить параметр, который может быть принят в качестве критериального значения;
- сформулировать критерий оптимальности для режима выживания;
- разработать метод оптимизации системы удержания плавучего заякоренного сооружения в режиме выживания.

Существует ряд параметров, характеризующих поведение заякоренного сооружения под действием статических и динамических природных нагрузок, которые влияют на его безопасность:

натяжение якорных связей, которое в любой произвольный момент времени не должно превышать предельно допустимого усилия;

горизонтальное смещение сооружения, которое не должно приводить к повреждению элементов его конструкции;

вертикальное смещение сооружения, которое не должно приводить к ударам волн о палубу сооружения;

угловые перемещения сооружения, которые не должны препятствовать работе сооружения и жизнедеятельности экипажа;

отсутствие подвижки якорей, которое гарантирует сохранение начальных характеристик системы удержания сооружения.

Все перечисленные параметры так или иначе влияют на безопасность работы плавучего заякоренного сооружения. Однако в [3] в качестве критерия безопасности выделяется коэффициент запаса по натяжению

якорных связей, в этой связи именно он может быть принят в качестве критериального значения, а остальные параметры можно рассматривать как ограничения, которые будут учитываться при оптимизации системы удержания по выбранному критерию.

#### 4. ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ СООРУЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ВЫЖИВАНИЯ

В режиме выживания плавучее сооружение должно быть установлено на акватории и удерживаться с помощью якорной системы удержания. При этом ориентация сооружения, характеризуемая курсовым углом  $\beta$ , является предметом поиска в процессе оптимизации.

Якорные связи, которыми оснащено сооружение, имеют известную предельно возможную длину, а упруго-весовые характеристики их представлены в паспортной документации. Длина связей может быть выбрана в процессе оптимизации и ограничена следующим соотношением:

$$H \leq L \leq L_{\max}, \quad (1)$$

где  $L$  — длина связи, используемая в системе удержания;  
 $H$  — глубина моря;  
 $L_{\max}$  — максимально возможная длина связи.

Число якорных связей  $N$  известно, а углы их планового заложения выбираются в процессе оптимизации.

Начальное натяжение связи с запасом не должно превышать разрывное усилие. Этот запас определяется в [3] и зависит от рассматриваемого режима (выживание, эксплуатация, аварийный режим), а также от способа анализа поведения сооружения (квазистатический или динамический). Таким образом, формальное ограничение на начальное натяжение имеет вид:

$$0 < F_0 < F_b/k_n, \quad (2)$$

где  $k_n$  — нормативный коэффициент запаса по натяжению якорных линий;  
 $F_b$  — разрывное усилие якорных связей, которыми оснащено сооружение;  
 $F_0$  — начальное натяжение якорных связей.

Обычно плавучее заякоренное сооружение, установленное в море, подвергается воздействию ветра, течения и волнения. Эти внешние воздействия изменяются во времени и могут воздействовать в различных сочетаниях и с разных направлений. Обычно, при анализе экстремальных воздействий строятся сочетания нагрузок, характерные для каждого направления действия сил, учитывающие розу ветров, течения и волнения. В дальнейшем направления действия сил будет обозначаться индексом  $k$  (например,  $k = 1, 2 \dots 8$ ).

Формализуя представление о наибольшей безопасности сооружения с точки зрения запасов по натяжению связей, наилучшим мы можем признать такой вариант системы удержания, при котором при самом худшем сочетании внешних воздействий (худшем направлении воздействия), за период расчетного экстремального шторма, в самой натянутой якорной связи сохраняется наибольший запас по натяжению. Математическая запись этого критерия представлена ниже:

$$\max_{(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \min_k \left[ \frac{F_b}{\max_i F_{i,k}(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \right], \quad (3)$$

где  $F_0$  — начальное натяжение якорных связей;  
 $L_i$  — длина связи с номером  $i$  ( $i = 1, 2, \dots n$ );  
 $\alpha_i$  — плановый угол заложения связи;  
 $\beta$  — курсовой угол постановки сооружения.

Предложенный критерий предполагает, что при известных параметрах натяжения якорных связей, известной их длине, принятом курсовом угле постановки сооружения и плановых углах заложения связей должно быть промоделировано поведение сооружения для штормов с различных направлений ( $k$ ), для каждого направления определено максимальное натяжение, наблюдавшееся в какой-либо связи ( $\max_i F_{i,k}(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)$ ), вычислен коэффициент запаса по натяжению для этой «худшей» связи, и в качестве результата такого численного эксперимента определен коэффициент запаса для «худшей» связи при действии внешних нагрузок с «худшего» направления ( $\min_k$ ). Затем, варьируя параметры  $F_0, L, \beta, \alpha$ , необходимо найти такие их сочетания, чтобы «худший» коэффициент запаса оказался максимально возможным.

## 5. МЕТОД РЕШЕНИЯ

С математической точки зрения решение задачи сводится к минимизации функционала  $J$  с соблюдением ряда ограничений:

$$J(F_0, L_i, \beta, \alpha_i) = \max_{(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \min_k \left[ \frac{F_b}{\max_i F_{i,k} \cdot k(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \right]$$

$$\begin{aligned} \min_k \Delta_k &> \Delta_0 \\ \max_k \varphi_{x,k} &< \varphi_{x\max} \\ \max_k \varphi_{y,k} &< \varphi_{y\max} \\ \max_i F_{i,k} &< F_b/k_n \\ L_{\min} &< L_i \leq L_{\max} \\ \alpha_{i-1} &< \alpha_i \leq \alpha_{i\max} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta_0$  и  $\Delta_k$  — минимально допустимый клиренс сооружения и минимальный клиренс, зарегистрированный при моделировании экстремального шторма с направления "k";  
 $\varphi_{x,k}$  и  $\varphi_{x\max}$  — максимальный угол крена сооружения при моделировании экстремального шторма с направления "k" и максимально допустимый угол крена;  
 $\varphi_{y,k}$  и  $\varphi_{y\max}$  — максимальный угол дифферента сооружения при моделировании экстремального шторма с направления "k" и максимально допустимый угол дифферента;  
 $F_{i,k}$  — максимальное натяжение связи с номером  $i$  при действии шторма с направления "k".

Начальные значения оптимизируемых параметров определяются следующим образом. Начальное натяжение всех якорных связей принимается одинаковым в диапазоне, указанном в (2). При реализации процедуры оптимизации натяжение всех связей изменяется, но сохраняется также одинаковым во всех связях для обеспечения симметричной реакции на разнонаправленные нагрузки.

Курсовой угол в процессе оптимизации изменяется в пределах  $(0, \pi)$  ввиду симметричной, как правило, формы сооружений относительно продольной оси. Начальное значение угла произвольно в пределах области определения.

Плановые углы заложения связей задаются и изменяются для каждой связи с номером  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Для начала процесса оптимизации исходные значения плановых углов заложения связей  $\alpha_i$  могут быть представлены таким образом

$$\alpha_1 = \alpha_0, \alpha_{i+1} = \alpha_i + 2\pi/N,$$

где  $\alpha_0$  — произвольно назначенный угол;  
 $i$  — индекс определяет номер связи;  
 $N$  — число якорных связей.

При оптимизации для сохранения симметричных реакций якорной системы удержания независимыми считаются плановые углы связей, оказавшихся в первом квадранте, а остальные плановые углы определяются в силу симметрии относительно продольных и поперечных осей координат. Начальные значения независимых углов задаются в диапазоне  $(0, \pi/2)$  так, чтобы угол заложения каждой последующей связи был больше предыдущего.

Начальные длины связей задаются одинаковыми, исходя из ограничения (1). Для обеспечения одинаковой реакции якорной системы на воздействия нагрузок с разного направления при дальнейшей оптимизации независимыми считаются длины связей, расположенных в первом квадранте, а остальные длины принимаются равными им в силу симметрии относительно продольной и поперечной осей координат.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо выполнить многопараметрическую оптимизацию функционала (4) при известных начальных значениях переменных и при наличии ряда ограничений.

Учитывая особенности функционала и ограничений (4), в дальнейшем предлагается сформировать функционал, который включал бы в себя все ограничения путем использования функции штрафов [23]:

$$J_f(F_0, L_i, \beta, \alpha_i) = \max_{(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \min_k \left[ \frac{F_b}{\max_i F_{i,k} \cdot k(F_0, L_i, \beta, \alpha_i)} \right] - \sum S_q. \quad (5)$$

Здесь  $S_q$  — функция штрафа, формируемая для каждого ограничения из (4).

В функционале (5), в отличие от (4), все ограничения представлены в виде штрафных функций  $S_q$ , каждая из которых отражает штраф за нарушение ограничения с номером  $q$ . Если все ограничения выполнены, мы получим тот же функционал (4).

Функцию штрафов для произвольного параметра  $x(a < x < b)$  предлагается вводить в силу следующих соотношений:

$$S = p^{(a - x + |a - x|)/a} \quad S = p^{(x - b + |x - b|)/b}. \quad (6)$$

Функция штрафа в форме (6) принимает нулевое значение в области, где ограничение выполняется и имеет положительное численное значение в области нарушения ограничения. Для масштабирования функции штрафа используется коэффициент  $p$ .

Для поиска экстремума функционала (5) используется метод последовательной оптимизации функционала по каждому из аргументов. При этом оптимизация (5) последовательно осуществляется для параметров  $F_0, \beta, \alpha_i, L_i$  до тех пор, пока значение целевой функции не стабилизируется в районе экстремального значения. Задача считается решенной, если экстремальное значение функционала (5) найдено, и при этом выполнено условие  $\Sigma S_q = 0$ .

На каждом шаге процедуры покоординатной оптимизации процедура реализуется для одной текущей переменной  $F_0, \beta, \alpha_i$  или  $L_i$ . Для оптимизации (5) используется метод деления интервала определения аргумента.

Известно три схожих подхода, реализующих подобную идею. Это метод половинного деления, метод Фибоначчи и метод золотого сечения [24]. Все они отличаются только способом деления интервала на части. Погрешности этих методов сопоставимы, но методы золотого сечения и Фибоначчи обладают заметным преимуществом, так как ввиду особого способа деления интервала одна из двух контрольных точек, которые делят интервал, используется в следующей итерации. В настоящей работе практическое применение нашел метод золотого сечения, который при заданной относительной погрешности результата поиска экстремума  $\epsilon$ , требует проведения " $M$ " численных экспериментов ( $M = -4,82 \log \epsilon$ ). Число " $M$ " в практических задачах оказывалось в пределах 10.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изложенная методология была реализована в рамках программного комплекса [25], позволяющего моделировать во временной области поведение морских плавучих заякоренных сооружений под действием ветра, течения и волнения. Программный комплекс позволяет моделировать шторма заданной повторяемости, изучать поведения заякоренного объекта в динамической постановке с учетом воздействия нерегулярного волнения и ветра. Программная реализация методологии и возможности самого программного комплекса позволяли выполнять на персональном компьютере параллельное моделирование поведения заякоренного сооружения при одновременном решении во временной области восьми задач, связанных с действием штормов с различных направлений.

В качестве примера ниже приводится оптимизация системы удержания полупогружной плавучей платформы проекта MOSS CS50 MK2, устанавливаемой на глубине 90 м в районе Киринского газоконденсатного месторождения к Востоку от о. Сахалин.

Платформа удерживается на точке бурения с помощью якорной системы, включающей в себя восемь якорных связей. В якорной системе используется цепи калибра 84 мм, полной длиной 2130 м — цепь якорная с распорками категории NV P5 с разрывным усилием 8381 кН. Погонный вес цепи в воздухе 1,6 кН/м, модуль Юнга —  $0,58 \cdot 10^8$  кН/м. Для выполнения моделирования в ПК "Anchored Structures" была подготовлена трехмерная геометрическая модель платформы, представленная на рис. 1.

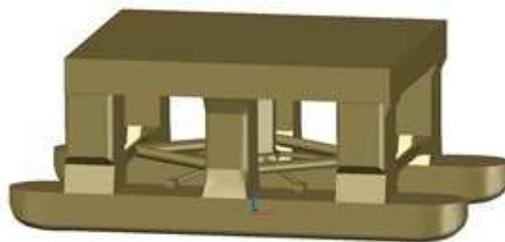


Рис. 1 Общий вид геометрической модели платформы

Для исследования поведения платформы в режиме выживания принимались внешние условия, характерные для шторма с повторяемостью один раз в сто лет согласно справочным данным РС [26]. Далее на основе многократного моделирования во временной области экстремального шторма продолжительностью 6 ч, распространяющегося с восьми различных направлений, изучалось поведение платформы и экстремальные натяжения в якорных связях, и на этой основе с помощью критерия (5) производилась оптимизация системы удержания. Ввиду реализации численных экспериментов в динамической постановке значения коэффициентов запаса по натяжению якорных связей [3] принимались для условий динамического анализа.

В исходном положении полагалось, что платформа установлена с курсовым углом  $45^\circ$ , все якорные цепи имеют максимально возможную длину 2100 м, а якорные линии в плане расположены с одинаковым шагом в  $45^\circ$ , а первая линия имеет угол  $22,5^\circ$  с продольной осью платформы (рис. 2).

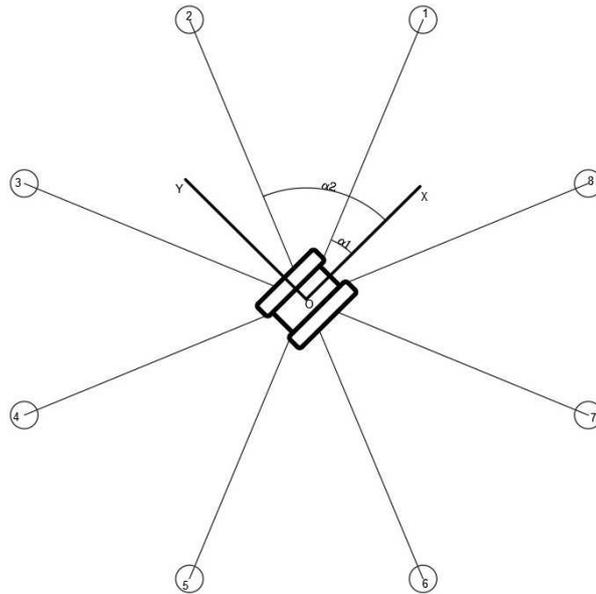


Рис. 2 Исходное плановое расположение якорных линий

Первый шаг оптимизации, связанный с поиском наилучшего натяжения связей (рис. 3), показал, что в исходном положении наилучшим является начальное натяжение 500 кН, а коэффициент запаса по натяжению якорных связей при исходной конфигурации системы удержания даже при лучшем натяжении, находится согласно [3] на грани допустимого значения ( $K_n = 1,5$ ). Второй шаг оптимизации (рис. 4) показал, что максимально возможная длина якорных связей является минимально допустимой. Курсовой угол постановки платформы  $135^\circ$  оказался наилучшим на основании сопоставления штормов с различных направлений. Затем был выполнен поиск наилучших углов заложения якорных связей. Поскольку независимыми являются значения только первых двух углов (остальные определяются на основании сохранения симметрии), были определены их наилучшие значения  $\alpha_1 = 10,5$ ,  $\alpha_2 = 77,5$ . Таким образом, после первого цикла оптимизационной процедуры были получены параметры системы удержания, обеспечивающие коэффициенты запаса по натяжению якорных связей, представленные в табл. 1.

На втором цикле оптимизации использовались начальные значения параметров, полученные на предыдущем цикле. Вновь полученные параметры постановки платформы определялись следующими значениями параметров: курсовой угол постановки платформы 0 или  $180^\circ$  (курсовой угол мало влиял на значение критерия оптимальности), оптимальное начальное натяжение составило 450 кН, длина связей — 2100 м, значения независимых плановых углов заложения связей —  $\alpha_1 = 10,5$ ,  $\alpha_2 = 87,5$ .

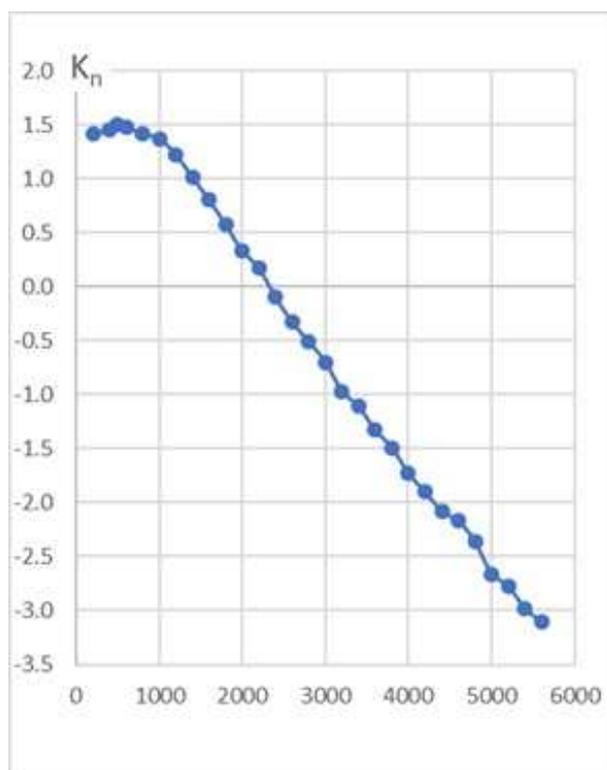


Рис. 3 Зависимость коэффициента запаса по натяжению связей от начального натяжения при первом цикле оптимизации

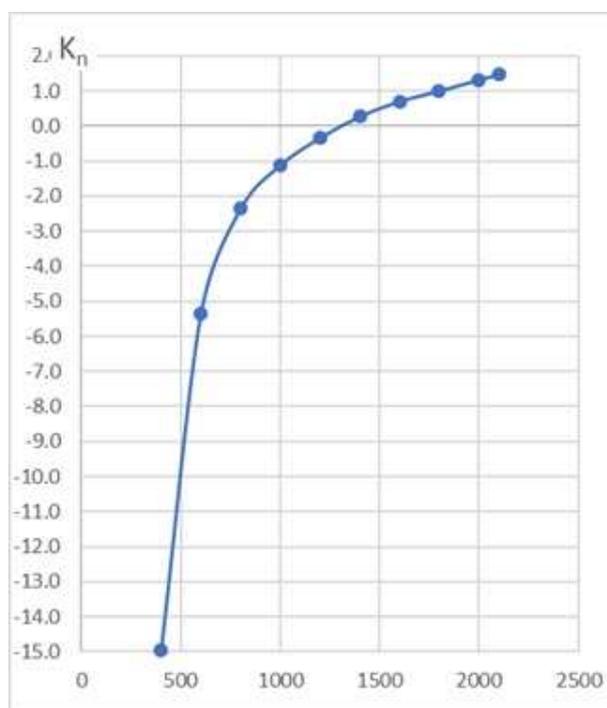


Рис. 4 Зависимость коэффициента запаса по натяжению связей от длины связей при первом цикле оптимизации

По результатам второго цикла оптимизации были получены коэффициенты запаса по натяжению связей, представленные в табл. 2.

Таблица 1

**Коэффициенты запаса при первом цикле оптимизации**

Направление	Наихудший коэффициент запаса по натяжению в якорных связях
В	1,71
З	1,85
С	<b>1,59</b>
СВ	1,66
СЗ	1,68
Ю	1,63
ЮВ	1,66
ЮЗ	1,93

Таблица 2

**Коэффициенты запаса при втором цикле оптимизации**

Направление	Наихудший коэффициент запаса по натяжению в якорных связях
В	1,80
З	1,98
С	1,78
СВ	<b>1,66</b>
СЗ	1,67
Ю	1,85
ЮВ	1,75
ЮЗ	1,94

Таким образом, процедура оптимизации в данном примере позволила определить характеристики системы удержания, при которых обеспечивается выполнение критериев безопасности и уйти с границы минимально допустимых значений коэффициентов запаса по натяжению якорных связей. В выполненном тестовом расчете была также подтверждена выпуклость функционала (5) и сходимости процедуры оптимизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании различных морских плавучих заякоренных сооружений или при проектировании их постановки в известной акватории каждый раз возникает задача выбора параметров элементов системы удержания, обеспечивающих наивысшую безопасность сооружения в процессе его использования.

Задача выбора наилучших параметров систем удержания может быть сформулирована различными способами, которые могут приводить к многокритериальным и многопараметрическим задачам оптимизации. Решение задач выбора параметров систем удержания в наиболее сложной постановке возможна с помощью методов нечеткой логики, позволяющей найти приемлемые, но не оптимальные решения.

В настоящей работе предложен вариант постановки задачи оптимизации системы удержания плавучего заякоренного сооружения для режима выживания, который позволяет найти точное оптимальное решение для основных параметров якорной системы удержания. Предложен способ решения задачи многопараметрической оптимизации системы удержания, реализуемый с помощью существующих программных продуктов, моделирующих динамику морских плавучих сооружений под действием природных нагрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симаков Г.В., Шхинек К.Н., Смелов В.А. и др. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе: — Л.: Судостроение, 1989. — 328 с.
2. Elistratov, V.V. et al. The investigation of conceptual approaches to the creation of marine ice-resistant floating wind power plant. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2019. Vol. 1. pp. 428 — 434.
3. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ, Российский морской регистр судоходства, СПб, 2018, 479 с.
4. Tertyshnikova A.S., Blagovidova I.L., Kushnir V.M. Parameters of the position system for the deep-water drilling platform. Vestnik SevNTU [Bulletin of SevNTU]. 2010. No. 106. pp. 164 — 167.
5. Xu K., Gao Z., Moan T. Effect of hydrodynamic load modelling on the response of floating wind turbines and its mooring system in small water depths. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1104. DOI:10.1088/1742-6596/1104/1/012006
6. Kolacio I., Prpić-ORŠIĆ J., Kurilić K. Analiza sidrenja poluuronjive platforme Scarabeo 7, Brodogradnja. 2010, 61 p., pp. 34-41.
7. Naumenko A.A., Blagovidova I.L., Pyanov A.V., Ivanova O.A. Numerical simulation of the positioning process of complex floating objects when performing offshore operations. Transactions of the Krylov state research center. 2019. No. S2. Pp. 239-247. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-239-247
8. Ivanova O.A., Kushnir V.M., Blagovidova I.L. Physical models of TLP and SPAR deepwater drilling platforms for experimental researches of the dynamics in the experimental basin. Vestnik SevNTU [Bulletin of SevNTU]. 2014. No. 153. pp. 72 — 79.
9. Iqbal M., Azam M., Naeem M., Khwaja A.S., Anpalagan A. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. No. 39. pp. 640 — 654. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.120.
10. Wu B., Cheng X., Chen Y., Ni X., Zhang K. Design Automation of Mooring Systems for Floating Structures. Practical Design of Ships and Other Floating Structures. 2020. No. 65. pp. 579 — 594. DOI: 10.1007/978-981-15-4680-8\_40.
11. Montasir O. A., Yenduri A., Kurian V.J. Mooring System Optimization and Effect of Different Line Design Variables on Motions of Truss Spar Platforms in Intact and Damaged Conditions. China Ocean Engineering. 2019. 33 (4). pp. 385 — 397. DOI: 10.1007/s13344-019-0037-1.
12. Monteiro B.F., de Pina A.A., Baioco J.S., Albrecht C.H., de Lima B.S.L.P., Jacob B.P. Toward a methodology for the optimal design of mooring systems for floating offshore platforms using evolutionary algorithms. Marine Systems and Ocean Technology. 2016. 11 (3-4). pp. 55 — 67. DOI: 10.1007/s40868-016-0017-8
13. De Pina A.C., de Pina A.A., Albrecht C.H., Leite Pires de Lima B.S., Jacob B.P. ANN-based surrogate models for the analysis of mooring lines and risers. Applied Ocean Research. 2013. No. 41. pp. 76 — 86. DOI: 10.1016/j.apor.2013.03.003
14. Carbone A., Menezes, I., Martha, L. F. Mooring Pattern Optimization using Genetic Algorithms. 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization. Brazil. Rio de Janeiro, 2005.
15. Shafieefar M., Rezvani A. Mooring optimization of floating platforms using a genetic algorithm. Ocean Engineering. 2007. 34 (10). pp. 1413 — 1421. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.10.005
16. Mirzaei M., Maimun A., Priyanto A., Fitriady A. Mooring Pattern Optimization Using A Genetic Algorithm. Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2014, 66, pp. 189 — 193. DOI: 10.11113/jt.v66.2519
17. Jin H.Z., Su X.Y., Yu A.C., Lin F. Design of automatic mooring positioning system based on mooring line switch. Dianji Yu Kongzhi Xuebao [Electric Machines and Control]. 2014. 18 (5), pp. 93 — 98.
18. Xu S.W., Liang, M.X., Wang, X.F., Ding, A.B. A Mooring System Deployment Design Methodology for Vessels at Varying Water Depths. China Ocean Engineering. 2020. Vol. 34, No. 2. pp. 1 — 13. DOI: 10.1007/s13344-020-0018-4
19. Monteiro B.D.F., Albrecht C H. et al. Optimization of mooring systems for floating offshore platforms considering seabed obstacles. Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Norway. Trondheim, 2017. DOI: 10.1115/OMAE2017-61482
20. Monteiro B.D.F., Baioco J.S., Albrecht C.H., de Lima B.S.L.P., Jacob B.P. Optimization of mooring systems in the context of an integrated design methodology. Marine Structures. 2021. Vol. 75. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102874
21. Teslyaruk I., Bolshev A. Numerical analysis of behavior offshore anchored structures and improvement of systems of their holding. Proceedings of the Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry. Malta. Sliema, 2015. pp. 188 — 190. DOI: 10.1109/MCSI.2015.45
22. Teslyaruk I., Bolshev A. Technique optimization of holding systems of marine floating objects on the basis of numerical modeling of their behavior. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. 2016. Vol. 10. pp. 72 — 76.
23. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. — М.: Факториал Пресс, 2002.
24. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров, Москва: Высшая школа, 1994, 273 с.
25. Большев А.С., Фролов С.А., Кутейников М.А. Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе "Anchored Structures" // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства., 2013. № 36. с. 68 — 90.
26. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. Российский морской регистр судоходства, СПб, 2003, 214 с.

## REFERENCES

1. Simakov G.V., Shkhinek K.N., Smelov V.A. et al. *Morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya na kontinentalnom shelfe* [Marine hydrotechnical structures on the continental shelf] — L.: Sudostroenie, 1989. — 328 p.
2. Elistratov V.V. et al. The investigation of conceptual approaches to the creation of marine ice-resistant floating wind power plant. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2019. Vol. 1. pp. 428 — 434.
3. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms, Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2018, 479 p. (In Russian)
4. Tertyshnikova A.S., Blagovidova I.L., Kushnir V.M. Parameters of the position system for the deep-water drilling platform. Vestnik SevNTU [Bulletin of SevNTU]. 2010. No. 106. pp. 164 — 167.
5. Xu K., Gao Z., Moan T. Effect of hydrodynamic load modelling on the response of floating wind turbines and its mooring system in small water depths. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1104. DOI:10.1088/1742-6596/1104/1/012006
6. Kolacio I., Prpić-ORŠIĆ J., Kurilić K. Analiza sidrenja poluuronjive platforme scarabeo 7, Brodogradnja. 2010, 61 p., pp. 34 — 41.
7. Naumenko A.A., Blagovidova I.L., Pyanov A.V., Ivanova O.A. Numerical simulation of the positioning process of complex floating objects when performing offshore operations. Transactions of the Krylov state research center. 2019. No. S2. pp. 239 — 247. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-1-239-247
8. Ivanova O.A., Kushnir V.M., Blagovidova, I.L. Physical models of TLP and SPAR deepwater drilling platforms for experimental researches of the dynamics in the experimental basin. Vestnik SevNTU [Bulletin of SevNTU]. 2014. No. 153. pp. 72 — 79.
9. Iqbal M., Azam M., Naeem M., Khwaja A.S., Anpalagan A. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. No. 39. pp. 640 — 654. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.120.
10. Wu B., Cheng X., Chen Y., Ni X., Zhang, K. Design Automation of Mooring Systems for Floating Structures. Practical Design of Ships and Other Floating Structures. 2020. No. 65. pp. 579 — 594. DOI: 10.1007/978-981-15-4680-8\_40.
11. Montasir O. A., Yenduri A., Kurian V.J. Mooring System Optimization and Effect of Different Line Design Variables on Motions of Truss Spar Platforms in Intact and Damaged Conditions. China Ocean Engineering. 2019. 33 (4). pp. 385 — 397. DOI: 10.1007/s13344-019-0037-1.
12. Monteiro B.F., de Pina A.A., Baioco J.S., Albrecht C.H., de Lima B.S.L.P., Jacob B.P. Toward a methodology for the optimal design of mooring systems for floating offshore platforms using evolutionary algorithms. Marine Systems and Ocean Technology. 2016. 11 (3-4). pp. 55 — 67. DOI: 10.1007/s40868-016-0017-8
13. De Pina A.C., de Pina A.A., Albrecht C.H., Leite Pires de Lima B.S., Jacob B.P. ANN-based surrogate models for the analysis of mooring lines and risers. Applied Ocean Research. 2013. No. 41. pp. 76 — 86. DOI: 10.1016/j.apor.2013.03.003
14. Carbone A., Menezes, I., Martha, L. F. Mooring Pattern Optimization using Genetic Algorithms. 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization. Brazil. Rio de Janeiro, 2005.
15. Shafieefar M., Rezvani A. Mooring optimization of floating platforms using a genetic algorithm. Ocean Engineering. 2007. 34 (10). pp. 1413 — 1421. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2006.10.005
16. Mirzaei M., Maimun A., Priyanto A., Fitriady A. Mooring Pattern Optimization Using A Genetic Algorithm. Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2014, 66, pp.189 — 193. DOI: 10.11113/jt.v66.2519
17. Jin H.Z., Su X.Y., Yu A.C., Lin F. Design of automatic mooring positioning system based on mooring line switch. Dianji Yu Kongzhi Xuebao [Electric Machines and Control]. 2014. 18 (5), pp. 93 — 98.
18. Xu S.W., Liang, M.X., Wang, X.F., Ding, A.B. A Mooring System Deployment Design Methodology for Vessels at Varying Water Depths. China Ocean Engineering. 2020. Vol. 34, No. 2. pp. 1 — 13. DOI: 10.1007/s13344-020-0018-4
19. Monteiro B.D.F., Albrecht C H. et al. Optimization of mooring systems for floating offshore platforms considering seabed obstacles. Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Norway. Trondheim, 2017. DOI: 10.1115/OMAE2017-61482
20. Monteiro B.D.F., Baioco J.S., Albrecht C.H., de Lima B.S.L.P., Jacob B.P. Optimization of mooring systems in the context of an integrated design methodology. Marine Structures. 2021. Vol. 75. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102874
21. Teslyaruk I., Bolshev A. Numerical analysis of behavior offshore anchored structures and improvement of systems of their holding. Proceedings of the Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry. Malta. Sliema, 2015. pp. 188 — 190. DOI: 10.1109/MCSI.2015.45
22. Teslyaruk I., Bolshev A. Technique optimization of holding systems of marine floating objects on the basis of numerical modeling of their behavior. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. 2016. Vol. 10. pp. 72 — 76.
23. Vasilev F.P. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. — M.: Faktorial Press, 2002
24. Amosov A.A., Dubinskiy Yu.A., Kopchenova N.V. *Vychislitelnye metody dlya inzhenerov* [Computational methods for engineers], Moskva: Vysshaya shkola, 1994, 273 p.
25. Bolshev A.S., Frolov S.A., Kuteynikov M.A. *Matematicheskoe modelirovanie povedeniya morskikh plavuchikh ob'ektov v programnom komplekse "Anchored Structures"* [Mathematical modeling of marine floating objects behavior in the "Anchored Structures" software package] // Research Bulletin of Russian Maritime Register of Shipping, 2013. No. 36. pp. 68 — 90.
26. *Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiyskogo morey* [Reference data on wind and wave regimes in the Barents, Okhotsk and Caspian seas]. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2003, 214 p.

УДК 629.5.017

## ОЦЕНКА ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ ЛЕДОКОЛЬНЫХ СУДОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТОГО КРИТЕРИЯ

**Е.Б. Карулин**, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: evgeny@ek17106.spb.edu

**М.М. Карулина**, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: marina@ek17106.spb.edu

Ледопроходимость является одной из важнейших эксплуатационных характеристик ледоколов и судов ледового плавания. Этот параметр, определяющий максимальную толщину ровного льда, в котором судно может двигаться с минимальной устойчивой скоростью (2-3 узла), зависит от параметров корпуса судна, его пропульсивного комплекса и от мощности энергетической установки. В настоящей статье представлен подход, позволивший выработать простой критерий ледопроходимости ледоколов. Построение структурной формулы для расчета критерия ледопроходимости основано на анализе данных работы различных ледоколов в ледовых условиях, а коэффициенты, входящие в эту формулу, получены с привлечением информации о фактической ледопроходимости этих ледоколов и с использованием метода наименьших квадратов. Рассмотрены особенности распространения предложенной формулы расчета критерия ледопроходимости ледоколов на транспортные суда ледового плавания и суда обеспечения. Критерий целесообразно использовать для экспресс-оценки ледопроходимости в практических задачах судовождения — подборе судов для выполнения некоторых ледокольных операций проводки, сопровождения, буксировки, управления ледовой обстановкой.

*Ключевые слова:* ледопроходимость, ледокол, мощность, регрессионная модель, метод наименьших квадратов

## EVALUATION OF SHIP ICEBREAKING CAPABILITY BASED ON A SIMPLE CRITERION

**E.B. Karulin**, PhD, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, e-mail: evgeny@ek17106.spb.edu

**M.M. Karulina**, PhD, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, e-mail: marina@ek17106.spb.edu

The icebreaking capability is one of the most important parameters for operation of icebreakers and ice-going ships. The icebreaking capability is defined by the maximum thickness of solid level ice that the ship in question can negotiate at the minimum steady speed (2-3 knots) under full power and depends on the ship hull form and propulsion system details as well as power output. This paper presents an approach intended to derive a simple criterion to assess such capability for icebreakers. The formula for icebreaking capability criterion is structured based on simple physical considerations: icebreaking capability is proportional to the total shaft power of propellers and inversely proportional to the ship beam on waterline. The formula coefficients are found using the least-square method treatment of actual data collected from known icebreakers. Icebreaking capability assessments are done for vessels not included in the reference data samples. Specific aspects related to extension of the formula from icebreakers to commercial ice-class carriers and supply vessels have been considered. It has been shown that the said criterion is useful in prompt icebreaking capability evaluations for practical decision-making tasks like choice of suitable vessels for certain icebreaker operations related to convoy assistance, towage or ice-management operations.

*Keywords:* icebreaking capability, icebreaker, power, regression model, least-square method

## ВВЕДЕНИЕ

В практике планирования и проведения морских операций возникает необходимость экспресс-оценки ледопроеходимости привлекаемых к этой процедуре ледокольных судов. Как правило, под ледопроеходимостью судна понимают максимальную толщину сплошного ровного льда, в котором судно может двигаться непрерывным ходом, не останавливаясь. Этот параметр зависит от ряда факторов, и в первую очередь — от характеристик корпуса судна, от его пропульсивного комплекса и от мощности энергетической установки. Известны методы оценки ледопроеходимости, в том числе — с использованием малого количества перечисленных параметров [1 — 3]. Оценка ледопроеходимости, приведенная в [1], основана на единой выборке данных по ледоколам и транспортным судам ледового плавания, что приводит к занижению ледопроеходимости ледоколов. При использовании критериев [2] и [3] необходимо располагать данными теоретического чертежа корпуса судна. Более сложные методы оценки ледопроеходимости [4] предполагают вычисление сопротивления льда движению судна с последующим определением потребной мощности для его движения, и также требуют достаточно точные данные теоретического чертежа.

Предпосылками выполнения настоящей работы явились: с одной стороны — необходимость выработки достаточно простого критерия подбора ледокольных судов для выполнения ледокольных операций проводки, сопровождения, буксировки судов, а также управления ледовой обстановкой, с другой — наличие накопленной информации о ледопроеходимости уже существующих и эксплуатирующихся судов, которая может быть проанализирована и использована для построения критерия. В настоящей статье представлен подход, позволивший выработать простой критерий оценки ледопроеходимости ледоколов с использованием лишь двух параметров. Построение структурной формулы критерия ледопроеходимости основано на простых физических соображениях: ледопроеимость судна увеличивается с повышением суммарной мощности на гребных валах движителей и уменьшением ширины судна по ватерлинии. Коэффициенты, входящие в эту формулу, получены с привлечением информации о фактической ледопроеходимости известных ледоколов на основе метода наименьших квадратов.

С использованием разработанного критерия выполнены оценки ледопроеходимости новых судов ледового плавания, не входивших в исходную выборку. Некоторые доступные данные по ледопроеходимости этих судов, полученные на основании натурных ледовых испытаний, указывают на возможность применения разработанного критерия для экспресс-оценки ледопроеходимости ледоколов. Вместе с тем, анализ результатов работы выявил особенности распространения предложенной формулы расчета критерия ледопроеходимости ледоколов на транспортные суда ледового плавания и суда обеспечения. Некоторые особенности этих судов — наличие цилиндрической вставки, движение задним ходом в сплошном льду и другие — требуют осторожного применения разработанного критерия.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При выполнении анализа приняты следующие основные допущения.

- Будем полагать, что судно движется в сплошном ровном льду с постоянной средней скоростью, таким образом, на судно действует постоянная средняя сила сопротивления льда движению судна и неизменный средний упор со стороны движителя, к которому подводится постоянная средняя мощность.
- Анализ выполняется в предположении, что движение судна происходит в условиях, когда толщина ровного льда близка к предельному значению, определяемому ледопроеходимостью судна. Это означает, что скорость движения судна при использовании практически полной мощности составляет 2 — 3 уз (1,0 — 1,5 м/с).
- Ввиду малости скорости движения судна в ровном льду предельной толщины будем пренебрегать сопротивлением воды. Кроме того, можно предположить, что полное ледовое сопротивление в рассматриваемом диапазоне не зависит от скорости движения судна.
- Традиционно величина ледопроеходимости определяется при некоторых нормированных значениях физико-механических свойств льда (например, полагается, что предел прочности льда при изгибе равен 500 кПа). В связи с этим, в настоящей работе зависимость ледопроеходимости от прочности льда не рассматривается.

• Для выполнения анализа использованы данные более чем 20-ти отечественных и зарубежных ледоколов, основные характеристики которых приведены в [6] и представлены в табл. 1. В таблице приводятся данные ледоколов, имеющих как «традиционные» обводы, так и «инновационные». Ледоколы с традиционными обводами показаны на рис. 1 на примере судов "Botnica" и Москва (проект 21900). Суда, имеющие бортовые наделки (риммеры) в носу ("Fennica", "Oden") и в корме ("Oden"), показанные на рис. 2, являются примерами второго типа ледоколов.



[https://www.meyerturku.fi/en/meyerturku\\_com/ships/multiurpose\\_icebreakers\\_and\\_supply\\_vessels/botnica/botnica.jsp](https://www.meyerturku.fi/en/meyerturku_com/ships/multiurpose_icebreakers_and_supply_vessels/botnica/botnica.jsp)



<http://www.korabli.eu/galleries/oboi/grazhdanskie-suda/moskva-proekta-21900/moskva-8>

Рис. 1 Ледоколы с традиционными обводами корпуса: MSV "Botnica" (слева) и ледокол «Москва», проект 21900 (справа)



<https://www.flickr.com/photos/rolls-royceplc/18354154275>



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Swedish\\_icebreaker\\_Oden.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Swedish_icebreaker_Oden.jpg)

Рис. 2 Ледоколы с инновационными обводами корпуса: "Nordica" (слева) и "Oden" (справа)

Таблица 1

## Основные параметры ледоколов

Судно	Годы постройки	Длина по КВЛ, м	Ширина по КВЛ, м	Мощность на валах, МВт	Ледопроеходимость, м	Мощность/ширина, МВт/м
Проект 92 «Ленин»	1959	124,0	26,8	28,8	1,65	1,0746
«Москва»	1960 — 1969	112,4	23,5	16,2	1,45	0,6894
«Ермак»	1974 — 1976	130,0	25,6	26,5	1,80	1,0352
Проект 1052 «Арктика»	1974 — 2007	136,0	28,0	49,0	2,25	1,7500
«Капитан Драницын»	1977 — 1981	121,0	25,6	16,2	1,30	0,6328
Проект 10580 «Гаймыр»	1989 — 1990	140,6	28,0	32,5	1,95	1,1607
Проект 21900 «Москва»	2008	97,2	26,5	16,0	1,20	0,6038
«Капитан Белоусов»	1954 — 1956	77,5	18,7	7,7	1,00	0,4118
Проект 97	1962, 1971	62,0	17,5	3,5	0,70	0,1971
«Капитан Измайлов»	1976	52,2	15,6	2,5	0,60	0,1603
«Диксон»	1982 — 1983	78,5	20,0	7,0	0,95	0,3500
"Louis S. St. Laurent"	1969	101,9	23,8	10,9	1,20	0,4580
"Atle"	1974 — 1977	96,0	22,5	16,2	1,40	0,7218
"Polar Star"	1976, 1977	107,3	23,8	13,4	1,20	0,5630
"Polar Star"*	1976, 1977	107,3	23,8	44,1	1,80	1,8529
"Almirante Irizar"	1978	113,4	24,8	11,9	1,00	0,4798
"Pierre Radisson"	1978, 1982	88,0	19,2	10,1	1,10	0,5281
"Shirase"	1982	124,0	27,8	22,1	1,50	0,7942
"Otso"	1986, 1987	90,0	23,4	15,0	1,40	0,6410
"Henry Larsen"	1987	94,0	19,5	12,0	1,20	0,6154
"Botnica"	1998	77,9	23,1	10,0	1,20	0,4329
"Healy"	1999	120,9	24,4	22,4	1,40	0,9180
"Oden"***	1988	93,2	25,0	17,6	1,80	0,7040
"Fennica"***	1993, 1994	96,7	25,2	15,0	1,80	0,5952

Примечания к таблице:  
 \* "Polar Star" в особом режиме работы — с использованием газотурбинной установки.  
 \*\* "Fennica" и "Oden" имеют «нетрадиционные» обводы с риммерами.

## ОЦЕНКА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ СУДОВ И ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ

С использованием данных табл. 1 выполнен корреляционный анализ для установления корреляционной связи между ледопроеходимостью судов и такими параметрами как их ширина по ватерлинии, мощность на валах и удельная мощность на гребных валах — суммарная мощность на валах, отнесенная к ширине судна по ватерлинии. Процедура установления корреляционной связи традиционна и соответствует [10].

Пусть имеется две случайные величины  $X$  и  $Y$ . Коэффициент корреляции  $r_{XY}$  между этими случайными величинами характеризует степень близости зависимости между случайными величинами к линейной. Если случайные величины  $X$  и  $Y$  связаны линейной функциональной зависимостью, то  $r_{XY} = \pm 1$ . Знак коэффициента корреляции зависит от того, является эта линейная зависимость возрастающей или убывающей. В общем случае, когда случайные величины  $X$  и  $Y$  связаны произвольной вероятностной зависимостью, величина коэффициента корреляции лежит в диапазоне от  $-1$  до  $+1$ .

На графике (см. рис. 3) приведена зависимость ледопроеходимости от суммарной удельной мощности. Из графика видно:

- зависимость близка к линейной;
- точки, соответствующие ледоколу "Oden" и "Fennica" несколько отклоняются от общей тенденции и лежат несколько выше воображаемой прямой линии (нетрадиционные обводы, отличающие эти суда от классических ледоколов не позволяют использовать данные по этим судам в анализе однородных данных);
- точка для "Polar Star" лежит существенно ниже линии генеральной тенденции предположительно из-за особенностей сочетания мощности энергетической установки в условиях использования газотурбинной установки и движительного комплекса.

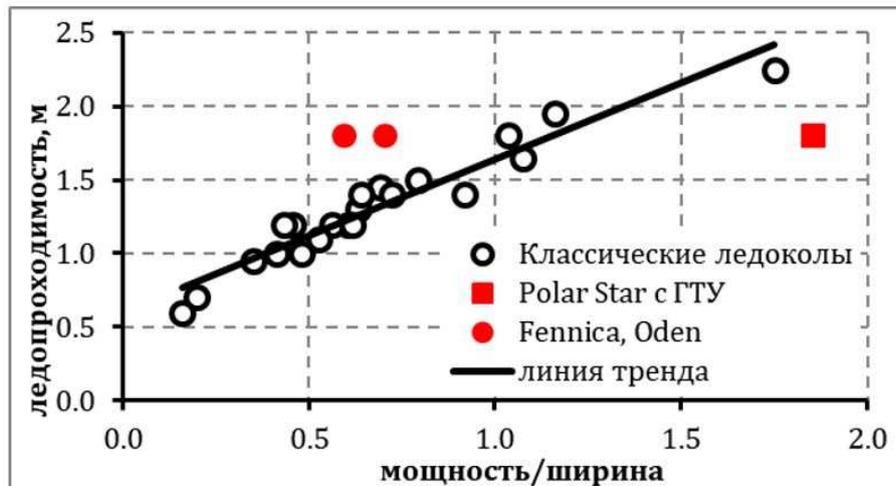


Рис. 3 Зависимость ледопроеходимости ледоколов от суммарной удельной мощности на гребных валах

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство: мы имеем три величины: ширину судна, мощность на валах и ледопроеходимость. При этом ширина судна и мощность на валах не являются независимыми случайными величинами, они имеют некоторую корреляционную связь. Это обстоятельство при корреляционном анализе не учитывалось.

Вычисление коэффициентов корреляции дает следующую корреляционную матрицу, компоненты которой представлены в таблицах (см. табл. 2 и 3).

Выполненный формальный корреляционный анализ показывает, что наиболее близка к линейной связь ледопроеходимости и мощности судна (см. табл. 2), вторая по близости — связь между ледопроеходимостью и удельной мощностью (мощность, приходящаяся на единицу ширины). При корреляционном анализе усеченной выборки (см. табл. 3 — без "Fennica", "Oden" и "Polar Star" в особом режиме) соответствующие коэффициенты корреляции выше, при этом превалирует корреляция между ледопроеходимостью и удельной мощностью.

Таблица 2

Матрица коэффициентов корреляции по полной выборке

	Мощность на валах, МВт	Ширина по КВЛ, м	Мощность/Ширина, МВт/м	Ледопроеходимость, м
Мощность на валах, МВт	1,0			0,867
Ширина по КВЛ, м		1,0		0,785
Мощность/Ширина, МВт/м			1,0	0,838
Ледопроеходимость, м	0,867	0,785	0,838	1,0

Таблица 3

Матрица коэффициентов корреляции без учета "Fennica", "Oden" и "Polar Star"

	Мощность на валах, МВт	Ширина по КВЛ, м	Мощность/Ширина, МВт/м	Ледопроеходимость, м
Мощность на валах, МВт	1,0			0,955
Ширина по КВЛ, м		1,0		0,809
Мощность/Ширина, МВт/м			1,0	0,961
Ледопроеходимость, м	0,955	0,809	0,961	1,0

Корреляционный анализ показал, что суда с «инновационной» формой корпуса ("Fennica", "Oden") и нетрадиционной конфигурацией двигателя ("Polar Star") по своим ледокольным качествам несколько выпадают из ряда классических ледоколов. Поэтому в дальнейшем при построении критерия ледопроеходимости данные по указанным судам не будут использованы.

## СТРУКТУРА ФОРМУЛЫ КРИТЕРИЯ

Основным типом движителей ледоколов является гребной винт. В теории судовых движителей [7] используются следующие понятия:

$$\text{коэффициент упора} — K_T = T/(\rho n^2 D^4); \quad (1)$$

$$\text{коэффициент момента} — K_Q = Q/(\rho n^2 D^5), \quad (2)$$

где  $T$  — упор гребного винта;  
 $Q$  — момент гребного винта;  
 $n$  — количество оборотов гребного винта;  
 $D$  — диаметр гребного винта;  
 $\rho$  — плотность воды.

Выражение для полезной тяги гребного винта  $T_E$  и величины потребляемой при этом мощности  $P_S$  можно записать в виде [8]:

$$T_E = \bar{K}_T \rho n^2 D^4 (1 - t); \quad (3)$$

$$P_S = (2\pi \bar{K}_Q \rho n^3 D^5) / \eta_S, \quad (4)$$

где  $\bar{K}_T$  — коэффициент упора гребного винта за корпусом судна;  
 $\bar{K}_Q$  — коэффициент момента гребного винта за корпусом судна;  
 $t$  — коэффициент засасывания (в данном случае на режимах, близких к швартовным);  
 $\eta_S$  — механический коэффициент полезного действия.

Приняв плотность воды  $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ , можно получить следующее соотношение:

$$T_E / P_S^{2/3} = 2,96 (\bar{K}_T / \bar{K}_Q^{2/3}) D^{2/3} (1 - t) \eta_S^{2/3} \quad (5)$$

или

$$T_E = 2,96 (\bar{K}_T / \bar{K}_Q^{2/3}) D^{2/3} P_S^{2/3} (1 - t) \eta_S^{2/3}. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет получить для конкретного судна на околошвартовном режиме следующую пропорцию:

$$T_E \sim P_S^{2/3}. \quad (7)$$

Анализ имеющихся методов расчета ледового сопротивления показывает [4, 9], что сила ледового сопротивления  $R_{ICE}$  принимается пропорциональной ширине судна  $B$  и толщине льда в некоторой степени, то есть

$$R_{ICE} \sim B \cdot h^x. \quad (8)$$

Применительно к ледопроеходимости — предельной толщине ровного льда, преодолеваемого судном — выражение (8) может быть записано как:

$$R_{ICE} \sim B \cdot h_{lim}^x. \quad (9)$$

Средняя величина тяги гребного винта при непрерывном движении судна в сплошном ровном льду равна среднему значению силы сопротивления:

$$T_E = R_{ice}. \quad (10)$$

С учетом выражений (7), (9) и (10) получим пропорцию

$$P_S^{2/3} \sim B \cdot h_{lim}^x. \quad (11)$$

Если положить  $x = 1$ , то выражение (10) может быть представлено как

$$h_{lim} \sim P_S^{2/3} / B. \quad (12)$$

Для общего случая, когда показатель степени при  $x$  отличен от 1, получаем:

$$h_{lim} \sim P_S^p / B^q. \quad (13)$$

В дальнейшем для наглядности будем называть выражение (12) «физическим», а (13) — «формальным».

## ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МОЩНОСТЬЮ НА ГРЕБНЫХ ВИНТАХ, ШИРИНОЙ ПО КВЛ И ЛЕДОПРОХОДИМОСТЬЮ

Использованный выше корреляционный анализ позволил оценить близость связи между случайными величинами к линейной зависимости. Для установления параметров связи может быть использован метод регрессионного анализа, основы которого описаны, например, в [5]. Краткое изложение использованного метода приведено ниже.

Представим регрессионную зависимость между двумя случайными векторами  $X$  и  $Y$  в следующем виде:

$$y_j = \sum_{i=1}^m \theta_i f_i(x_j) + \varepsilon_j = \theta^T f_j(x_j) + \varepsilon_j \quad (14)$$

где  $y_j$  — значение ледопроходимости для  $j$ -ого судна;

$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_m)^T$  — вектор неизвестных коэффициентов регрессионной зависимости;

$f(x_j) = (f_1(x_j), \dots, f_m(x_j))^T$  — вектор базисных функций;

$x_j$  —  $j$ -ая точка факторного пространства (т.е. значение параметров для  $j$ -ого судна);

$\varepsilon_j$  — случайная ошибка для  $j$  ого судна (для простоты считается, что ошибки не коррелированы и имеют одинаковую дисперсию  $\sigma$ ).

Модель является линейной относительно неизвестных коэффициентов  $\theta_i$ . Тогда оценка этих коэффициентов может быть получена как [5]:

$$\hat{\theta} = (F^T \cdot F)^{-1} \cdot F^T \cdot Y \quad (15)$$

Определив вектор оценок  $\hat{\theta}$ , можно получить по регрессионной модели и вектор прогноза значений  $\hat{Y}$  для точек плана эксперимента. Разница между векторами  $Y$  и  $\hat{Y}$  является вектором остатков  $e$ . Вектора  $\hat{Y}$  и  $e$  используются для оценки качества регрессионной модели.

Рассмотрим подробнее интересующую нас зависимость величины ледопроходимости от ширины судна и мощности (формулы (12) и (13)). Предложенные структурные формулы выглядят следующим образом:

$$h_{lim} = a \cdot P_S^{2/3} / B; \quad (16)$$

$$h_{lim} = b \cdot P_S^p / B^q, \quad (17)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $p$  и  $q$  некоторые вещественные числа — неизвестные коэффициенты и показатели степени регрессии.

Выражение (16) является линейным относительно параметра  $a$ . Для оценки величины этого параметра можно построить зависимость предельной толщины льда от параметра  $P_S^{2/3}/B$ , используя усеченную выборку ледоколов (см. рис. 4).

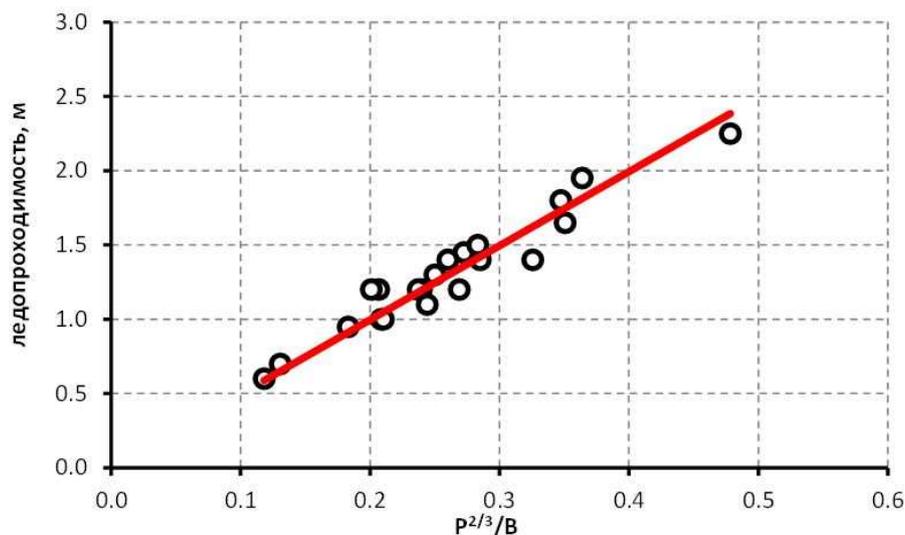


Рис. 4 Зависимость ледопроходимости от  $P_S^{2/3}/B$

Аппроксимация прямой линией дает следующее выражение для «физичной» модели (16):

$$h_{lim} = 4,984 \cdot P_S^{2/3} / B. \quad (18)$$

При этом 8 точек из 21 лежат ниже полученной прямой, 13 — выше (см. рис. 4). Следовательно, на точки, лежащие ниже прямой (имеющие меньшую фактическую ледопроеходимую по сравнению с прогнозом), приходится большие отклонения.

Рассмотрим теперь критерий в «формальном» виде (формула (17)). Для использования математического аппарата метода наименьших квадратов (МНК), описанного выше, «формальная» запись непригодна ввиду ее нелинейности относительно неизвестных параметров регрессии  $p$  и  $q$ . Для получения линейной зависимости относительно неизвестных параметров выражение (17) можно представить в логарифмическом виде:

$$\ln h_{lim} = \ln b + p \cdot \ln P_S - q \cdot \ln B, \quad (19)$$

где  $\ln b$ ,  $p$  и  $q$  — неизвестные величины.

После такого преобразования можно воспользоваться формулой (15) для получения оценок неизвестных коэффициентов регрессии.

Здесь необходимо отметить следующее: подобный переход является нелинейным преобразованием, в результате которого значимость отклика функции при поиске минимума отстояния будет зависеть от значения логарифма (от величины подлогарифмического выражения), что не является корректным при реализации МНК. В данном случае это не приводит к заметным ошибкам в виду узости диапазона изменения ледопроеходимости.

Оценка с помощью метода наименьших квадратов (МНК-оценка) коэффициентов регрессии дает следующий результат в конечном виде:

$$h_{lim} = 0,87720 \cdot P_S^{0,496} / B^{0,299}. \quad (20)$$

Анализ формулы (20) показывает:

влияние ширины судна на ледопроеходимую в соответствии с «формальным» критерием существенно меньше, чем в соответствии с «физичным»;

с учетом выражения (10) «формальный» критерий указывает на пропорциональность ледового сопротивления судна толщине льда в степени примерно равной 1,35.

Таким образом, критерий ледопроеходимости, определенный по усеченной выборке (исключены "Fennica" и "Oden") имеет для «физичной» модели вид (18), для «формальной» модели — вид (20), где  $P_S$  — мощность на гребных валах двигателей, МВт,  $B$  — ширина корпуса судна по ватерлинии, м.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРЕДЛОЖЕННЫХ КРИТЕРИЕВ

Разница между фактическим значением ледопроеходимости и значением критерия называется остатком. Для оценки качества построенных критериев выполнены расчеты остатков и приведены в табличной (см. табл. 4) и графической (см. рис. 5) форме.

В таблице цветом и подчеркиванием выделены:

отклонения ледопроеходимости в нижнюю сторону от величины критерия — синим цветом;

отклонения ледопроеходимости в верхнюю сторону от величины критерия — красным цветом.

Таблица 4

Значения остатков для усеченной выборки ледоколов

Ледокол	Отклонение «физической» модели от фактических значений, м	Отклонение формальной модели от фактических значений, м	Совпадение отклонений по знаку
Проект 92 «Ленин»	0,10	0,08	+
«Москва»	0,09	0,09	+
«Ермак»	0,07	0,11	+
«Капитан Драницын»	0,05	0,02	
Проект 10580 «Таймыр»	0,14	0,13	+
Проект 21900 «Москва»	0,01	0,10	
«Капитан Белоусов»	0,04	0,00	+
Проект 97	0,05	0,01	+
«Капитан Измайлов»	0,01	0,01	
«Диксон»	0,04	0,01	+
"Louis S. St. Laurent"	0,17	0,09	+
"Atle"	0,02	0,02	
"Polar Star"*	0,02	0,03	
"Almirante Irizar"	0,05	0,15	+
"Pierre Radisson"	0,12	0,04	+
"Shirase"	0,09	0,00	
"Otso"	0,10	0,09	+
"Henry Larsen"	0,14	0,04	+
"Botnica"	0,20	0,13	+
"Healy"	0,22	0,18	+
Проект 1052 «Арктика»	0,13	0,02	

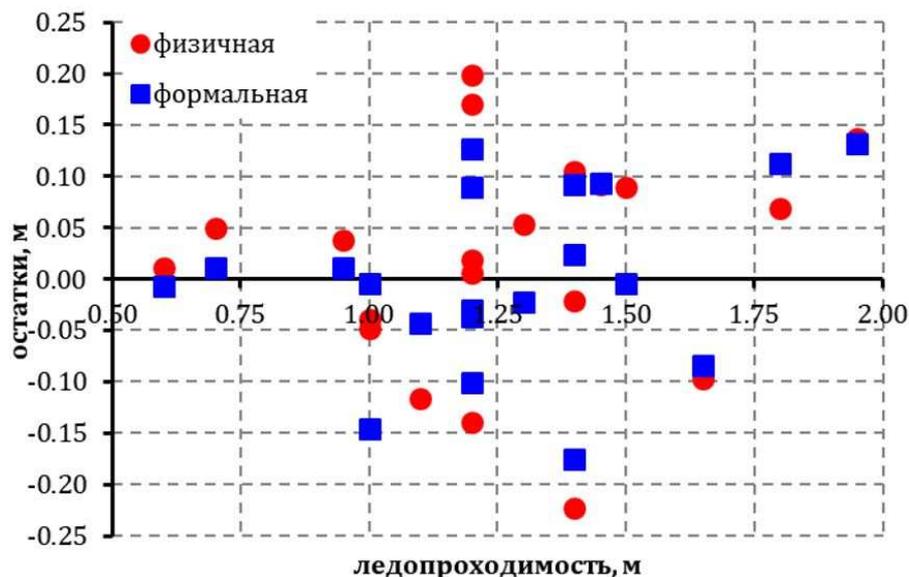


Рис. 5 Зависимость остатков от величины ледопроеходимости для «физического» и «формального» критериев

Ледопроеходимость ниже «средней» (ниже значения критерия) по «физической» форме имеют 8 ледоколов, по «формальной» форме — 11 судов.

Выше «средней» ледопроеходимость имеют: для «физической» формы 13 судов, для «формальной» — 10 судов.

Наибольший недобор ледопроеходимости по обеим формам критерия оказывается у "Nealy". Наибольший перебор по «физической» форме критерия у "Botnica". «Формальная» форма критерия эти отклонения существенно сглаживает.

В пределах отклонения  $\pm 0,05$  м лежат:

- 9 точек «физической» формы критерия;
- 11 точек «формальной» формы.

Анализ приведенных выше результатов (см. рис. 5 и табл. 4) показывает отсутствие какого-либо тренда в распределении остатков, что свидетельствует о случайности этой зависимости, тем самым подтверждая отсутствие систематической ошибки и, следовательно, правильность выбора структуры зависимости ледопроеходимости от ширины и мощности.

При этом коэффициент корреляции между фактическим значением ледопроеходимости и ее значением, полученным по «физической» форме, составляет 0,964, а аналогичная величина для «формальной» формы — 0,976, что несколько ближе к 1 и свидетельствует о лучшем качестве аппроксимации.

На рис. 6 приводится сопоставление оценок ледопроеходимости по разработанному «формальному» критерию и полученной в соответствии с [1] и [3]. Точки критерия по [1] лежат значительно ниже: возможно это обусловлено тем обстоятельством, что авторы рассматривали и транспортные суда. Точки по [3] за исключением одной лежат выше, что может свидетельствовать о наличии систематической погрешности в этой модели.

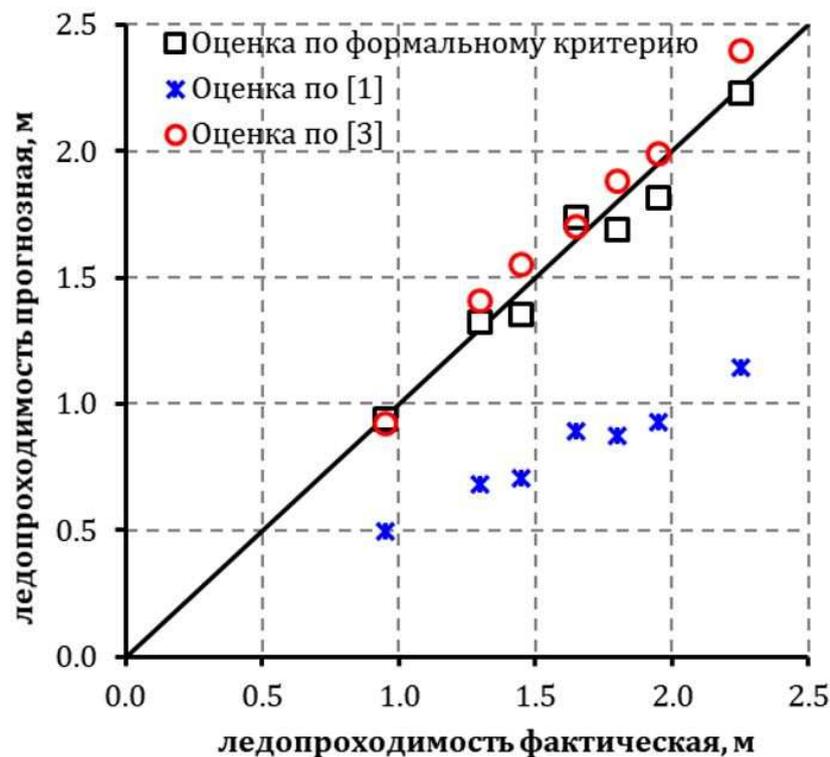


Рис. 6 Соотношение фактической ледопроеходимости и прогнозируемой с помощью различных моделей

## ОЦЕНКА ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ НОВЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ КРИТЕРИЕВ

В табл. 5 приведены рассчитанные значения критерия ледопроходимости для судов, которые не входили в исходную выборку для построения критерия. Часть из этих судов еще в постройке.

Таблица 5

Оценка ледопроходимости новых судов с помощью предложенных критериев

Судно	Мощность на валах, МВт	Ширина по ВЛ, м	Критерий ледопроходимости, м	
			«физичный»	«формальный»
«Кристоф Де Маржери»	45,0	50,00	1,26	1,80
"Aker ARC 123"	40,0	31,40	1,86	1,95
«Штурман Скуратов»	22,0	34,00	1,15	1,41
«Кирилл Лавров»	13,6	34,00	0,84	1,11
«Капитан Готский»	20,0	34,00	1,08	1,35
«Алеут»	14,0	19,50	1,48	1,33
«Александр Санников»	21,5	25,00	1,54	1,53
"Polaris"	19,0	24,00	1,48	1,46
«Кигориак»	12,3	17,25	1,54	1,30
«Варандей»	16,8	21,70	1,51	1,41
"Mackinaw"	6,8	17,70	1,01	0,96
"Xue Long 2"	15,0	23,30	1,30	1,31
"Araon"	10,0	19,00	1,22	1,14
"Tor Viking II"	13,4	18,00	1,57	1,34

К настоящему времени надежные опубликованные данные о фактической ледопроходимости большинства из перечисленных в табл. 5 судов отсутствуют. На основе опубликованных данных натурных ледовых испытаний ледокола "Araon" [11] и ледокола "Tor Viking II" [12] получено, что ледопроходимость этих судов составляет 1,20 м и 1,10 м соответственно. Эти значения хорошо согласуются с оценками по предложенному формальному критерию, которые дают значения 1,34 м для ледокола "Araon" и 1,14 м для ледокола "Tor Viking II".

### ВЫВОДЫ

Предложенный простой критерий ледопроходимости позволяет вполне достоверно оценить ледопроходимость ледоколов. При этом необходимо обратить внимание на перечисленные ниже важные обстоятельства.

- Основой для получения параметров критерия послужили данные по классическим ледоколам, которые имеют классические обводы, оснащены кормовыми гребными винтами и движутся во льду передним ходом.
- Исходя из предыдущего условия, критерий надо использовать аккуратно для оценки ледопроходимости судов, отличных по обводам от классических ледоколов. Так, для транспортных судов, имеющих протяженную цилиндрическую вставку, критерий позволяет получить верхнюю оценку ледопроходимости, то есть судно будет иметь ледопроходимость не выше рассчитанной, а для судов,двигающихся во льду гребными винтами вперед, скорее всего, ледопроходимость будет недооценена.
- На величину «формального» критерия существенно меньше оказывает влияние ширина судна по ватерлинии — с ростом ширины ледопроходимость падает не так быстро, как в «физичной» форме критерия.
- Критерий целесообразно использовать для экспресс-оценки ледопроходимости в практических задачах судовождения – подбора судов для выполнения некоторых ледокольных операций: проводки, сопровождения, буксировки других судов, управления ледовой обстановкой и других.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каштелян В.И., Ионов Б.П., Ильчук А.Н. Оценка ледопроеходимости ледоколов и транспортных судов ледового плавания на начальной стадии проектирования. Тр. ААНИИ, 1981, т. 376, с. 22 — 25.
2. Цой Л.Г. Морские ледоколы. Особенности проектирования. Учеб. пособие. СПбГМТУ, СПб, 2003, 110 с.
3. Климашевский С.Н. Расчет ледопроеходимости ледоколов и судов ледового плавания, анализ параметров формы корпуса этих судов. Судостроение, № 3, 2012, (802) май — июнь.
4. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. / 2-е издание, исправленное. — СПб: Судостроение, 2013. — 504 с., ил.
5. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента: Учеб. пособие. — М.: Наука. Гл. Ред. Физ. мат. Лит., 1987. — 320 с.
6. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. — СПб: Судостроение, 2014. — 512 с., ил.
7. Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В. Судовые движители: учебник /. — Ленинград: Судостроение, 1971. — 288 с., ил.
8. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 760 с., ил.
9. Каштелян В.И. и др. Сопrotивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с., ил.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник — 10-е издание, стереотипное. — Москва: Академия, 2005. — 576 с.
11. Riska K., Leiviskä T., Nyman T., Fransson L., Lehtonen J., Eronen H., Backman A. Ice performance of the Swedish multi-purpose icebreaker Tor Viking II. Proc. of the 16th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions POAC'01, Ottawa, Ontario, Canada, 2001.
12. Kim H.S., Lee C.-J., Choi K., The study on the ice sea trial in Chukchi sea using Korean icebreaker "Araon". Proc. of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE'2011, Rotterdam, Netherlands, OMAE2011-49482, 2011.

## REFERENCES

1. Kashtelyan V.I., Ionov B.P., Ilchuk A.N. *Otsenka ledoprokhodimosti ledokolov i transportnykh sudov ledovogo plavaniya na nachalnoy stadii proektirovaniya* [Assessment of ice performance of ice breakers and ice navigation transport vessels at the initial designing stage] Tr. AANII, vol. 376, pp. 22 — 25.
2. Tsoy L.G. *Morskie ledokoly. Osobennosti proektirovaniya. Ucheb. posobie* [Sea ice breakers. Specifics of Designing. A study guide.] SPbGMTU, SPb, 2003, 110 p.
3. Klimashevskiy S.N. *Raschet ledoprokhodimosti ledokolov i sudov ledovogo plavaniya, analiz parametrov formy korpusa etikh sudov* [Calculation of ice performance of ice breakers and ice navigation ships, analysis of their hull shape parameters] Sudostroenie, No. 3, 2012, (802), May — June.
4. Ionov B.P., Gramuzov E.M. *Ledovaya khodkost sudov* [Ice performance of ships] / 2 nd Edition, amended. — SPb: Sudostroenie, 2013. — 504 p.
5. Ermakov S.M., Zhiglyavskiy A.A. *Matematicheskaya teoriya optimalnogo eksperimenta Ucheb. Posobie* [Mathematical theory of optimal experiment. A study guide] — M.: Nauka. Gl. Red. Fiz. mat. Lit., 1987. — 320 p.
6. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. *Proektirovanie ledokolov* [Designing ice breakers] — SPb: Sudostroenie, 2014. — 512 p.
7. Rusetskiy A.A., Zhuchenko M.M., Dubrovin O.V. *Sudovye dvizhiteli uchebnyk* [Ship propulsion: a study guide]/. — Leningrad: Sudostroenie, 1971. — 288 p.
8. Basin A.M., Miniovich I.Ya. *Teoriya i raschet grebnykh vintov* [Theory and calculation of ship propellers]. — L.: Sudpromgiz, 1963. — 760 p.
9. Kashtelyan V.I. et al. *Soprotivlenie lda dvizheniyu sudna* [Ice resistance to ship movement] — L.: Sudostroenie, 1968. — 238 p.
10. Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey uchebnyk* [Probabilities theory: a study guide]— 10th Edition. — Moskva: Akademiya, 2005. — 576 p.
11. Riska K., Leiviskä T., Nyman T., Fransson L., Lehtonen J., Eronen H., Backman A. Ice performance of the Swedish multi-purpose icebreaker Tor Viking II. Proc. of the 16th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions POAC'01, Ottawa, Ontario, Canada, 2001.
12. Kim H.S., Lee C.-J., Choi K. The study on the ice sea trial in Chukchi sea using Korean icebreaker "Araon". Proc. of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE'2011, Rotterdam, Netherlands, OMAE2011-49482, 2011.

УДК 629.12

## МОДЕРНИЗАЦИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ТРУБЫ С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

**В.Б. Жинкин**, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет, Санкт-Петербург, e-mail: vajin@mail.ru

В статье рассмотрена задача экспериментального исследования гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов (ЧПГВ). Особенностью экспериментальных исследований ЧПГВ является необходимость использования специальных кавитационных бассейнов или кавитационной трубы со свободной поверхностью в рабочем участке. В статье предложена модернизация существующей кавитационной трубы для того, чтобы обеспечить испытания ЧПГВ. В кавитационной трубе предлагается установить специально спроектированный стенд и с помощью потоко-направляющей пластины обеспечить в рабочем участке свободную поверхность. Подобная модернизация позволит создать условия для проведения экспериментальных исследований частично-погруженных гребных винтов. Проверка этой идеи в кавитационной трубе СПбГМТУ показала возможность такой модернизации.

*Ключевые слова:* частично погруженные гребные винты, стенд, экспериментальные исследования

## MODERNIZATION OF CAVITATION TUNNEL TO INCREASE EXPERIMENTAL POSSIBILITIES

**V.B. Zhinkin**, PhD, St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg, e-mail: vajin@mail.ru

The article describes experimental studies of hydrodynamic qualities of surface-piercing propellers (SPP). The experimental studies require the application of specific cavitation basins or cavitation tunnels with free surface in the working area. The article describes the modernization of the existing cavitation tunnel to meet the requirements to free surface and to perform SPP tests. The modernization includes the installation of the stand specifically designed with a plate guiding the flow. Eventually, it helps create free surface in the working area. The modernization offered will allow to perform SPP testing. The application of the stand in cavitation tunnel installed in St. Petersburg State Marine Technical University has confirmed the possibility of such modernization.

*Keywords:* surface-piercing propellers, stand, experimental investigation

Движители малых быстроходных судов с динамическим поддержанием — частично-погруженные гребные винты (ЧПГВ) — обладают хорошо известными, причем весьма существенными преимуществами. Основные из них: относительно высокий КПД, снижение значительного для быстроходных судов сопротивления выступающих частей, полное устранение проблем с кавитацией и другие полезные свойства.

Несмотря на перечисленные преимущества, ЧПГВ применяются далеко не везде, где это могло бы принести ощутимую пользу, что обусловлено целым рядом причин. Однако основная из них: отсутствие доступных и исчерпывающих данных по гидродинамическим характеристикам ЧПГВ на различных режимах движения, т.е. хорошо отработанных серий таких двигателей

Подобная ситуация объясняется еще и тем, что опытное определение указанных характеристик требует использования весьма сложных и далеко не всегда доступных экспериментальных установок, таких, например, как кавитационный бассейн [1].

Известна берлинская кавитационная труба со свободной поверхностью в рабочем участке [2]. В этой трубе была испытана довольно ограниченная серия моделей ЧПГВ, получившая название ROLLA. Ограниченность в том, что все пять четырехлопастных винтов серии имеют одинаковую форму профиля сечения лопасти, одинаковое дисковое отношение, испытывались с одинаковыми углами наклона гребного вала и погружения оси винта.

Тем не менее, ЧПГВ этой серии использовались на нескольких быстроходных, в том числе и отечественных, катерах (см. таблицу).

Таблица

Быстроходные катера

Название	"Cormoran"	"Intermarine"	«Мангуст»	«Соболь»	«Мираж»
Год постройки	1989	1996	2000	2000	2012
Страна	Испания	Италия	Россия	Россия	Россия
Водоизмещение, т	22	22	30,5	56	120
Мощность ДВС, кВт	2 × 1044	2 × 955	2 × 1030	2 × 1860	2 × 3970
Двигатели, количество, тип	2 ЧПГВ ROLLA				
Максимальная скорость, уз	67	48	47	48	50
Число Фруда $Fr_D$	6,59	4,73	3,71	4,04	4,38
Энерговооруженность $v = P_S/D$ , кВт/т	95,0	86,8	66,2	66,4	67,5

Для всех катеров, приведенных в таблице, характерны высокие относительные скорости  $Fr_D > 3,5$ , где  $Fr_D = V/\sqrt{g^3 D/\rho}$ , а также высокие значения энерговооруженности  $v_s = P_S/D$ . На всех необходимое изменение погружения винта фирмы ROLLA осуществляется с помощью привода Арнесона, выполняющего и функции рулевого устройства.

Все катера оборудованы двумя гребными винтами, хотя, в принципе, при установке только одного ЧПГВ, боковая сила на нем может компенсироваться только поворотом гребного вала.

Основные причины такой «популярности» серии ROLLA следующие:

1. отсутствие достойных конкурентов в виде других серий ЧПГВ, предназначенных для проектирования двигателей быстроходных судов;
2. удобство использования с учетом того, что, как правило, фирма ROLLA проектирует и изготавливает свои винты по заданию заказчика;
3. удачная компоновка всего пропульсивного комплекса, включающего, кроме винта, двигатель, привод Арнесона и другие необходимые устройства. Все это разрабатывается и поставляется с участием той же фирмы ROLLA.

Подобная «монополия», с одной стороны, удобна для заказчика, поскольку облегчает понимание некоторого расхождения в скорости проектной и реально достигаемой. С другой стороны, высококвалифицированный профессионал лишается возможности выбора оптимального решения, рассмотрев несколько вариантов поставленной задачи.

Помочь такому высококвалифицированному профессионалу можно лишь путем создания других, новых эффективных серий ЧПГВ. Теоретическое решение этой задачи в ближайшем будущем маловероятно, остается эксперимент. А для этого необходимо иметь специальные установки, такие как выше упомянутый отечественный кавитационный бассейн или немецкая кавитационная труба со свободной поверхностью в рабочем участке.

Создание таких установок «от нуля» задача весьма сложная и весьма капиталоемкая. Далеко не каждая страна может себе это позволить. Зато обычные кавитационные трубы встречаются в гидродинамических лабораториях довольно часто. Произведя относительно несложную модернизацию, такую, уже существующую, трубу мы сможем использовать и для исследования ЧПГВ.

С целью создания экспериментальной установки, в которой можно было бы проводить исследования работы моделей частично погруженных гребных винтов, предлагается разместить в рабочем участке уже существующей кавитационной трубы специальный стенд (см. рис. 1). Дополнительные требования, диктуемые особенностями ЧПГВ, заключаются в том, что необходимо обеспечить возможность изменения погружения оси модели винта и угла наклона его вала. Последнее в определенной степени будет моделировать скос потока, имеющий место при установке ЧПГВ на наклонных валах быстроходных глиссирующих катеров. Необходимо стремиться к тому, чтобы цель была достигнута с минимальными затратами как материальных ресурсов, так и времени.

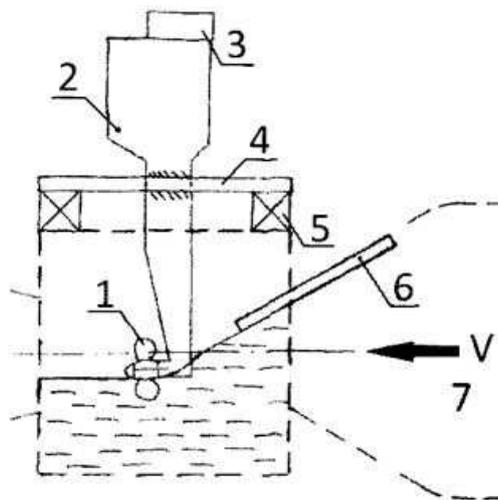


Рис.1 Схема стенда:

1 — испытываемая модель ЧПГВ; 2 — корпус электродвигателя-привода; 3 — тахометр; 4 — «плавающая» платформа; 5 — многокомпонентный динамометр; 6 — потоко-направляющая пластина, обеспечивающая свободную поверхность воды в рабочем участке кавитационной трубы; 7 — элемент модернизируемой кавитационной трубы — конфуззор.

Для эффективного функционирования установки необходимо также предусмотреть наличие комплекта стандартного и нестандартного оборудования. Подробная детализация элементов этих комплектов должна производиться в процессе проектирования конкретного стенда.

Основное назначение предлагаемого стенда — обеспечение в рабочем участке кавитационной трубы (КТ) горизонтальной, либо близкой к таковой и устойчивой при этом свободной поверхности воды.

В качестве привода модели ЧПГВ предполагается использовать специально подобранный электродвигатель, расположенный вне рабочего участка кавитационной трубы на «плавающей» платформе, которая через динамометр крепится к корпусу трубы. Для той же цели может служить и стандартный подвесной лодочный электромотор подходящей мощности. Именно такой вариант изображен на схеме. В принципе, не исключена и возможность разработки оригинального привода модели ЧПГВ, состоящего из погружного электродвигателя в гондоле.

«Плавающая» платформа предназначена для крепления подвешенного электродвигателя, либо подвешенного лодочного мотора, либо оригинального привода модели ЧПГВ. Через динамометр платформа соединяется с ограждением рабочего участка кавитационной трубы. При этом должна быть обеспечена возможность вертикального перемещения и поворота модели ЧПГВ для изменения погружения его оси, а также и угла установки.

Следует иметь в виду, что необходимые варианты погружения и угла наклона гребного вала (оси винта) могут обеспечиваться различными способами: путем перемещения всего подвешенного двигателя, либо самой платформы, либо комбинированным способом, когда вдоль вертикальной оси перемещается только двигатель, а поворачивается только платформа. Наиболее рациональный способ можно будет определить при привязке всей проектируемой конструкции: подвесной двигатель-платформа к месту установки.

Многокомпонентный динамометр должен обеспечивать надежное измерение горизонтальной силы упора (сопротивления) комплекса, боковой и вертикальной сил. Динамометр может быть монолитным, т.е. измеряющим сразу все необходимые величины, или состоящим из отдельных элементов, предназначенных для измерения отдельных усилий.

Экспериментальная проверка возможности создания в кавитационной трубе потока воды со свободной поверхностью была выполнена в лаборатории Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (ГМТУ). На входе в рабочий участок была установлена специально изготовленная потоко-направляющая пластина. Путем изменения степени заполнения трубы и создания в ней потока, как и предполагалось, удалось обеспечить свободную поверхность в рабочем участке. Затем были проведены пробные испытания модели гребного винта в условиях частичного погружения. При этом использовалась штатная модель гребного винта диаметром  $D=0,2$  м, предназначенная для проведения лабораторных работ со студентами.

В процессе пробных испытаний было установлено, что уровень воды в рабочем участке зависит не только от степени заполнения трубы, но и от задаваемой скорости потока. Более того, этот уровень изменялся и при работе (вращении) модели винта.

Использовавшаяся для пробных испытаний модель имеет форму, значительно отличающуюся от формы, оптимальной для частично погруженного гребного винта. В связи с этим ее трудно было «довести» до исследуемого режима движения в условиях неполного погружения с созданием атмосферных каверн в потоке. Тем не менее, изменяя скорость в трубе и частоту вращения модели винта, подобные режимы обеспечить удалось. В процессе испытаний замерялись: скорость потока в рабочем участке  $V$ , м/с, глубина погружения оси модели винта  $H$ , м, частота его вращения  $n$ , об/мин.

Пробные испытания проводились при скорости потока в трубе, изменявшейся от нуля до  $V \sim 3,0$  м/с и относительном погружении  $h$  модели гребного винта, в пределах  $h = H/D = 0,5 — 1,0$ , где  $H$  — погружение оси винта. Частота вращения модели при этом менялась в диапазоне  $n = 1000 — 1800$  об/мин, что соответствовало относительной поступи  $J = V/nD = 0,5 — 0,9$ . Практически все интересующие нас величины точно замерить было невозможно. Это объясняется как отсутствием специальных приспособленных для подобных испытаний датчиков, так и нестабильностью основных исследуемых величин: скорости потока и погружения модели винта.

Сказывалось и влияние на обе эти величины частоты вращения винта, а также времени, проходящего с момента начала эксперимента. Вода в трубе интенсивно наполнялась воздушными пузырями от разрушавшихся атмосферных каверн и ее уровень несколько повышался. Сами атмосферные каверны создавались моделью винта, работающего в режиме частичного погружения. Очевидно, что все эти сложные явления и взаимодействия необходимо изучать и учитывать при проектировании стенда, а затем и доводить до приемлемого уровня в процессе отработки всей системы.

Проведенный в кавитационной трубе пробный эксперимент дал основания для следующих выводов.

1. Подтверждена возможность создания в рабочем участке кавитационной трубы потока со свободной поверхностью посредством незначительной модернизации существующей кавитационной трубы ГМТУ и проведения пробного эксперимента.

2. Необходима достаточно сложная доводка проектируемого стенда, с тем чтобы в максимальной степени приспособить его для проведения экспериментальных исследований моделей ЧПГВ.

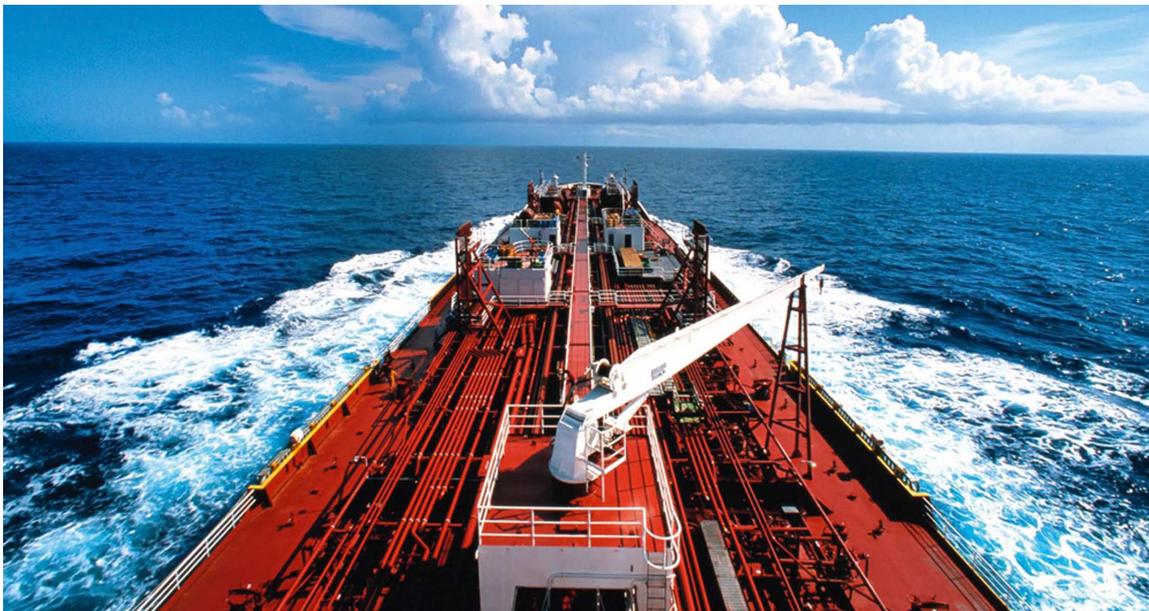
В завершение стоит отметить, что проведение указанной модернизации кавитационной трубы не отменяет возможности исследования в ней моделей полностью погруженных гребных винтов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустошный А.В., Лебедев Э.П., Бойцов В.П., Строганов А.А. Разработка серии 5-ти лопастных частично погруженных гребных винтов (ЧПГВ) для быстроходных катеров. Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей. — СПб: ООО «НИЦ МОРИНТЕХ», 2013 — 224 с.
2. Rose J.C., Kruppa C.F.L. Methodical Series Model Tests Results. Trans. of FAST-91. Vol.2, pp. 1129 — 1147.

## REFERENCES

1. Pustoshnyy A.V., Lebedev E.P., Boytsov V.P., Stroganov A.A. *Razrabotka serii 5-ti lopastnykh chastichno pogruzhennykh grebnykh vintov (ChPGV) dlya bystrokhodnykh katerov. Gidrodinamika malopogrzhennykh dvizhiteley* [Developing the series of 5-blade surface-piercing propellers for high-speed boats. Hydrodynamics of low submerged engines]. Collection of papers. — St. Petersburg, JSC "Morinteh", 2013 — 224 p.
2. Rose J.C., Kruppa C.F.L. Methodical Series Model Tests Results. Trans. of FAST-91. Vol.2, pp. 1129 — 1147.



## ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.011; 629.561.5

### МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС ЛЕДОКОЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

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

**В.Н. Тряскин**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

Форма корпуса современных ледоколов существенно отличается от традиционной, параметры которой регламентируются действующими Правилами Регистра. Применение существующих зависимостей Правил для определения ледовых нагрузок на конструкции корпуса ледоколов при таких параметрах формы корпуса может привести к большим погрешностям. Для района вертикального борта это вообще пока невозможно. Определение расчетных ледовых нагрузок на средний и кормовой район ледовых усилений ледоколов основано на консервативном эмпирическом подходе, не учитывающем реальную физику взаимодействия корпуса ледокола со льдом при различных режимах эксплуатации. В настоящей статье излагаются методические основы разработки расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений ледоколов в носовом, среднем и кормовом районах, основанные на новой модели динамического разрушения льда и ориентированные на использование в требованиях Правил Регистра.

*Ключевые слова: ледокол, районы ледовых усилений, расчетные зависимости, модель динамического разрушения льда*

### METHODOLOGICAL BASIS FOR THE CALUALTION OF ICE LOADS ACTING ON AN ICEBREAKER'S HULL BASED ON A NEW MODEL OF DYNAMIC ICE FRACTURE

**V.V. Platonov**, PhD, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru.

**V.N. Tryaskin**, DSc, professor, St. Petersburg state marine technical university, St. Petersburg, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

The hull shape of modern icebreakers can significantly differ from the traditional one covered by requirements of the acting RS Rules. The application of the existing Rule formulations to determine ice loads on icebreaker hull of unusual shape can potentially lead to an error in load prediction. The application of the existing formulations to the vertical hull is not even feasible at present. Currently determination of the calculated ice loads on the middle and aft ice reinforcement areas of icebreakers is based on a conservative

approach, which does not take into account real physical aspects of the interaction between the icebreaker's hull and ice under various operating modes. This article provides a description of the methodological foundations for the development of design dependencies for determining ice loads on ice reinforcement structures of icebreakers. Design dependencies cover the bow, middle and stern regions. They are based on a new model of ice dynamic fracture, and developed with a view of their implementation into the RS Rules.

**Keywords:** *icebreaker, areas of ice reinforcement, calculated dependencies, model of dynamic ice destruction*

## ВВЕДЕНИЕ

Форма корпуса современных ледоколов существенно отличается от традиционной, параметры которой регламентируются действующими Правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (далее Правила Регистра) [1]. Основное отличие — значительно меньшая протяженность носового и кормового заострений, и, в связи с этим, значительно большие углы наклона борта и ватерлиний. Существуют примеры применения в среднем районе вертикальных бортов, что приводит к резкому возрастанию нагрузок при отраженных ударах. Применение существующих зависимостей Правил, основанных на гидродинамической модели удара твердого тела о лед (далее — ГДМ) [2], для определения ледовых нагрузок на конструкции корпуса ледоколов при таких параметрах формы корпуса может приводить к погрешностям. Для района вертикального борта это вообще пока невозможно.

Кроме того, в действующих требованиях Правил при определении расчетных ледовых нагрузок на средний и кормовой район ледовых усилений ледоколов используется консервативный подход, при котором нагрузки задаются в долях от нагрузок на носовой район. Такой подход не учитывает реальную физику взаимодействия корпуса ледокола со льдом при различных режимах эксплуатации.

В настоящее время разработана новая модель динамического разрушения льда (далее — МДРЛ) [3] при взаимодействии корпуса судна со льдом, которая учитывает результаты современных теоретических и экспериментальных исследований и адекватно описывает особенности разрушения льда при местном смятии.

На основании вышесказанного целью настоящей статьи является описание методических основ разработки расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений ледоколов в носовом, среднем и кормовом районах, основанных на новой модели динамического разрушения льда. Зависимости должны быть ориентированы для использования в требованиях Правил Регистра.

## 1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМЫ КОРПУСА ЛЕДОКОЛОВ

Для выполнения анализа формы корпуса традиционных и современных ледоколов были выбраны существующие проекты, приведенные в табл. 1. Информация о существующих проектах принималась по данным источника [4]. Под традиционными ледоколами понимаются ледоколы, форма корпуса которых отвечает рекомендациям 3.10.1.2.3 [1], а под современными ледоколами — ледоколы, форма корпуса которых отличается от рекомендуемой в 3.10.1.2.3 Правил.

Как показывает анализ формы корпуса, для традиционных ледоколов характерны протяженные носовые и кормовые заострения, достигающие 40 — 45% длины ледокола (см. рис. 1 и 2). Углы наклона ватерлинии и борта в носовом районе традиционных ледоколов не превосходят 30° и 55° (см. рис. 3), а в кормовом районе 45° и 70° соответственно (см. рис. 4). Для современных ледоколов характерна значительно меньшая протяженность носового и кормового заострений, которые не превосходят 25 % длины ледокола для носовой оконечности (см. рис. 1) и 20 % длины ледокола для кормовой оконечности (см. рис. 2). Это приводит к формам корпуса в оконечностях с большими значениями углов наклона ватерлиний и шпангоутов, которые могут достигать 70 — 80° и более (рис. 3 и 4).

Таблица 1

## Рассмотренные проекты ледоколов

№	Название	Год (годы)	Ледовый класс	Водоизмещение, т
<b>Традиционные ледоколы</b>				
1	Москва	1960 — 1970	<b>Icebreaker6</b>	13133
2	Капитан Сорокин	1970 — 1980	<b>Icebreaker7</b>	15403
3	Ермак	1970 — 1980	<b>Icebreaker8</b>	20241
4	Арктика	1970 — 1990	<b>Icebreaker9</b>	23185
<b>Современные ледоколы</b>				
5	Мелкосидящий	—	<b>Icebreaker6</b>	3069
6	Илья Муромец	2017	<b>Icebreaker6</b>	5812
7	Москва	2008 — 2015	<b>Icebreaker6</b>	14100
8	Обь	2019	<b>Icebreaker7</b>	5864
9	Александр Санников	2018	<b>Icebreaker8</b>	12554
10	Таймыр	1989 — 1990	<b>Icebreaker8</b>	19000
11	Виктор Черномырдин	2016	<b>Icebreaker8</b>	21900
12	Арктика	2016 — 2019	<b>Icebreaker9</b>	33210
13	Лидер	—	<b>Icebreaker9</b>	70670
<b>Современные ледоколы с вертикальным бортом</b>				
14	Юрий Топчев	2005 — 2006	<b>Icebreaker6</b>	9569
15	Катерина Великая	—	<b>Icebreaker7</b>	11385

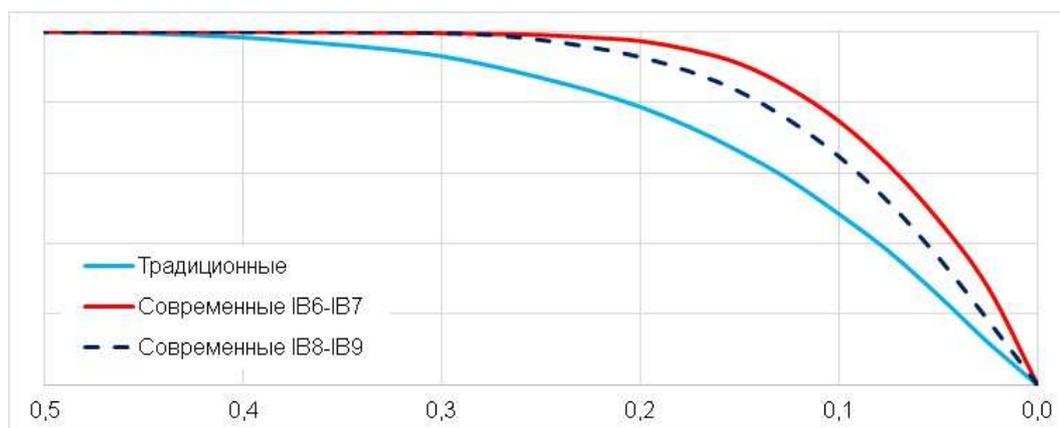


Рис. 1 Среднестатистические формы расчетной ватерлинии в носовой оконечности рассмотренных ледоколов

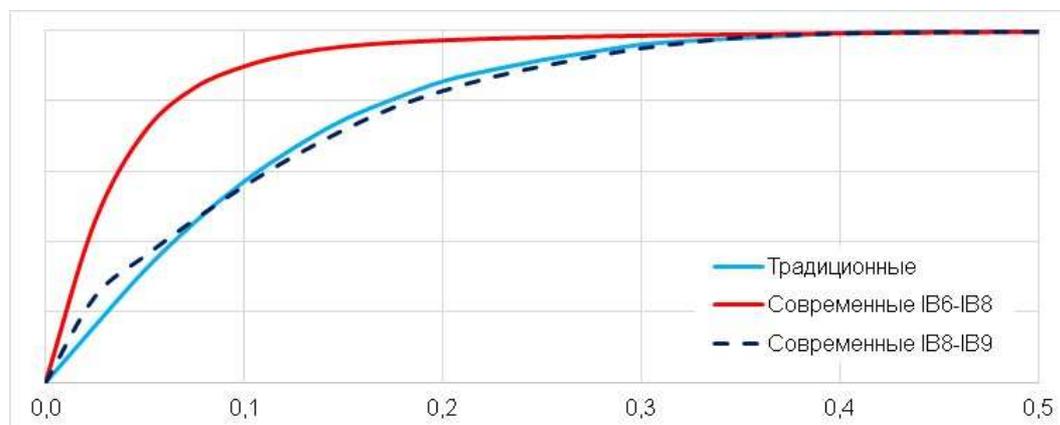


Рис. 2 Среднестатистические формы расчетной ватерлинии в кормовой оконечности рассмотренных ледоколов

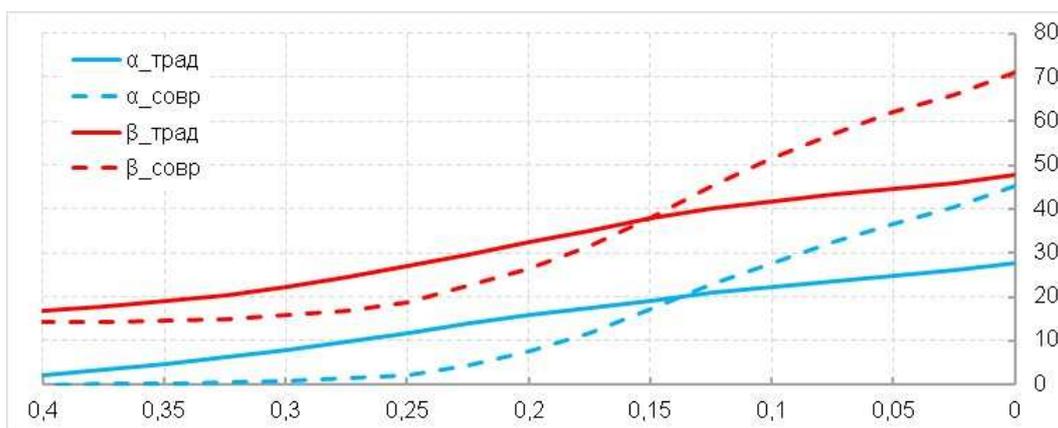


Рис. 3 Распределение среднестатистических значений углов наклона ватерлинии ( $\alpha$ ) и шпангоута ( $\beta$ ) для носовых оконечностей традиционных и современных ледоколов

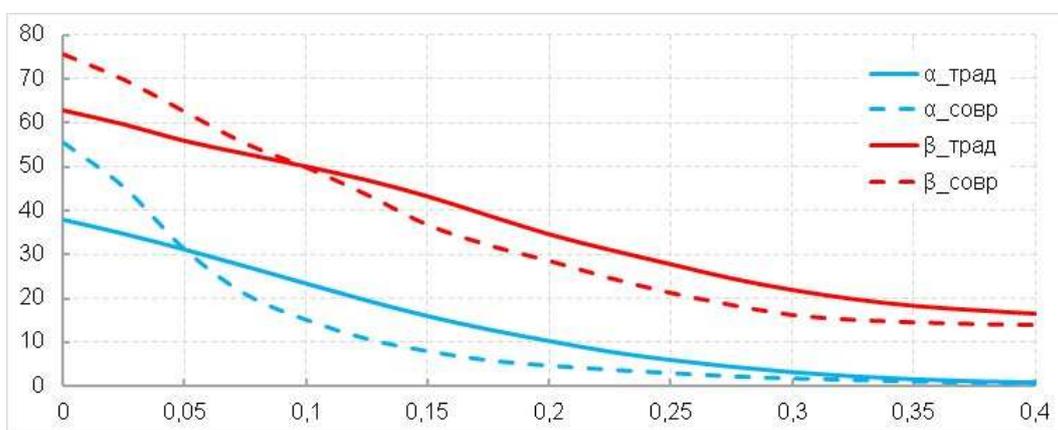


Рис. 4 Распределение среднестатистических значений углов наклона ватерлинии ( $\alpha$ ) и шпангоута ( $\beta$ ) для кормовых оконечностей традиционных и современных ледоколов

Для всех рассмотренных традиционных и современных ледоколов характерны наклонные борта в средней части. Причем в большинстве случаев угол наклона борта больше либо равен  $15^\circ$ . В тоже время стали появляться так называемые ледоколы-снабженцы классов **Icebreaker6** — **Icebreaker7** с вертикальным бортом в средней части. Такие формы корпуса встречаются у ледоколов иностранных проектов, а для российской практики раньше были не характерны.

На основании обобщения общепроектной информации по рассмотренным ледоколам можно выделить три представительные группы.

1. *Традиционные ледоколы* классов **Icebreaker6** — **Icebreaker9** с диапазоном водоизмещения  $2,5 \div 25,0$  тыс. т. и следующими диапазонами изменения параметров формы корпуса:

носовая оконечность (районы А и А1):

- угол наклона ватерлинии  $\alpha$ :  $5^\circ \div 30^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $15^\circ \div 45^\circ$ ;
- отстояние от НП  $x/L$ :  $0,025 \div 0,425$ ;

средний район (район В):

- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $10^\circ \div 20^\circ$ ;

кормовая оконечность (район С):

- угол наклона ватерлинии  $\alpha$ :  $8,25^\circ \div 36,35^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $34,75^\circ \div 70^\circ$ ;
- отстояние от КП  $x/L$ :  $0,025 \div 0,175$ .

2. *Современные ледоколы* классов **Icebreaker6** — **Icebreaker7** (и классов **Icebreaker6** — **Icebreaker8** для кормовой оконечности) с диапазоном водоизмещения  $2,5 \div 20,0$  тыс. т. и следующими диапазонами изменения параметров формы корпуса:

носовая оконечность (районы А и А1):

- угол наклона ватерлинии  $\alpha$ :  $5^\circ \div 45^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $15^\circ \div 65^\circ$ ;
- отстояние от НП  $x/L$ :  $0,025 \div 0,275$ ;

средний район (район В):

- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $10^\circ \div 20^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta' = 0^\circ$ ;

кормовая оконечность (район С):

- угол наклона ватерлинии  $\alpha$ :  $5^\circ \div 60^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $20^\circ \div 70^\circ$ ;
- отстояние от КП  $x/L$ :  $0,025 \div 0,125$ .

3. *Современные ледоколы* классов **Icebreaker8** — **Icebreaker9** с диапазоном водоизмещения  $20,0 \div 70,0$  тыс. т. и следующими диапазонами изменения параметров формы корпуса:

носовая оконечность (районы А и А1):

- угол наклона ватерлинии  $\alpha$ :  $5^\circ \div 45^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $15^\circ \div 65^\circ$ ;
- отстояние от НП  $x/L$ :  $0,025 \div 0,275$ ;

средний район (район В):

- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $10^\circ \div 20^\circ$ ;

кормовая оконечность (район С):

- угол наклона ватерлинии  $\alpha$ :  $5^\circ \div 60^\circ$ ;
- угол наклона борта к вертикали  $\beta'$ :  $20^\circ \div 70^\circ$ ;
- отстояние от КП  $x/L$ :  $0,025 \div 0,125$ .

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК, ПРИНЯТАЯ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРАВИЛАХ РЕГИСТРА

В методологии определения ледовых нагрузок действующих Правил Регистра [1] для ледоколов возможны два сценария взаимодействия корпуса со льдом: прямой и отраженный удары. При прямом ударе воздействию ледовых нагрузок подвергается только район носового заострения судна. Поэтому сценарий прямого удара определяет величину расчетных ледовых нагрузок только для носового района ледоколов.

Специфика ледоколов состоит в том, что наряду с поступательным движением вперед они регулярно используют работу набегам для прокладки канала. Именно при работе набегам корпус ледокола регулярно подвергается отраженным ударам. При отраженном ударе интенсивные ледовые нагрузки воздействуют не только на район носового заострения, но и на средний район корпуса. Соответственно, регламентация ледовой прочности в среднем районе производилась с учетом сценария отраженного удара.

При регламентации ледовой прочности кормового района ледоколов был сохранен традиционно используемый в предыдущих изданиях Правил Регистра эмпирический подход, основанный на экстраполяции накопленного опыта эксплуатации и данных о повреждаемости.

Таким образом, регламентация ледовых нагрузок, принятая в действующих Правилах РС, в носовом районе ледоколов была выполнена для сценария прямого удара на основании системы базовых опасных режимов движения (далее — БОРД), совпадающих с БОРД судов ледового плавания соответствующих категорий, с использованием ГДМ. Поэтому в среднем нагрузке на носовой район ледоколов соответствуют нагрузкам на носовой район судов ледового плавания.

Нагрузки в промежуточном и среднем районах устанавливались на основании рассмотрения сценария отраженного удара и использования БОРД для указанного сценария

Нагрузки в кормовом районе определялись на основании эмпирического подхода, путем экстраполяции накопленного опыта проектирования и эксплуатации и данных о повреждаемости ледоколов.

### 3. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ РЕГИСТРА

На основании анализа научно-методической основы требований действующих Правил Регистра в части определения расчетных ледовых нагрузок для ледоколов разработана следующая принципиальная концепция построения регрессионных зависимостей для параметров ледовых нагрузок для ледоколов, предназначенных для использования в нормативных документах Регистра.

1. Рассматриваются следующие эксплуатационные режимы, определяющие расчетные ледовые нагрузки на носовой, промежуточный, средний и кормовой районы ледовых усилений ледоколов, включая работу в режимах DAS:

- **носовой район:** сценарий прямого удара;
- **промежуточный район и средний районы:** сценарий отраженного удара;
- **кормовой район:** сценарий прямого удара при поступательном движении кормой вперед.

2. При определении параметров ледовых нагрузок выполняется переход от ГДМ к новой МДРЛ, описывающей сложный процесс одновременного силового раздробления и динамического вытеснения льда и согласующейся с современными экспериментальными данными по разрушению льда при местном смятии. Переход от ГДМ к МДРЛ приведет к изменению характера зависимости параметров ледовой нагрузки от размерений и от скорости движения.

Как было показано в [3], при сопоставлении погонных нагрузок, в наибольшей степени определяющих требования к размерам конструкций ледовых усилений [5], наблюдается хорошее согласование их значений для судов и ледоколов опыт эксплуатации которых был в наибольшей степени учтен при разработке действующих требований Правил Регистра. Этому соответствует диапазон водоизмещений 13,0 — 25,0 тыс. т. Следовательно, для традиционных ледоколов не следует ожидать больших расхождений расчетных ледовых нагрузок с требованиями действующих Правил. Для небольших ледоколов с водоизмещением до 5,0 тыс. т и для мощных крупнотоннажных ледоколов с водоизмещением до 70 тыс. т. такие расхождения могут быть существенными.

3. Расчетные режимы «скорость — толщина льда» для определения расчетных ледовых нагрузок на носовой, промежуточный, средний и кормовой районы ледовых усилений ледоколов принимаются следующие:

**носовой район:** скорость и толщина льда принимаются по базовой точке кривой БОРД в соответствии с ледовым классом ледокола. Обоснование принятых базовых точек кривой БОРД приведено в [3] и получено на основании сопоставительного анализа расчетных значений погонных нагрузок, полученных по ГДМ и МДРЛ;

**промежуточный район и средний районы:** в качестве расчетной толщины льда принимается предельно допустимая толщина льда для класса, при которой, в соответствии с действующей классификацией, ледокол не должен иметь ограничений по условиям эксплуатации. Расчетная скорость должна приблизительно соответствовать значению, регламентируемому нормативной кривой БОРД для соответствующей толщины льда;

**кормовой район:** толщина льда принимается по базовой точке кривой БОРД в зависимости от ледового класса ледокола. Расчетная скорость зависит от ледового класса и назначается таким образом, чтобы нагрузки на обшивку и набор традиционных ледоколов в кормовом районе приблизительно соответствовали требованиям действующих Правил Регистра (соответствию по погонной нагрузке на набор отдается предпочтение). Если при согласовании погонных нагрузок для традиционных ледоколов расчетное ледовое давление сильно отличалось от требований действующих Правил Регистра, то давления выравнивались соответствующей корректировкой высоты зоны контакта.

Итоговые значения расчетных режимов «скорость — толщина льда» для определения расчетных ледовых нагрузок с использованием новой МДРЛ приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Итоговые значения расчетных режимов «скорость — толщина льда»

		Icebreaker6	Icebreaker7	Icebreaker8	Icebreaker9
Прямой удар (носом вперед)	$V$ , м/с	4,2	5,1	5,7	6,6
	$H$ , м	2,7	3,7	4,7	5,8
Отраженный удар	$V$ , м/с	3,5	4,5	6,0	7,0
	$H$ , м	1,5	2,0	3,0	4,0
Прямой удар (кормой вперед)	$V$ , м/с	3,2	4,4	5,4	6,6
	$H$ , м	2,7	3,7	4,7	5,8

4. Построение регрессионных зависимостей выполнялось с использованием специальной методики, основанной на аппарате планирования численного эксперимента, описание которой приведено в [6]. Аналогичный подход был реализован при разработке расчетных зависимостей для параметров ледовой нагрузки для судов двойного действия [7] и транспортных судов с вертикальным бортом в районе носового заострения [8]. Суть методики состоит в следующем:

- применяется центральное композиционное планирование (ЦКП) как эффективный метод построения квадратичных моделей. Общее число экспериментов:

$$NQ = 2^k + 2k + 1,$$

где  $k$  — число варьируемых параметров;

- варьируемые параметры — параметры формы корпуса ледокола в точке взаимодействия со льдом:  $x/L$ ,  $\alpha$ ,  $\beta'$ . Диапазон варьирования зависит от группы, к которой принадлежит ледокол (см. п. 1);

- в соответствии с планом численного эксперимента определяются параметры ледовой нагрузки  $p$ ,  $b$ ,  $l$  с использованием программного обеспечения расчета ледовых нагрузок на основе динамической модели разрушения льда;

- Выполняется построение регрессионных моделей вида:  $\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2 + \sum_{j>i=1}^k b_{ij} x_i x_j$  для относительных значений параметров ледовой нагрузки:

$$\bar{p} = p_j/p_0, \bar{b} = b_j/b_0, \bar{l} = l_j/l_0,$$

где  $p_0$ ,  $b_0$ ,  $l_0$  — значения параметров нагрузки в центре эксперимента.

Для этого разработано специализированное программное обеспечение;

- определяются референсные (базовые) значения параметров ледовой нагрузки:  $p_{ref}$ ,  $b_{ref}$ ,  $l_{ref}$  для каждого класса ледокола. Они соответствуют значению этого параметра нагрузки в центре эксперимента для среднего значения водоизмещения  $\Delta_{aver}$  в рассматриваемом диапазоне водоизмещений ледоколов рассматриваемого класса;

- находятся значения коэффициента  $C(\Delta) = C(\Delta_i)/C(\Delta_{aver})$  для каждого класса и усредненное значение для выбранной группы классов; подбирается степенная аппроксимация для усредненных значений  $C(\Delta)$ ;

- находятся усредненные значения коэффициентов регрессии относительных значений параметров ледовой нагрузки для выбранной группы ледовых классов, т.е. регрессионные зависимости принимаются постоянными в пределах этой группы;

- результаты представляются в виде зависимостей, удобных для использования в нормативных документах Регистра, которые в общем виде имеют следующий вид: для районов AI, AI1 и CI:

$$p = k_p p_{ref}(IC) v_m (\Delta/1000)^{n_p};$$

$$b = k_b b_{ref}(IC) u_{bm} (\Delta/1000)^{n_b};$$

$$l = k_l l_{ref}(IC) u_{lm} (\Delta/1000)^{n_l};$$

где  $k_p$ ,  $k_b$ ,  $k_l$  — константы;

$p_{ref}(IC)$ ,  $b_{ref}(IC)$ ,  $l_{ref}(IC)$  — базовые значения давления, высоты и длины распределения ледовой нагрузки соответственно, принимаемые в зависимости от ледового класса;

$v_m$ ,  $u_{bm}$ ,  $u_{lm}$  — максимальные в пределах района значения коэффициентов формы;  
 $\Delta$  — водоизмещение;

для района VI:

$$p_B = p_{B,ref}(IC) f_p(\beta);$$

$$b_B = b_{B,ref}(IC) f_b(\beta);$$

$$l_B = 11,3 \sqrt{b_B \sin(\beta_B)},$$

где  $p_{B,ref}(IC)$ ,  $b_{B,ref}(IC)$  — базовые значения давления и высоты распределения ледовой нагрузки соответственно, принимаемые в зависимости от ледового класса;

$f_p(\beta)$ ,  $f_b(\beta)$  — функция угла наклона борта,  $\beta_B$  в средней части ледокола;

$\beta_B$  — угол наклона борта,  $\beta$ , в средней части ледокола.

### 4. НОВАЯ СИСТЕМА РЕГЛАМЕНТАЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

На основании представленной в п. 3 концепции была построена новая система зависимостей для определения параметров ледовой нагрузки на конструкции ледовых усилений традиционных и современных ледоколов в носовом, среднем и кормовом районах, основанная на МДРЛ. Новые зависимости приведены в табл. 3 — 7.

Таблица 3

Зависимости для определения интенсивности ледовой нагрузки, кПа

<b>Район А</b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$p_{AI} = 0,5904 p_{AI\_ref} v_m (\Delta/1000)^{0,2244}$ $p_{AI} = 0,7437 p_{AI\_ref} v_m (\Delta/1000)^{0,1241}$ $p_{AI} = 0,4839 p_{AI\_ref} v_m (\Delta/1000)^{0,1915}$
<b>Район А<sub>1</sub></b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$p_{A_1I} = 0,9305 p_{A_1I\_ref} v_{m\_A_1} (\Delta/1000)^{0,0274}$ $p_{A_1I} = 0,9803 p_{A_1I\_ref} v_{m\_A_1} (\Delta/1000)^{0,0225}$ $p_{A_1I} = 0,9199 p_{A_1I\_ref} v_{m\_A_1} (\Delta/1000)^{0,0225}$
<b>Район В</b>		$p_B = p_{B_{ref}}(IC) f_p(\beta); f_p(\beta) = b_0 + b_1 \beta + b_{11} \beta^2$
<b>Район С</b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$p_{CI} = 0,8029 p_{CI\_ref} v_{m\_CI} (\Delta/1000)^{0,0631}$ $p_{CI} = 0,9138 p_{CI\_ref} v_{m\_CI} (\Delta/1000)^{0,0346}$ $p_{CI} = 1,1473 p_{CI\_ref} v_{m\_CI} (\Delta/1000)^{0,0346}$

Таблица 4

Зависимости для определения высоты распределения ледовой нагрузки, м

<b>Район А</b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$b_{AI} = 0,3437 b_{AI\_ref} u_{bm\_AI} (\Delta/1000)^{0,4074}$ $b_{AI} = 0,2925 b_{AI\_ref} u_{bm\_AI} (\Delta/1000)^{0,4879}$ $b_{AI} = 0,2644 b_{AI\_ref} u_{bm\_AI} (\Delta/1000)^{0,3555}$
<b>Район А<sub>1</sub></b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$b_{A_1I} = 0,4908 b_{A_1I\_ref} u_{bm\_A_1I} (\Delta/1000)^{0,2900}$ $b_{A_1I} = 0,3489 b_{A_1I\_ref} u_{bm\_A_1I} (\Delta/1000)^{0,4210}$ $b_{A_1I} = 0,1183 b_{A_1I\_ref} u_{bm\_A_1I} (\Delta/1000)^{0,5701}$
<b>Район В</b>		$b_B = b_{B_{ref}}(IC) f_b(\beta); f_b(\beta) = b_0 + b_1 \beta + b_{11} \beta^2$
<b>Район С</b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$b_{CI} = 0,4398 p_{CI\_ref} u_{bm\_CI} (\Delta/1000)^{0,3640}$ $b_{CI} = 0,4586 p_{CI\_ref} u_{bm\_CI} (\Delta/1000)^{0,3117}$ $b_{CI} = 0,1494 p_{CI\_ref} u_{bm\_CI} (\Delta/1000)^{0,5210}$

Таблица 5

Зависимости для определения длины распределения ледовой нагрузки, м

<b>Район А</b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$l_{AI} = 0,5875 l_{AI\_ref} u_{lm\_AI} (\Delta/1000)^{0,2022}$ $l_{AI} = 0,5462 l_{AI\_ref} u_{lm\_AI} (\Delta/1000)^{0,2267}$ $l_{AI} = 0,6736 l_{AI\_ref} u_{lm\_AI} (\Delta/1000)^{0,099}$
<b>Район А<sub>1</sub></b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$l_{A_1I} = 0,6943 l_{A_1I\_ref} u_{lm\_A_1I} (\Delta/1000)^{0,1475}$ $l_{A_1I} = 0,4089 l_{A_1I\_ref} u_{lm\_A_1I} (\Delta/1000)^{0,3516}$ $l_{A_1I} = 0,3440 l_{A_1I\_ref} u_{lm\_A_1I} (\Delta/1000)^{0,2950}$
<b>Район В</b>		$l_B = 11,3 \sqrt{b_B \sin(\beta_B)}$
<b>Район С</b>	Традиционные Современные IB6-IB7 Современные IB8-IB9	$l_{CI} = 0,3850 l_{CI\_ref} u_{lm\_CI} (\Delta/1000)^{0,3715}$ $l_{CI} = 0,4871 l_{CI\_ref} u_{lm\_CI} (\Delta/1000)^{0,2823}$ $l_{CI} = 0,3369 l_{CI\_ref} u_{lm\_CI} (\Delta/1000)^{0,2914}$

Таблица 6

Параметры класса. Ледоколы с формой корпуса, отвечающей рекомендациям в 3.10.1.2.3 Правил Регистра

IC	Icebreaker6	Icebreaker7	Icebreaker8	Icebreaker9
$p_{AI\_ref}$	3100	4750	7300	11300
$b_{AI\_ref}$	0,84	0,93	0,95	0,98
$l_{AI\_ref}$	7,45	7,65	7,80	8,05
$p_{A,I\_ref}$	2700	3850	6200	9900
$b_{A,I\_ref}$	0,60	0,82	0,865	0,92
$l_{A,I\_ref}$	6,00	6,40	6,85	7,00
$p_{B\_ref}(IC)$	2050	4700	8500	12550
$b_{B\_ref}(IC)$	0,90	0,95	1,00	1,25
$p_{CI\_ref}$	3800	5200	7800	14000
$b_{CI\_ref}$	0,41	0,46	0,50	0,60
$l_{CI\_ref}$	6,00	6,10	6,15	6,25

Таблица 7

Параметры класса. Ледоколы, форма корпуса которых отличается от рекомендуемой в 3.10.1.2.3 Правил Регистра

IC	Icebreaker6	Icebreaker7	Icebreaker8	Icebreaker9
$p_{AI\_ref}$	3550	6250	12000	16500
$b_{AI\_ref}$	0,75	0,80	1,40	1,45
$l_{AI\_ref}$	8,10	8,30	9,40	9,70
$p_{A,I\_ref}$	2500	4000	10000	14500
$b_{A,I\_ref}$	0,61	0,725	1,20	1,30
$l_{A,I\_ref}$	7,00	8,00	8,40	8,80
$p_{B\_ref}(IC)$	2600	4200	9600	15900
$b_{B\_ref}(IC)$	0,45	0,65	0,80	1,15
$p_{CI\_ref}$	4000	6200	9000/10000	12500
$b_{CI\_ref}$	0,55	0,67	0,80/1,00	1,10
$l_{CI\_ref}$	6,60	6,80	7,00/8,20	8,50

## 5. СОПОСТАВЛЕНИЕ НОВЫХ И ДЕЙСТВУЮЩИХ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РЕГИСТРА В ЧАСТИ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ КОРПУСА ЛЕДОКОЛОВ

Для новой системы зависимостей выполнен сопоставительный анализ параметров ледовых нагрузок на носовой, промежуточный, средний и кормовой районы ледовых усилений с действующими требованиями Правил Регистра. Результаты сопоставления приведены в табл. 8.

Таблица 8

Сопоставление погонных нагрузок для рассмотренных проектов ледоколов

Название	Ледовый класс	Район А	Район А <sub>1</sub>	Район В	Район С	Среднее
«Москва»	Icebreaker6	0,1 %	5,9 %	7,1 %	4,3 %	1,4 %
«Капитан Сорокин»	Icebreaker7	13,3 %	19,5 %	27,3 %	5,4 %	7,0 %
«Ермак»	Icebreaker8	1,1 %	1,1 %	5,9 %	1,7 %	1,4 %
«Арктика»	Icebreaker9	2,0 %	2,7 %	4,6 %	5,8 %	3,8 %
«Мелкосидящий»	Icebreaker6	32,4 %	2,1 %	1,6 %	33,3 %	17,4 %
«Илья Муромец»	Icebreaker6	13,1 %	4,5 %	9,1 %	14,3 %	3,1 %
«Москва»	Icebreaker6	20,4 %	33,3 %	27,8 %	13,2 %	23,7 %
«Обь»	Icebreaker7	0,0 %	12,0 %	1,5 %	1,7 %	2,2 %
«Александр Санников»	Icebreaker8	8,6 %	12,9 %	3,3 %	6,1 %	6,1 %
«Таймыр»	Icebreaker8	10,9 %	6,1 %	0,3 %	9,5 %	6,7 %
«Виктор Черномырдин»	Icebreaker8	15,4 %	14,7 %	4,8 %	26,2 %	2,2 %
«Арктика»	Icebreaker9	8,5 %	8,4 %	1,0 %	0,2 %	4,0 %
«Лидер»	Icebreaker9	26,8 %	11,0 %	40,9 %	7,9 %	21,7 %
«Юрий Топчев»	Icebreaker6	29,5 %	9,4 %	18,5 %	42,8 %	10,3 %
«Катерина Великая»	Icebreaker7	3,4 %	19,6 %	7,2 %	16,9 %	11,8 %

Для традиционных ледоколов наблюдается хорошее согласование величины погонных нагрузок для всех рассмотренных ледоколов по всем районам ледовых усилений, где расхождение в среднем не превосходит 5 %.

Исключение составляет «Капитан Сорокин», у которого в районах А1 и В относительно небольшой угол наклона борта. Как показал анализ прямых расчетов параметров ледовых нагрузок для сценария отраженного удара, уменьшение угла наклона борта в средней части приводит к увеличению высоты распределения и соответственно к увеличению погонной нагрузки в промежуточном и среднем районах.

Однако при консервативном подходе действующих Правил Регистра высота распределения для промежуточного и среднего районов ледовых усилений ледокола задается равной высоте распределения в носовом районе. В данном случае это приводит к занижению расчетного значения высоты распределения и большому расхождению с расчетами по новым требованиям. В новых требованиях расчетные зависимости для параметров ледовой нагрузки построены на основании результатов прямых расчетов с учетом особенностей формы корпуса конкретного ледокола.

Для современных ледоколов наблюдается хорошее согласование значений погонных нагрузок для ледоколов средних водоизмещений в диапазоне 10,0 — 20,0 тыс. т, где расхождение не превосходит 10 %.

Как и прогнозировалось, для ледокола «Мелкосидящий» водоизмещением 3,1 тыс. т и ледокола «Лидер» водоизмещением 70,7 тыс. т наблюдается снижение приблизительно на 20 % расчетных ледовых нагрузок по новым требованиям по сравнению с уровнем действующих Правил Регистра.

Для ледокола «Москва» расхождение действующих требований и разработанных предложений объясняется наличием в действующих Правилах коэффициента  $k_p$ , учитывающего возможное осредненное увеличение нагруженности корпуса ледокола при увеличении скорости, связанной с ростом мощности. Учет этого факта основан на эмпирическом соотношении между скоростью и мощностью ледокола  $N \sim V^{2,5}$ . Для ледокола «Москва» наличие коэффициента  $k_p$  увеличивает ледовое давление и соответственно погонную нагрузку для всех районов на 22 %.

Большое расхождение также присутствует у ледоколов с вертикальным бортом в среднем районе. Такая форма означает появление повышенных ледовых нагрузок в средней части, связанных со сценарием отраженного удара о лед, что и объясняет сильное расхождение с требованиями действующих Правил, где в средней части параметры ледовой нагрузки задаются в долях от носового района.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретических исследований и расчетного анализа разработана система расчетных зависимостей для определения параметров ледовой нагрузки на конструкции ледовых усилений традиционных и современных ледоколов в носовом, среднем и кормовом районах, основанная на модели динамического разрушения льда.

- Собрана и обобщена общепроектная информация по большинству ледоколов эксплуатирующихся в замерзающих неарктических морях и морях Российской Арктики. В зависимости от формы корпуса выделены три представительные группы ледоколов и установлены диапазоны водоизмещений для ледоколов различного ледового класса.

- Выполнен анализ формы корпуса традиционных и современных ледоколов. Сформирована база данных по параметрам формы корпуса в носовом, среднем и кормовом районах ледовых усилений. Получены среднестатистические зависимости углов наклона ватерлинии и борта от положения расчетного сечения.

- Выполнено обоснование эксплуатационных режимов, определяющих расчетные ледовые нагрузки на носовой, промежуточный, средний и кормовой районы ледовых усилений ледоколов, включая работу в режимах DAS и расчетных режимов «скорость — толщина льда» для определения расчетных ледовых нагрузок на носовой, промежуточный, средний и кормовой районы ледовых усилений ледоколов.

- На основании новой модели динамического разрушения льда разработаны предложения по корректировке методики и структуры расчетных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок. На основе разработанных предложений определены расчетные нагрузки для всех рассматриваемых ледоколов. Получены оценки соответствия новых и действующих требований Правил Регистра в части регламентации ледовых усилений корпуса ледоколов.

- На основе разработанных предложений подготовлен Проект текста главы 3.10 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов в части определения параметров ледовой нагрузки на районы ледовых усилений ледоколов.

Статья подготовлена по результатам научно-исследовательской работы, выполненной по заказу Российского морского регистра судоходства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов.— Ч. II. Корпус. Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2020.
2. Кудюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. — 1976. — Т. 12, № 10. — с. 104 — 109.
3. Апполонов Е.М., Платонов В.В. Новая модель динамического разрушения льда, как основа для совершенствования требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов // Труды Крылов. гос. науч. центра. — 2019. — 4 (390). — с. 99 — 116.
4. Платонов В.В., Тряскин В.Н., Исаева Д.Т. Анализ особенностей формы корпуса традиционных и современных ледоколов // Труды Крылов. гос. науч. центра. — 2020. — Специальный выпуск 2. — с. 63 — 67.
5. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — 288 с.
6. Платонов В.В., Тряскин В.Н. Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус современных судов ледового плавания в носовом и кормовом районах//Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — с. 83 — 98. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-83-98.
7. Александров А.В., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Разработка проекта требований Правил РС к конструкции ледовых усиления корпуса судов, предназначенных для эксплуатации кормой вперед//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 52/53, 2018.— с. 47 — 56.
8. Апполонов Е.М., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Методика нормирования ледовых нагрузок на конструкции носовой оконечности судов с вертикальным бортом и бульбовыми обводами//Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2019. — Спец. вып. 1. — с. 17 — 23.

## REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. —Part II. Hull. Russian Maritime Register of Shipping. — St. Petersburg., 2020.
2. Kudyumov V.A., Kheysin D.E. *Gidrodinamicheskaya model udara tverdogo tela o lyod* [Hydrodynamic model of a solid body impact on the ice] Applied mechanics, 1976, vol. 12, No. 10, pp. 104 — 109.
3. Appolonov E.M., Platonov V.V. *Novaya model dinamicheskogo razrusheniya lda kak osnova dlya sovershenstvovaniya trebovaniy Pravil Registra k lédovym usileniyam sudov i ledokolov* [New model of dynamic ice failure as basis for improvement of RS requirements to ice belts of ice-going ships and icebreakers] Transactions of the Krylov State Research Centre, 2019, no. 4 (390), pp. 99 — 116.
4. Platonov V.V., Tryaskin V.N., Isaeva D.T. *Analiz osobennostey formy korpusa traditsionnykh i sovremennykh ledokolov* [Hull shape peculiarities of conventional and model icebreakers: analysis] // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; Special Edition 2: 63 — 67.
5. Appolonov E.M. *Ledovaya prochnost sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoy arkticheskoy navigatsii* [Ice strength of ships for all-year-round Arctic navigation] St. Petersburg State Marine Technical University, 2016, 288 p.
6. Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Metodicheskie osnovy opredeleniya raschetnykh ledovykh nagruzok na korpus sovremennykh sudov ledovogo plavaniya v nosovom i kormovom rayonakh* [Methodological basis for determining the design ice loads on the hull of modern ice vessels in the bow and stern areas] Arctic: Ecology and Economy, 2019, No. 4 (36), pp. 83 — 98. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4 -83-98.
7. Aleksandrov A.V., Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Razrabotka proekta trebovaniy Pravil RS k konstruksii ledovykh usileniy korpusa sudov, prednaznachennykh dlya expluatatsii kormoy vpered* [Development of draft RS Rules requirements for hull ice strengthening of ships designed for astern operation] Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, 2018, Dec., no. 52/53, pp. 47 — 56.
8. Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Metodika normirovaniya ledovykh nagruzok na konstruksii nosovoy okonechnosti sudov s vertikalnym bortom i bulbovymi obvodami* [Ice load assignment procedure for bows of ships with vertical sides and bulbous lines] Transactions of the Krylov State Research Centre, 2019, special. iss. 1, pp. 17 — 23.

УДК 629.12; 629.5.015.4

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРАВИЛ РС К КОНСТРУКЦИЯМ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ СТОЕЧНЫХ СУДОВ

**В.Н. Тряскин**, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

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

**И.А. Свистунов**, ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, e-mail: svistunoff.ivan@yandex.ru

В настоящее время в требованиях Правил РС и других классификационных обществ отсутствуют специальные требования к конструкциям ледовых усилений стоечных судов. С другой стороны, в последнее время возникают вопросы обеспечения ледовой прочности прежде всего крупнотоннажных стоечных судов типа плавучие терминалы для приема/хранения/перегрузки углеводородов и число таких случаев, вероятно, будет увеличиваться. Поэтому целью настоящей работы является оценка возможности применения требований к конструкциям ледовых усилений действующих Правил РС к стоечным судам и разработка специальных требований в части обеспечения ледовой прочности крупнотоннажных стоечных судов, которые могут быть внедрены в Правила Регистра. В зависимости от района эксплуатации предложена система ледовых классов стоечных судов.

*Ключевые слова:* Правила Российского морского регистра судоходства, стоечное судно, ледовое сжатие, ледовая нагрузка, вероятностный закон распределения, обеспеченность случайной величины

## ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY TO APPLY CURRENT REQUIREMENTS OF RS RULES TO BERTH-CONNECTED SHIPS ICE REINFORCEMENT

**V.N. Tryaskin**, DSc, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

**V.V. Platonov**, PhD, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru.

**I.A. Svistunov**, Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, e-mail: svistunoff.ivan@yandex.ru.

The existing provisions of the RS Rules and the rules of other classification societies do not have special requirements for ice reinforcement of berth-connected ships. On the other hand, issues have risen of late as to ensuring ice strengthening, especially for large-capacity berth-connected ships such as floating terminals for hydrocarbons receiving/storing/transshipment, and the number of such cases is likely to increase in the future. Therefore, the purpose of this article is to assess the possibility of applying the requirements for ice strengthening structures of the current RS Rules to berth-connected ships and to develop special requirements for ensuring the ice strength of large-capacity berth-connected ships for further implementation into the Rules. New ice class marks for berth-connected ships have been proposed based on the area of ship service.

*Keywords:* Rules of Russian Maritime Register of Shipping, berth-connected ships, ice compression, ice load, probability distribution law, probability of exceedance

### ВВЕДЕНИЕ

По действующим Правилам Российского морского регистра судоходства (далее Правила Регистра) словесная характеристика «стоечное судно» (**berth-connected ship**) регламентирует ограничение по району эксплуатации объекта. Она относится, как правило, к несамостоятельным судам, эксплуатирующимся в режиме стоянки в акватории, удаленной от берега, либо на грунте или на швартовах у причальной стенки. Этой нотации соответствуют минимальные требования Правил. Специальные требования к ледовым усилениям корпуса не предъявляются.

В последнее время возникают вопросы обеспечения ледовой прочности крупнотоннажных стоечных судов, в частности, плавучих терминалов для приема/хранения/перегрузки углеводородов. Количество таких судов, вероятно, будет увеличиваться. Анализ показывает, что в настоящее время не существует требований Правил классификационных обществ к ледовым усилениям корпуса стоечных судов.

Целями настоящей работы являются:

- оценка возможности применения к стоечным судам действующих требований Правил Регистра к конструкциям ледовых усилений;

- разработка специальных требований по обеспечению ледовой прочности крупнотоннажных стоечных судов, которые могут быть внедрены в Правила Регистра.

## ПОНЯТИЕ «СТОЕЧНОЕ СУДНО»

В действующих Правилах Регистра [1] приводится следующее определение стоечного судна:

«Стоечное судно — судно или плавучее сооружение, эксплуатирующееся в режиме стоянки в акватории, удаленной от берега, либо на грунте или на швартовах у причальной стенки (берега)». К таким судам относятся: плавучие доки, плавучие гостиницы и общежития, плавучие мастерские, плавучие электростанции, плавучие суда-склады, плавучие хранилища нефтепродуктов и т.д.

Словесная характеристика «стоечное судно» (или **berth-connected ship**) регламентирует ограничение по району эксплуатации объекта и относится, как правило, к несамостоятельным судам, заякоренным или пришвартованным в прибрежной зоне, вплоть до указания координат места работы. Нотация не предполагает дополнительных требований в контексте потенциального использования береговой инфраструктуры, а характеризуется только минимальными (т.е. наименее консервативными) требованиями Правил Регистра к прочности, остойчивости и другим аспектам.

Если стоечное судно является несамостоятельным хранилищем нефтепродуктов или СПГ и будет зафиксировано на точке эксплуатации до конца жизненного цикла, то Регистром допускается замена основного символа класса с **КМ** на **КЕ**. Это является оправданным в отсутствие необходимости дальнейшего наблюдения за энергоустановкой и импульсивным комплексом судна.

Характеристика «стоечное судно» предполагает дополнительные послабления в отношении периодичности и способа освидетельствования. При наличии обращений судовладельца и при соблюдении дополнительных условий, докования судна могут быть заменены освидетельствованиями подводной части на плаву в течение всего срока службы судна.

Требования к стоечным судам определяются условиями эксплуатации судна: местом их расположения, ветро-волновым режимом водного бассейна, защищенности акватории от неблагоприятных погодных условий и т.д. Для перемещения этих судов с постоянного места эксплуатации разрабатывается специальный проект перегона. Специальные требования к стоечным судам относятся, прежде всего, к устройствам, оборудованию и снабжению, конструктивной противопожарной защите и противопожарному оборудованию, системам и трубопроводам, электрическому оборудованию.

Стоечные суда, которые постоянно эксплуатируются у берега, могут не иметь якорного устройства при условии обеспечения безопасности их стоянки другими средствами, которые признаны достаточными Регистром. Если по местным условиям плавания на определенных водных путях возникает необходимость якорного обеспечения этих судов и средств, оно должно выбираться как для несамостоятельных судов. Для плавучих сооружений и стоечных судов, постоянно эксплуатирующихся у берега, не требуется наличие рулевой системы.

В рамках данной работы рассматривается ограниченное число типов стоечных судов и сооружений в плане их возможного взаимодействия со льдом, для которых могут потребоваться ледовые усиления корпуса:

- плавучие нефтехранилища,
- стоечные плавучие СПГ-хранилища,
- научно-экспедиционные суда, предназначенные для длительного дрейфа в ледовых условиях.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА СТОЕЧНЫЕ СУДА

Натурные наблюдения показывают, что взаимодействие судна, находящегося в статическом положении в ледовых условиях, в большей степени напоминает ледовые сжатия. Это позволяет рекомендовать для определения расчетных ледовых нагрузок на стоечные суда существующие модели ледовых сжатий.

Наблюдения ледовых сжатий судов с вертикальными бортами показывают, что в процессе сжатия происходит изгибное разрушение ледяного покрова. Такое разрушение связано с появлением «изгибной» компоненты напряженно-деформированного состояния ледового поля, обусловлено его анизотропностью, и, в частности, изменчивостью физико-механических свойств по толщине. На это указывается и в работе [2].

Авторы работы [2] отмечают, что, по крайней мере, у морского льда, содержащего вертикально ориентированные капиллярные поры, заполненные рассолом, объем пористости, заполненной рассолом, возрастает по мере приближения к границе с водой, его локальная прочность в той же последовательности падает. Предельная деформация в момент исчерпания несущей способности для нижних слоев плавающего льда оказывается меньше, чем для верхних. Поэтому при равномерном деформировании по толщине льда разрушение начинается с нижних (менее прочных) слоев, в то время как верхние сохраняют свою несущую способность.

Соответствующая модель определения нагрузок при ледовых сжатиях в детерминированной постановке была предложена в работе [3]. Согласно этой модели, нижние слои оказываются менее прочными, чем верхние, что при постепенном росте ледовой нагрузки приводит к разрушению кристаллов льда нижних горизонтов (см. рис. 1). Контактное давление естественным образом перераспределяется по высоте, меньшей, чем толщина льда. Дальнейшее увеличение давления при уменьшении высоты пятна контакта, приводит к появлению растягивающих напряжений на нижней поверхности ледяного поля, ориентированных в перпендикулярном направлении к плоскости борта. Когда указанные напряжения превышают предел прочности льда на изгиб «снизу»  $\sigma_{и}$  и происходит образование поверхностной трещины в нижнем слое ледяной пластины.

Со временем трещина распространяется по всей толщине в направлении перпендикулярном поверхности льда, что в конечном итоге приводит к образованию сектора, который затем вытесняется наверх. После выламывания одного сектора в контакт вступают соседние зоны кромки, предопределяя образование новых секторов.

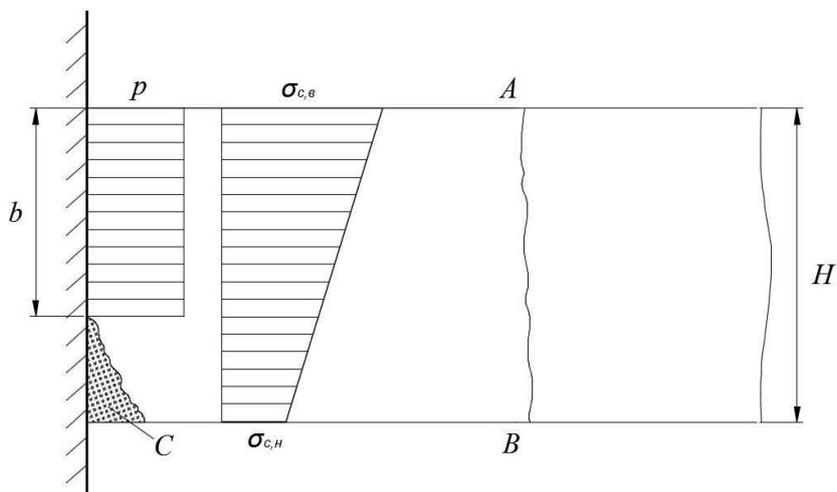


Рис. 1 Схема контактных ледовых нагрузок при взаимодействии с вертикальным бортом:

$H$  — толщина ровного льда;

$\sigma_{c,в}$  — прочность льда на параллельное сжатие в верхнем слое ровного льда;

$\sigma_{c,н}$  — прочность льда на параллельное сжатие в нижнем слое ровного льда;

$p$  — контактное давление;  $b$  — высота пятна контакта;

$AB$  — сквозная трещина;  $C$  — зона разрушенного льда

При этом возможны несколько вариантов форм кромки ледяного поля, с которым происходит взаимодействие. Согласно работе [3], максимум интегральной ледовой нагрузки достигается при сжатии во льдах, имеющих ровную кромку. Для такой модели используются следующие выражения:

$$b^*(\beta, \gamma) = 0,81 - \zeta(\beta) \cdot e^{-\gamma/(7,7\beta + 0,175)};$$

$$\zeta(\beta) = 0,94 - 1,3 \cdot e^{-\beta/0,18};$$

$$p = \sigma_{c,н} \cdot [\gamma - b^*(\beta, \gamma) \cdot (\gamma - 1)];$$

$$b = b^*(\beta, \gamma) \cdot H;$$

$$l = 2,5 \cdot H;$$

$$q = p \cdot b^*(\beta, \gamma) \cdot H,$$

где  $\gamma = \sigma_{с,в}/\sigma_{с,н}$ ;  
 $\beta = \sigma_{н}/\sigma_{с,н}$ ;  
 $l$  — длина пятна контакта;  
 $q$  — погонная ледовая нагрузка.

Морской лед представляет собой сложную природную систему, свойства которой изменяются в пространстве и времени. Как следствие, изменчивостью характеризуются все прочностные параметры ледяного покрова. Поэтому нагрузки, оказывающие воздействие со стороны льда на инженерные сооружения, будут носить вероятностный характер. Стоечные суда в местах базирования также будут подвергаться действию достаточно широкого спектра значений ледовых нагрузок.

Метод вероятностного моделирования позволяет учесть вероятностную природу внешнего силового воздействия на исследуемый объект морской техники. Суть данного подхода заключается в использовании детерминированных функциональных зависимостей с учетом вероятностных характеристик параметров окружающей среды. В настоящей работе детерминированная модель ледовых сжатий [3] была принята за основу для создания вероятностной модели определения ледовых нагрузок на вертикальные участки борта стоечных судов.

Такая модель была апробирована ранее для оценки ледовых нагрузок на корпус НЭС «Академик Трешников», который длительное время работал как сезонная дрейфующая научно-исследовательская станция «Северный полюс-2019» [4]. Модель позволяет получать оценки локальных ледовых нагрузок при сжатиях, действующих на суда, имеющие в средней части вертикальный борт или борт с незначительным углом развала шпангоута.

В основе вероятностного моделирования лежат функциональные зависимости, описывающие механизм разрушения кромки ледяного поля при взаимодействии с вертикальной стенкой с учетом неравномерности прочности льда на параллельное сжатие по толщине в связи с влиянием изменения температуры по толщине льда. Учитывается также ряд других параметров, имеющих вероятностную природу.

Алгоритм моделирования параметров ледовых нагрузок при сжатиях заключается в следующем [5]. На начальном этапе производится сбор и статистическая обработка информации о ледовых условиях. Для характеристик ледяного покрова, которые определяют величину ледовых нагрузок, находятся эмпирические вероятностные законы их распределения. Для полученных эмпирических распределений подбираются теоретические законы распределения. Согласованность теоретического и эмпирического распределений осуществляется методами проверки правдоподобия гипотез с использованием критериев согласия Колмогорова и (или) Пирсона [6].

На следующем этапе по выявленным статистическим закономерностям характеристик ледовой обстановки конкретного района эксплуатации с помощью детерминированных расчетных выражений выполняется оценка параметров ледовых нагрузок.

Далее производится статистическая обработка результатов расчета определяемых параметров ледовой нагрузки. Как и на первом этапе, выполняется процедура подбора теоретических законов распределения по полученным эмпирическим с использованием общепринятых критериев согласия. В конечном итоге определяются значения параметров ледовой нагрузки, соответствующие заданным обеспеченностям. Обеспеченность расчетной нагрузки специально обосновывается с учетом опыта проектирования и эксплуатации во льдах морских судов и морских инженерных сооружений.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА СТОЕЧНЫЕ СУДА

Результаты вероятностно-детерминированного моделирования в соответствии с описанным выше алгоритмом приведены в табл. 1 для характеристик ледяного покрова и в табл. 2 для параметров ледовых нагрузок. Функции распределения и соответствующие значения параметров распределения определены по результатам обработки и анализа накопленных экспедиционных данных ААНИИ, а также на основе анализа архивных материалов наблюдений полярных станций, авиационных и спутниковых наблюдений [7].

Таблица 1

## Результаты моделирования характеристик ледового покрова

Характеристика	Среднее	СКО	Распределение	Параметры распределения
Балтийское море				
Толщина ровного льда, см	67,12	12,89	Нормальное	$m = 67,121; \sigma = 12,887$
Предел прочности льда на сжатие в верхнем слое, МПа	1,81	0,38	Гамма	$\lambda = 22,719; \alpha = 0,080$
Предел прочности льда на изгиб, МПа	0,29	0,03	Нормальное	$m = 0,292; \sigma = 0,034$
Баренцево море				
Толщина ровного льда, см	79,60	29,54	Гамма	$\lambda = 7,858; \alpha = 9,799$
Температура воздуха, С	-11,40	3,79	Нормальное	$m = -11,398; \sigma = 3,789$
Карское море				
Толщина ровного льда, см	135,75	58,62	Гамма	$\lambda = 5,363; \alpha = 25,312$
Температура воздуха, С	-23,90	2,67	Нормальное	$m = -23,899; \sigma = 2,669$
Обская губа Карского моря				
Толщина ровного льда, см	136,72	14,98	Гамма	$\lambda = 71,441; \alpha = 1,928$
Предел прочности льда на сжатие в верхнем слое, МПа	2,29	0,71	Гамма	$\lambda = 10,421; \alpha = 0,220$
Предел прочности льда на изгиб, МПа	0,36	0,12	Гамма	$\lambda = 9,208; \alpha = 0,039$
море Лаптевых				
Толщина ровного льда, см	211,23	105,15	Гамма	$\lambda = 4,036; \alpha = 52,341$
Температура воздуха, С	-30,0	1,25	Нормальное	$m = -30,00; \sigma = 1,249$
Восточно-Сибирское море				
Толщина ровного льда, см	184,33	82,62	Нормальное	$m = 184,33; \sigma = 82,615$
Температура воздуха, С	-28,57	2,05	Равномерное	$a = -32,01; b = -24,98$
Чукотское море				
Толщина ровного льда, см	180,23	107,23	Нормальное	$\lambda = 2,825; \alpha = 63,804$
Температура воздуха, С	-22,83	1,68	Равномерное	$a = -17,89; b = -9,58$
Каспийское море				
Толщина ровного льда, см	72,58	16,62	Нормальное	$m = 72,579; \sigma = 16,615$
Предел прочности льда на сжатие в верхнем слое, МПа	1,68	0,23	Вейбулла	$a = 8,168; c = 1,786$
Предел прочности льда на изгиб, МПа	0,15	0,07	Вейбулла	$a = 2,289; c = 0,172$

Таблица 2

## Результаты моделирования ледовых нагрузок

Характеристика	Среднее	СКО	Распределение	Параметры распределения
Балтийское море				
Давление, МПа	1,477	0,152	Вейбулла	$a = 10,862, c = 1,548$
Высота распределения, м	0,347	0,081	Вейбулла	$a = 4,652, c = 0,379$
Длина распределения, м	1,672	0,315	Вейбулла	$a = 5,811, c = 1,806$
Погонная нагрузка, МН/м	0,515	0,287	Вейбулла	$a = 3,826, c = 0,570$
Баренцево море				
Давление, МПа	2,632	0,384	Вейбулла	$a = 7,578, c = 2,803$
Высота распределения, м	0,440	0,154	Вейбулла	$a = 3,066, c = 0,492$
Длина распределения, м	1,967	0,649	Вейбулла	$a = 3,257, c = 2,195$
Погонная нагрузка, МН/м	1,135	0,362	Вейбулла	$a = 3,374, c = 1,264$
Обская губа Карского моря				
Давление, МПа	1,910	0,312	Вейбулла	$a = 6,750, c = 2,046$
Высота распределения, м	0,726	0,219	Вейбулла	$a = 3,575, c = 0,806$
Длина распределения, м	3,432	0,375	Вейбулла	$a = 10,217, c = 3,604$
Погонная нагрузка, МН/м	1,408	0,532	Вейбулла	$a = 3,316, c = 1,430$
Карское море				
Давление, МПа	3,690	0,240	Вейбулла	$a = 17,470, c = 3,804$
Высота распределения, м	0,739	0,313	Вейбулла	$a = 2,510, c = 0,832$
Длина распределения, м	3,311	1,405	Вейбулла	$a = 2,510, c = 3,731$
Погонная нагрузка, МН/м	2,776	1,274	Вейбулла	$a = 2,315, c = 3,133$
море Лаптевых				
Давление, МПа	4,138	0,054	Вейбулла	$a = 92,645, c = 4,163$
Высота распределения, м	1,232	0,525	Вейбулла	$a = 2,497, c = 1,388$
Длина распределения, м	5,367	2,263	Вейбулла	$a = 2,526, c = 6,047$
Погонная нагрузка, МН/м	5,164	2,226	Вейбулла	$a = 2,469, c = 5,821$
Восточно-Сибирское море				
Давление, МПа	4,009	0,152	Вейбулла	$a = 30,509, c = 4,082$
Высота распределения, м	1,056	0,451	Вейбулла	$a = 2,492, c = 1,190$
Длина распределения, м	4,621	2,011	Вейбулла	$a = 2,446, c = 5,211$
Погонная нагрузка, МН/м	4,259	1,979	Вейбулла	$a = 2,285, c = 4,807$
Чукотское море				
Давление, МПа	3,614	0,171	Вейбулла	$a = 24,265, c = 3,696$
Высота распределения, м	1,077	0,481	Вейбулла	$a = 2,383, c = 1,215$
Длина распределения, м	5,015	2,287	Вейбулла	$a = 2,330, c = 5,660$
Погонная нагрузка, МН/м	3,838	1,854	Вейбулла	$a = 2,195, c = 4,334$
Каспийское море				
Давление, МПа	1,333	0,077	Вейбулла	$a = 19,894, c = 1,369$
Высота распределения, м	0,502	0,129	Вейбулла	$a = 4,230, c = 0,552$
Длина распределения, м	1,767	0,354	Вейбулла	$a = 5,462, c = 1,915$
Погонная нагрузка, МН/м	0,668	0,166	Вейбулла	$a = 4,362, c = 0,734$

#### 4. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРАВИЛ РЕГИСТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СТОЕЧНЫМ СУДАМ

Действующие Правила Регистра содержат требования для определения ледовых нагрузок на средний район ледовых усилений судов [8] и ледовый пояс плавучих буровых установок и морских стационарных платформ (ПБУ/МСП) [9]. Для оценки возможности использования данных зависимостей применительно к крупнотоннажным стоечным судам выполнен расчет параметров ледовых нагрузок и размеров конструктивных элементов для тестовых судов. Результаты расчетов приведены в табл. 3 — 6.

В качестве тестовых судов выбраны:

- плавучее нефтехранилище;
- стоечное плавучее СПГ-хранилище;
- научно-экспедиционное судно;
- ледостойкая самоходная платформа.

Первый объект переоборудован, второй предполагалось переоборудовать из старых судов, не имеющих никаких ледовых усилений. Другие два объекта проектировались как суда активного ледового плавания с высоким уровнем ледовых усилений.

Таблица 3

Расчет параметров ледовой нагрузки по зависимостям [8]

	Ед. измер.	Стоечное плавучее СПГ-хранилище	Плавучее нефтехранилище	Ледостойкая самоходная платформа	Научно-экспедиционное судно
Интенсивность	кПа	855	1601	1382	3533
Высота распределения	м	1,05	1,19	0,38	1,28
Длина распределения	м	6,3	7,14	4,43	7,68

Таблица 4

Расчет локальных ледовых давлений по зависимостям [9]

	Ед. измер.	Стоечное плавучее СПГ-хранилище	Плавучее нефтехранилище	Ледостойкая самоходная платформа	Научно-экспедиционное судно
Площадь контакта	м <sup>2</sup>	2,24	5,0	1,12	0,612
Ледовое давление	МПа	3,757	2,265	5,590	6,923

Таблица 5

Толщина наружной обшивки для тестовых судов

	Ед. измер.	Стоечное плавучее СПГ-хранилище	Плавучее нефтехранилище	Ледостойкая самоходная платформа	Научно-экспедиционное судно
РС суда [8]	мм	24,3	41,4	23,5	25,9
РС МСП [9]	мм	52,2	52,5	40,1	36,8
Фактические	мм	16,5	23	27	26

Таблица 6

Момент сопротивления шпангоута для тестовых судов

	Ед. измер.	Стоечное плавучее СПГ-хранилище	Плавучее нефтехранилище	Ледостойкая самоходная платформа	Научно-экспедиционное судно
РС суда [8]	см <sup>3</sup>	572	6804	441	1397
РС МСП [9]	см <sup>3</sup>	4107	9869	1645	1897
Фактические	см <sup>3</sup>	508	2980	520	1733

Полученные результаты показывают, что значения толщины наружной обшивки и момента сопротивления шпангоута, полученные по требованиям [8] и [9], существенно превосходят фактически принятые в проектах.

Наибольшее расхождение наблюдается для стоечного плавучего СПГ-хранилища и плавучего нефтехранилища, которые изначально проектировались как суда не ледового класса. Для всех рассмотренных

тестовых судов значения толщины обшивки и момент сопротивления, полученные по требованиям для МСП [9], превосходят значения, полученные по требованиям для судов [8]. МСП имеют существенно большее водоизмещение, главные размерения связаны известной формулой, поэтому величина главных размерений для платформ заметно выше, чем для судна. Конструкции МСП должны воспринимать ледовые нагрузки, возникающие при подвижках ледовых полей при эксплуатации в открытом море. Для стоечных судов, эксплуатирующихся в прибрежных зонах, характерны нагрузки от ледовых сжатий, которые по своей величине уступают нагрузкам от подвижек ледовых полей.

Таким образом, можно сделать вывод, что требования к ПБУ/МСП хуже применимы для стоечных судов. Поэтому при разработке требований к конструкции корпуса стоечных судов сделан выбор в пользу более подходящих требований к конструкциям судов соответствующих ледовых классов.

## 5. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ СТОЕЧНЫХ СУДОВ

Проект требований Регистра к ледовой прочности крупнотоннажных стоечных судов разработан на основании анализа результатов выполненных расчетов параметров ледовых нагрузок при ледовом сжатии и оценки действующих Правил Регистра в области определения ледовых нагрузок на суда и МСП. Разработанный проект требований Правил не распространяется на стоечные суда типа плавучих гостиниц, плавучих доков, причальных понтонов, дебаркадеров, для которых регламентация ледовых усилений не предусмотрена.

Классификация стоечных судов построена на основе принципа, аналогичного классификации судов ограниченного района плавания. Выделяются суда без ограничения по району эксплуатации и несколько групп судов ограниченного района плавания, для которых снижаются требования к расчетным нагрузкам. При таком подходе количество ледовых классов ограничено, и обеспечивается гибкий подход при выборе ледового класса стоечного судна.

При разработке Проекта требований принята следующая концепция построения системы ледовых классов и системы расчетных зависимостей ледовых нагрузок для стоечных судов.

1. Стоечные суда могут эксплуатироваться во всех районах российской Арктики и замерзающих морях.
2. Категория ледовых усилений стоечного судна принимается в зависимости от района эксплуатации, определяемого соответствующим арктическим регионом или незамерзающим неарктическим морем, степени тяжести ледовой обстановки.

3. В качестве нормативного параметра, характеризующего уровень расчетных ледовых условий эксплуатации, принята средняя толщина льда в каждом рассматриваемом регионе.

4. На основе анализа ледовых условий морей Российской Арктики и замерзающих неарктических морей принята следующее подразделение районов в соответствии с уровнем ограничения (R) допустимых ледовых условий (IC):

**RIC-1** — ограничения соответствуют тяжелым ледовым условиям Арктических морей с толщинами льда более 2,0 м;

**RIC-2** — ограничения соответствуют средним и легким ледовым условиям Арктических морей с толщинами льда не более 2,0 м;

**RIC-3** — ограничения соответствуют ледовым условиям незамерзающих неарктических морей с толщинами льда не более 1,0 м.

5. Конкретные данные о замерзающих морях для каждого района допустимой эксплуатации стоечных судов представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Диапазоны средних значений толщины льда, м, для морей Российской Арктики и замерзающих неарктических морей**

Диапазон средних значений толщины льда, м	Акватории (моря)
< 1,0 1,0 — 2,0 > 2,0	Балтийское, Баренцево, Охотское, Каспийское Карское, Лаптевых Восточно-Сибирское, Чукотское

6. В качестве нормируемых параметров расчетной ледовой нагрузки принимаются: интенсивность расчетной нагрузки  $p$ , расчетная высота зоны контакта  $b$ , расчетная длина зоны контакта  $l^H$ .

7. Осредненные нормативные значения параметров расчетной ледовой нагрузки на конструкции стоечных судов с вертикальными бортами для каждого района эксплуатации определяются по результатам оценки погонной ледовой нагрузки с использованием вероятностно-детерминированной модели.

8. Нормативная обеспеченность расчетной нагрузки устанавливается в зависимости от среднестатистических значений толщины льда в соответствующем районе эксплуатации, где возможна установка стоечного судна в соответствии со следующим алгоритмом:

- шаг 1.

Определяется среднестатистическое значение параметра  $b/H$  на основе результатов вероятностного моделирования ледовых нагрузок для каждого района эксплуатации стоечного судна;

- шаг 2.

На основе данных о среднестатистической толщине льда  $H_{aver}$  для каждого района эксплуатации стоечного судна определяется расчетная величина параметра  $b_{aver} = (b/H)H_{aver}$  — высоты зоны распределения ледовой нагрузки);

- шаг 3.

Используя данные о законе распределения параметра  $b$ , определяется обеспеченность значения этого параметра, которая и принимается как нормативная обеспеченность расчетной погонной нагрузки, соответствующей нормальным (безопасным) условиям эксплуатации стоечного судна для каждого района эксплуатации;

- шаг 4.

В соответствии с принятой нормативной обеспеченностью определяются расчетные погонные нагрузки  $q_s$ , соответствующей нормальным (безопасным) условиям эксплуатации стоечного судна для каждого района эксплуатации;

- шаг 5.

Величина расчетной предельной погонной нагрузки  $q_u$ , соответствующая принципу нормирования прочности конструкций судов ледового плавания в Правилах РС (критерий предельной прочности) принимается на основе известного соотношения между нагрузкой фибровой текучести и предельной нагрузкой балки набора:  $q_u/q_s = 1,8$ ;

- шаг 6.

Используя данные о законе распределения погонной нагрузки  $q$ , определяется обеспеченность значения этого параметра, которая и принимается как нормативная обеспеченность предельной погонной нагрузки  $q_u$ , соответствующей предельно допустимым условиям эксплуатации стоечного судна для каждого района эксплуатации;

- шаг 7.

Для принятой нормативной обеспеченности предельной погонной нагрузки устанавливается соответствующая величина предельной толщины льда  $H_{пред}$ . Полученные значения предельной толщины льда, определяемые на основе данных о законе распределения толщины льда в заданном районе, рассматриваются как справочные величины. Оценки значений предельной толщины льда представлены в табл. 8.

Таблица 8

Предельная толщина льда для различных районов эксплуатации

Район эксплуатации	$H_{пред}$ , м
Север Балтийского моря	1,0
Баренцевом море в районах с легкими ледовыми условиями	1,1
Карское море в районах с ледовыми условиями средней тяжести	2,5
Море Лаптевых в районах с ледовыми условиями средней тяжести	4,7
Восточно-Сибирском море в районах с ледовыми условиями средней тяжести	3,2
Чукотском море в районах с ледовыми условиями средней тяжести	3,7
Север Каспийского моря	1,1

9. В соответствии с принятой нормативной обеспеченностью определяются расчетные предельные погонные нагрузки  $q_u$  для каждого района эксплуатации стоечного судна и значения параметров  $b_u$  (высоты распределения) и  $l_u$  (длины распределения), соответствующие предельным нагрузкам.

10. Расчетное давление на конструкции ледового пояса стоечного судна определяется по формуле  $p_u = q_u/b_u$ .

Результаты реализации предложенной методологии нормирования ледовых нагрузок на конструкции стоечных судов представлены в табл. 9.

Таблица 9

**Результаты расчета ледовых нагрузок на конструкции стоечных судов**

Район (море)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	$b/H$	$H_{aver}$	$b_{aver}$	$Q^*(b)$	$q_s$	$q_u$	$q'_s$	$q'_u$	$Q^*(q_u)$	$Q^*(q_u)$	$H_{np}$	$b$	$p$	$l$
	–	см	м	%	МН/м	МН/м	МН/м	МН/м	%	%	см	м	МПа	м
Балтийское	0,52	67	0,35	50,6	0,52	0,93	0,42	0,76	0,2	5	88	0,48	1,71	2,18
Баренцево	0,57	79	0,45	46,9	1,04	1,88	0,97	1,75	2,3	5	127	0,70	3,24	3,08
Карское	0,56	134	0,75	45,7	2,81	5,06	2,79	5,02	4,7	5	244	1,29	4,05	5,77
Лаптевых	0,58	216	1,25	46,2	5,24	9,44	5,04	9,08	3,7	5	408	2,15	4,21	8,98
Восточно-Сибирское	0,58	187	1,09	45,1	4,36	7,85	4,32	7,77	4,7	5	320	1,85	4,23	8,16
Чукотское	0,55	200	1,10	45,9	3,86	6,95	3,96	7,12	5,9	5	385	1,19	3,87	9,05
Каспийское	0,70	73	0,51	49,4	0,68	1,22	0,53	0,94	0,0	5	100	0,72	1,45	2,34

Для полученных значений параметров ледовой нагрузки (см. столбцы 12 — 14 табл. 9) выполняется усреднение в соответствии с принятым разделением на районы эксплуатации **RIC-1**, **RIC-2**, **RIC-3**. Итоговые значения параметров ледовой нагрузки приведены в табл. 10.

Таблица 10

**Итоговые значения параметров ледовой нагрузки**

	$p$ , кПа	$b$ , м	$l$ , м
<b>RIC-1</b>	4200	1,5	8,5
<b>RIC-2</b>	3000	1,0	7,0
<b>RIC-3</b>	1500	0,6	3,0

Расчеты показывают, что нормативная обеспеченность условной предельной погонной нагрузки для Арктических морей близка к 5 % (столбец 9 табл. 9). Исключением являются результаты расчетов для Балтийского и Каспийского морей. Это связано с отсутствием представительной статистической информации по температурным режимам и ледовым условиям для этих морей. Поэтому эти моря могут не учитываться. Данное допущение хорошо коррелируется с нормой допустимой повреждаемости, заложенной в основу действующих требований к ледовым усилениям Правил РС [10].

В связи с вышеуказанным целесообразно откорректировать расчетную предельную нагрузку, приняв за основу нормативную обеспеченность 5 % (столбец 10 табл. 9). Расхождение исходной предельной нагрузки (столбец 4 табл. 9) и откорректированной (столбец 10 табл. 9) находится в пределах допустимых пределов.

Для судов, которые могут работать в режиме стоечных (научно-экспедиционные суда, и т.п.) ледовые нагрузки должны определяться в соответствии с действующими требованиями 3.10.3 части II «Корпус» Правил Регистра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретических исследований и расчетного анализа разработан Проект требований Правил Регистра в части обеспечения ледовой прочности крупнотоннажных стоечных судов.

- Выполнен анализ действующих нормативных документов, касающихся требований к стоечным судам. На данный момент нормативные документы классификационных обществ не содержат конкретных требований к корпусным конструкциям стоечных судов. В нормативных документах РС присутствует только словесная характеристика (**berth-connected ship**).

- Выполнен анализ особенностей взаимодействия корпуса стоечного судна со льдом, которое в большей степени соответствует ледовому сжатию. Для сценария ледового сжатия для определения расчетных ледовых нагрузок выбран вероятностно-детерминированный подход. В качестве основы приняты известные детерминированные модели ледовых сжатий. Параметры этих моделей, имеющие вероятностную природу, определены на основе статистических данных.

- На основании анализа расчетных ледовых нагрузок в соответствии с требованиями Правил Регистра к судам и плавучим буровым установкам/морским стационарным платформам сделан выбор в пользу более подходящих к стоечным судам требованиям к конструкции корпуса судов ледовых классов.

- На основании анализа результатов моделирования ледовых нагрузок при ледовых сжатиях для различных районов возможной эксплуатации построена система ледовых классов и система расчетных зависимостей для ледовых нагрузок для крупнотоннажных стоечных судов.

- Подготовлен проект требований Правил классификации и постройки морских судов для внедрения в части I «Классификация» и XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна».

- Выполнены тестовые проектные расчеты конструкций ледовых усилений на основе предложенных рекомендаций для условной бортовой конструкции стоечного судна в средней части.

Статья подготовлена по результатам научно-исследовательской работы, выполненной по заказу Российского морского регистра судоходства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — ч. I. Классификация. — Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2020.
2. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Механика разрушения и проблемы освоения Арктики. Арктика: экология и экономика. № 4 (20), 2015, с. 14 — 27.
3. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатиях во льдах // Научно-технический сборник Российского морского Регистра судоходства. 2008. № 31. с. 129 — 146.
4. Свистунов И.А., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Имитационное моделирование ледовых нагрузок при ледовых сжатиях на примере научно-экспедиционного судна «Академик Трешников». Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 2 (392). с. 51 — 58.
5. Свистунов И.А., Платонов В.В., Тряскин В.Н. Методика определения расчетных ледовых нагрузок на конструкции крупнотоннажных стоечных судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 1 (395).
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Высшая школа 1999. 576 с.
7. Романов М.П. Ледяной покров Арктического бассейна, ААНИМ, Ленинград, 1991.
8. Правила классификации и постройки морских судов. — ч. II. Корпус.— Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2020.
9. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. — СПб, Российский морской регистр судоходства, 2014.
10. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации //Спб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016, 288 с.

## REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. — Part I. Classification — Russian Maritime Register of Shipping. — St. Petersburg., 2020.
2. Goldstein R.V., Osipenko N.M. *Mekhanika razrusheniya i problemy osvoeniya Arktiki* [Mechanics of destruction and problems of Arctic development]. Arctic: Ecology and Economy, 2015, no. 4 (20), pp. 14 — 27.
3. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Timofeyev O.Ya. *Reglamentatsiya ledovykh nagruzok na vertikalny bort pri szhatiyakh vo ldakh* [Ice load assignment for vertical side under ice compression]// RS Research Bulletin. 2008. No. 31. pp. 129 — 146.
4. Svistunov I.A., Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Imitatsionnoe modelirovanie ledovykh nagruzok pri ledovykh szhatiyakh na primere nauchno-ekspeditsionnogo sudna "Akademik Tryoshnikov"* [Simulation of ice compression loads. Case study: Akademik Tryoshnikov research vessel]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 2(392): pp. 51 — 58.
5. Svistunov I.A., Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Metodika opredeleniya raschetnykh ledovykh nagruzok na konstruksii krupnotonnazhnykh stoechnykh sudov* [Simulation of ice loads on vertical board of a large tonnage ship while ice compressions] Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 1(395).
6. Wentzel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory] — M.: Higher school. 1999. 576 p.
7. Romanov M.P. *Ledyanoy pokrov Arkticheskogo basseyna* [The ice cover of the Arctic basin] AARI, Leningrad, 1991.
8. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships.— Part II. Hull — Russian Maritime Register of Shipping. — St. Petersburg, 2020. (In Russian)
9. Rules for Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms. Russian Maritime Register of Shipping. — St. Petersburg, 2014.
10. Appolonov E.M. *Ledovaya prochnost sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoy arkticheskoy navigatsii* [Ice strength of ships for all-year-round Arctic navigation] St. Petersburg State Marine Technical University, 2016, 288 p.

УДК 621.74:624.012

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА КОРПУС СУДНА

**С.О. Климов**, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: liminid@mail.ru

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

**Н.И. Восковщук**, канд. техн. наук, профессор, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: nvoskov@mail.ru

**В.О. Бессонова**, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: bessonchik99@gmail.com

Определение внешних сил, действующих на корпус судна в условиях реального морского волнения, является одной из основных проблем строительной механики корабля. Непосредственное измерение внешних сил, действующих на корпус судна, является задачей практически невыполнимой. Для этого необходимо знать закон распределения давлений воды по поверхности всей погруженной части корпуса в любой момент времени, что технически невозможно. Практически внешние нагрузки измеряют опосредованно путем измерения и анализа деформаций, которые возникают в судовых конструкциях при их действии. При движении судна на волнении в корпусных конструкциях в общем случае возникают деформации, вызванные одновременным действием целого ряда внешних сил, и одной из задач является их разделение на составляющие. Для судов с широким раскрытием палубы одной из основных проблем прочности является кручение корпуса. В статье приведено обоснование устройства и способа измерения крутящего момента, действующего на корпус судна, с минимальными погрешностями, обусловленными влиянием других силовых воздействий.

*Ключевые слова:* кручение корпуса судна, измерение крутящего момента, устройство и способ измерения крутящих моментов

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TORQUE ACTING ON A SHIP'S HULL

**S.O. Klimov**, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: liminid@mail.ru

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

**N.I. Voskovschuk**, PhD, professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: nvoskov@mail.ru

**V.O. Bessonova**, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: bessonchik99@gmail.com

Determination of external forces acting on a ship's hull in conditions of real sea roughness is one of the main problems of the ship's structural mechanics. Direct measurement of external forces acting on the ship's hull is almost impossible. To do this, it is necessary to know the law of water pressure distribution over the surface of the entire submerged part of the hull at any time, which is technically impossible. In practice, external loads are measured indirectly by measuring and analyzing the deformations that arise in ship structures during their action. In the general case, when a ship moves on waves, deformations occur in hull structures caused by the simultaneous action of a number of external forces, and one of the tasks is to separate them into components. For vessels with wide deck openings, hull torsion is one of the main strength issues. The article provides a substantiation of the device and method for measuring the torque acting on the ship's hull, with minimal errors due to the impact of other force effects.

*Keywords:* torsion of the ship's hull, torque measurement, device and method for measuring torque

## ВВЕДЕНИЕ

Определение внешних сил, действующих на корпус судна в условиях реального морского волнения, является одной из основных задач строительной механики корабля.

Для судов с широким раскрытием палубы, например контейнеровозов, одна из проблем прочности связана с кручением корпуса. Корпус в этом случае представляет собой практически открытый профиль, и его сопротивление скручиванию на порядок отличается от жесткости корпуса аналогичных размеров без палубных вырезов, например, танкера, который является закрытым профилем. В этом случае — при значительном скручивании — кроме обеспечения прочности самого корпуса существуют проблемы обеспечения герметичности люковых закрытий и их прочности.

При движении на волнении общая деформация корпуса судна может быть представлена шестью формами деформаций, которые обусловлены шестью внутренними силами в поперечных сечениях корпуса судна (см. рис. 1):

- продольная (нормальная) сила  $N$ ;
- перерезывающая (поперечная) сила в вертикальной плоскости  $Q_{ВП}$ ;
- перерезывающая (поперечная) сила в горизонтальной плоскости  $Q_{ГП}$ ;
- изгибающий момент в вертикальной плоскости  $M_{ИВП}$ ;
- изгибающий момент в горизонтальной плоскости  $M_{ИГП}$ ;
- крутящий момент  $M_K$ .

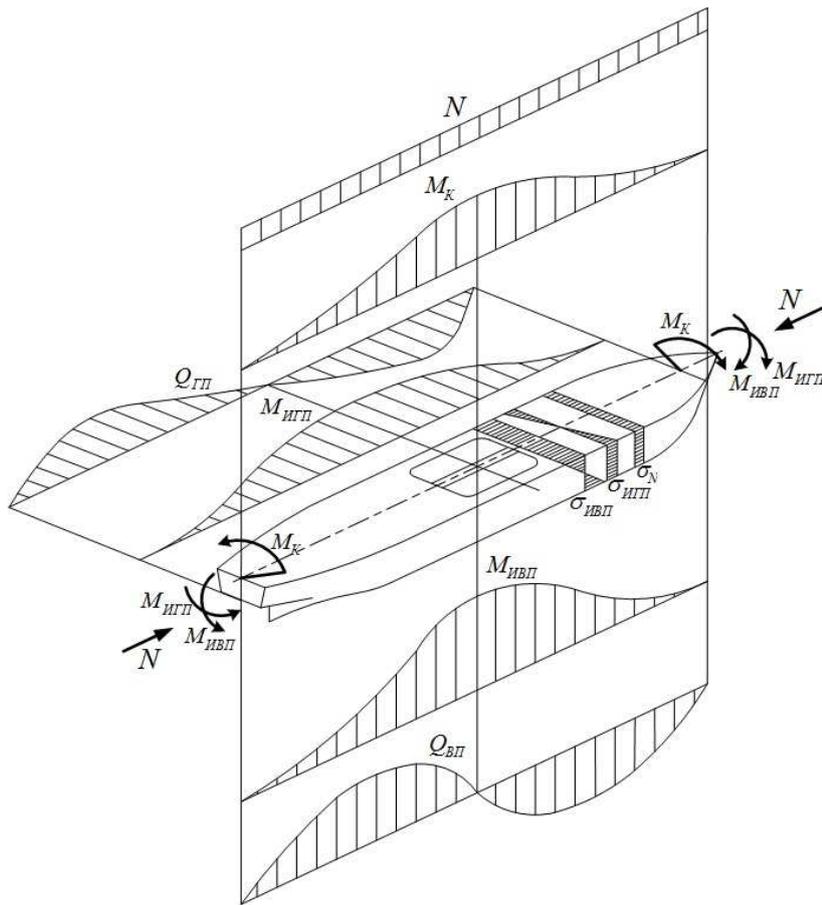


Рис. 1 Характер изменения внутренних сил, действующих в поперечных сечениях корпуса судна, по его длине

Наряду с общими деформациями корпуса в целом, вызванными этими силами, отдельные конструкции корпуса испытывают местные деформации, являющиеся следствием, как общих деформаций корпуса, так и местных силовых воздействий со стороны моря. К ним относятся:

симметричный изгиб палубных стрингеров в своей плоскости при общем изгибе корпуса судна в вертикальной плоскости. При перегибе палубные стрингеры в силу внецентренности приложения растягивающей силы симметрично прогибаются в горизонтальной плоскости в сторону ДП, а при прогибе корпуса происходит обратный эффект: палубные стрингеры сжаты и выгибаются наружу;

при общем изгибе корпуса в горизонтальной плоскости один палубный стрингер оказывается растянут, а другой — сжат. При этом первый прогибается в сторону ДП, а второй наружу, т.е. происходит несимметричный изгиб палубных стрингеров в своей плоскости;

при прохождении профиля волны вдоль борта или при ударе волны в борт происходит прогиб бортового перекрытия и сопряженного с ним палубного стрингера в сторону ДП. Поскольку такого рода воздействия на разные борта никак не синхронизированы и носят случайный характер, такой же характер имеют

деформации, которые инициируются этими силами в корпусных конструкциях и, в частности, в настиле палубы.

Непосредственное измерение внешних сил, действующих на корпус судна в условиях нерегулярного морского волнения, является задачей практически невыполнимой. Для этого кроме прочего необходимо знать закон распределения давлений воды по поверхности всей погруженной части корпуса в любой момент времени, что технически невозможно.

Практически внешние нагрузки измеряют опосредованно путем измерения и анализа деформаций, которые возникают в судовых конструкциях при их действии.

## **ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВНЕШНИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОРПУС СУДНА ПРИ ПЛАВАНИИ НА ВОЛНЕНИИ**

Внешние силы, действующие на корпус судна в условиях реального морского волнения, наиболее адекватно отражаются деформациями элементов палубного перекрытия. На палубе в определенных местах устанавливаются датчики деформаций, например тензорезисторы. Очевидно, что датчики деформаций фиксируют суммарные деформации, вызываемые всеми составляющими внешних сил, и одной из основных задач при проведении натурных экспериментов является разделение суммарных деформаций на составляющие, обусловленные отдельными составляющими внешних сил.

В работе [1] представлен способ определения внешних сил, используемый при испытаниях судов в условиях нерегулярного морского волнения.

Измерения напряжений в связях корпуса синхронно с измерениями параметров волнения, параметров качки судна, ускорений и давлений выполнялись на различных режимах движения. Выделение из суммарных деформаций их составляющих, соответствующих принятым формам (см. рис. 1), достигается путем применения специальных схем включения тензодатчиков и преобразований суммарного сигнала.

Разделение суммарных деформаций на симметричную и несимметричную группы достигается простым схемным решением: включением двух симметрично относительно ДП расположенных датчиков в одно или разные плечи тензометрического полумоста. Дальнейшее разделение деформаций, сопряженное с рядом математических сложностей, осуществляется с помощью специальных программ для аналоговых и цифровых ЭВМ.

Недостаток описанного способа заключается в том, что разделение группы несимметричных составляющих общей деформации, в частности крутящего момента, сопряжено с трудоемкой математической обработкой результатов измерений. При этом есть компоненты, которые не относятся ни к группе симметричных, ни к группе несимметричных составляющих, т.е. ни первая, ни вторая схемы соединения тензодатчиков не позволяют отфильтровать или выделить составляющую общей деформации палубного стрингера, обусловленную описанным выше местным воздействием волны на борт судна (см. пункт 3 перечня местных деформаций).

## **УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОРПУС СУДНА**

Разработаны устройство и способ измерения крутящего момента [2], действующего на корпус судна в условиях реального морского волнения, с минимальными погрешностями, обусловленными влиянием других силовых воздействий.

Устройство представляет собой балку, устанавливаемую в просвет люка вдоль диаметральной плоскости (см. рис. 2). Обе главные оси поперечного сечения балки являются осями симметрии (пример двутавровый профиль). При этом продольная горизонтальная плоскость симметрии балки располагается в плоскости палубного настила, а концы балки жестко закрепляются на корпусной конструкции. Вблизи от опорных сечений балки симметрично относительно ДП в горизонтальной плоскости симметрии балки в продольном направлении установлены датчики для измерения деформаций.

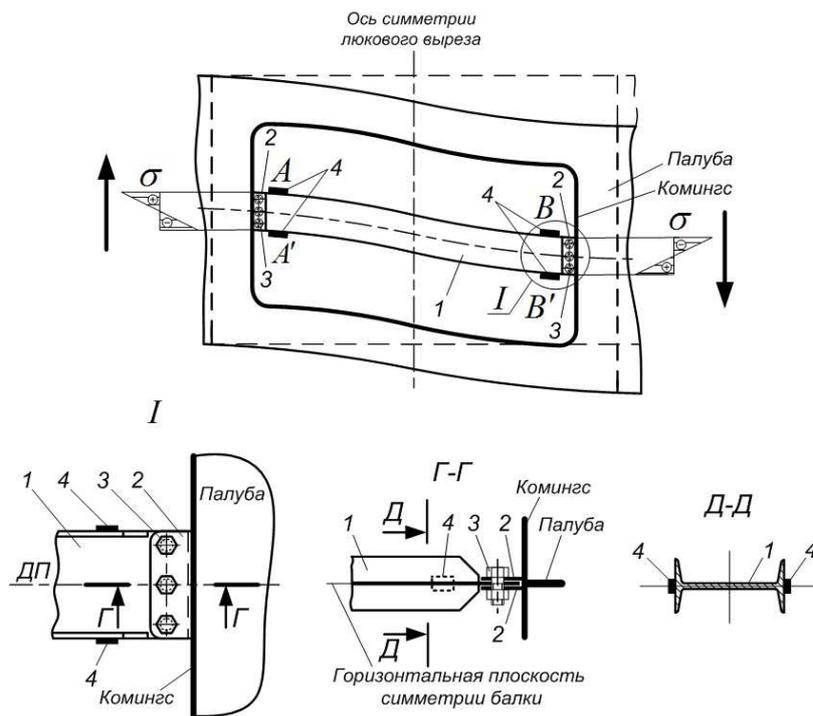


Рис. 2 Конструкция устройства для измерения крутящего момента:  
 1 — измерительная балка; 2 — планки для жесткого крепления балки к корпусной конструкции; 3 — призонные болты;  
 4 — датчики для измерения деформаций (например, тензометрические)

Тензометрические датчики включены в тензометрический мост в соответствии со схемой, показанной на рис. 3.

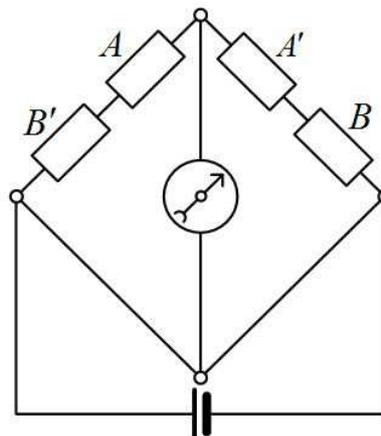


Рис. 3 Схема соединения датчиков при измерении деформаций, обусловленных скручиванием корпуса

При движении судна на волнении в корпусных конструкциях в районе палубы в общем случае возникают деформации, вызванные всеми описанными выше силовыми воздействиями. Конструкция измерительного устройства, его расположение в составе корпусных конструкций, расположение датчиков деформаций и схема их соединения обеспечивают следующие эффекты:

- деформации симметричной группы, вызванные продольной силой  $N$  и изгибающим моментом в вертикальной плоскости  $M_{ИВП}$ , компенсируются попарным включением датчиков в рабочее и компенсационное плечи моста;

- в силу симметрии поперечного сечения измерительной балки и конструкции ее крепления и, как результат, отсутствия внецентренности приложения продольной нагрузки балка не испытывает изгиба в своей горизонтальной плоскости, характерного для палубных стрингеров, т.е. отсутствуют обусловленные этим изгибом деформации;

- изгибающий момент в горизонтальной плоскости  $M_{ИГП}$  не вызывает деформаций измерительной балки, расположенной в ДП, т.к. ДП при этом изгибе является нейтральной плоскостью;

- деформации от изгиба измерительной балки в вертикальной плоскости, обусловленного сдвигом ее опорных сечений при действии перерезывающей силы в вертикальной плоскости  $Q_{ВП}$ , на ее собственной нейтральной плоскости, где расположены датчики деформаций, равны нулю;

- деформации от изгиба измерительной балки в горизонтальной плоскости, обусловленного сдвигом ее опорных сечений при действии перерезывающей силы в горизонтальной плоскости  $Q_{ГП}$ , строго говоря, будут иметь место и будут фиксироваться датчиками деформаций. При этом следует иметь в виду, что, во-первых, сдвиговые деформации даже в районе максимума перерезывающей силы  $Q_{ГП}$  пренебрежимо малы; во-вторых, в районе миделя, где установлена измерительная балка, перерезывающая сила близка к нулю, т.е. в итоге влияние  $Q_{ГП}$  на точность измерений будет находиться в пределах погрешностей;

- что касается случайных местных локальных нагрузок на бортовое перекрытие и обусловленных ими деформаций борта и сопряженного с ним палубного стрингера, то эти нагрузки никак не влияют на деформации установленной в ДП измерительной балки;

- таким образом, практически единственной деформацией измерительной балки, которая фиксируется установленными на ней датчиками, будет деформация от ее изгиба в горизонтальной плоскости вследствие сдвига опорных сечений, обусловленного сдвиговой деформацией палубного перекрытия в результате действия крутящего момента.

На крупных контейнеровозах при очень широкой палубе по причине, связанной с прочностью люковых крышек, люки по ширине делят на две части продольной межлюковой перемычкой, расположенной в ДП (см. рис. 4).

Такая межлюковая перемычка имеет конструкцию симметричную относительно ДП и, следовательно, может быть использована в качестве измерительной балки для измерения крутящего момента.

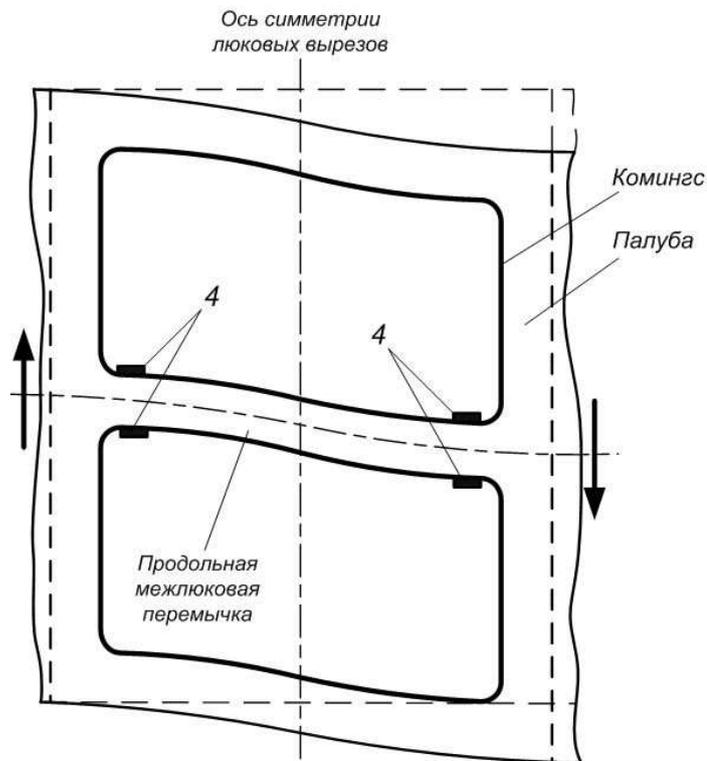


Рис. 4 Продольная межлюковая перемычка с установленными на ней датчиками для измерения крутящего момента

Предлагаемый способ измерения крутящих моментов реализуется в следующей последовательности.

1. В люковом просвете в ДП устанавливается измерительная балка с установленными на ней датчиками деформаций, которые попарно включены в измерительную и компенсационную диагонали измерительного моста.

2. Асимметричной балластировкой на тихой воде в корпусе создаются наперед заданные крутящие моменты (см. рис. 5) и производится калибровка измерительного устройства, т.е. устанавливается зависимость  $M_k = f(\epsilon)$  между крутящим моментом  $M_k$  и фиксируемым измерительным прибором параметром деформации  $\epsilon$ .

3. При движении судна на волнении производится запись процесса изменения деформаций измерительной балки в зависимости от режимов движения, параметров волнения и т.п.

4. С использованием калибровочной характеристики определяются соответствующие крутящие моменты.

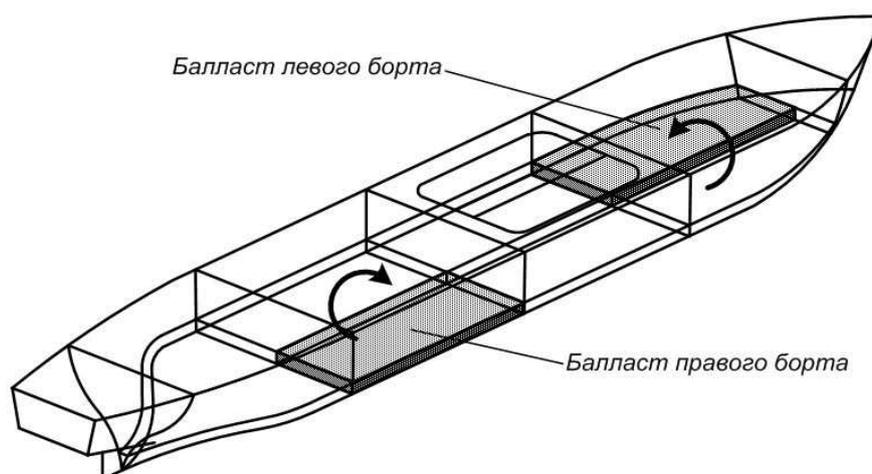


Рис. 5 Создание заданного крутящего момента асимметричной балластировкой

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан способ измерения крутящего момента, действующего на корпус судна при его движении на волнении, и представлено устройство для его реализации.

Федеральной службой по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) описанный способ измерения крутящего момента признан изобретением и принято решение о выдаче патента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кандель Ф.Г., Галахов И.Н., Раскин Ю.Н., Фридлянский А.З. Прочность судов смешанного плавания. — Л., Судостроение, 1974.
2. Способ определения крутящего момента судна в условиях волнения. Патент на изобретение № 2734838 / А.П. Аносов, Н.И. Восковчук, С.О. Климов, В.О. Бессонова. — БИ № 30, 23.10.2020.

## REFERENCES

1. Kandel F.G., Galahov I.N., Raskin Y.N., Fridlyanskiy A.Z. *Prochnost sudov smeshannogo plavaniya* [Strength of ships of river-sea navigation]. — L., Sudostroenie, 1974.
2. *Sposob opredeleniya krutyashego momenta sudna v usloviyakh volneniya* [Method for determination of ship torque in rough conditions]. Patent of invention №2734838 / A.P. Anosov, N.I. Voskovschuk, S.O. Klimov, V.O. Bessonova. — Bull No. 30, 23.10.2020.



## МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

---

УДК 621.375.826

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ РАЗМЕРЫ ЗОНЫ УПРОЧНЕНИЯ СЕРЫХ ЧУГУНОВ

**И.И. Кулешов**, Представительство Российского морского регистра судоходства в Республике Корея, Кодже,  
e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org

**Е.П. Патенкова**, канд. техн. наук., Морской государственный университет (МГУ)  
им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, e-mail: Patenkova@msun.ru

В настоящее время получили распространение различные способы изменения свойств поверхности деталей судовых технических средств с помощью лазерной обработки, которая, в отличие от традиционных способов обработки, позволяет создавать в поверхностных слоях структуры, обладающие качественно новым комплексом свойств, ведущих к повышению эксплуатационных свойств деталей судовых технических средств, в частности, износостойкости. Требуемые глубину, твердость, отсутствие дефектов в зоне лазерного воздействия и шероховатость упрочненной поверхности возможно получить варьированием плотности мощности и скорости обработки. В работе рассмотрено влияние метода лазерного упрочнения с оплавлением поверхности на изменение структуры и глубины зоны лазерного воздействия применительно к серым перлитным чугунам в зависимости от химического состава.

*Ключевые слова: лазерная обработка, серый чугун, перлит, глубина зоны оплавления, технологические режимы, термоупрочнение, структура*

### INFLUENCE OF LASER TREATMENT MODE SETTINGS ON THE STRUCTURE AND DIMENSIONS OF GRAY CAST IRON HARDENED AREA

**I.I. Kuleshov**, Representative Office of Russian Maritime Register of Shipping in the Republic of Korea, Geoje,  
e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org.

**E.P. Patenkova**, PhD, Maritime State University named after G.I. Nevelskoy, Vladivostok,  
e-mail: Patenkova@msun.ru

Various methods for change of the surface properties of shipboard technical means parts by laser processing have been developed at present, making it possible, unlike with traditional methods of processing, to create structures in the surface layers that possess a qualitatively new set of properties leading to an increase in the performance properties of shipboard equipment of parts, in particular, to wear resistance. The required depth, hardness, absence of defects in the laser impact zone, and the roughness of the hardened surface can be reached by varying the power density and the processing speed. The choice of processing mode primarily depends on economic feasibility, since laser processing, of large-sized parts at low speeds, is generally a very expensive technology. The article is aimed at the consideration of the influence of the laser hardening with surface melting on change in the structure and depth of the laser impact zone with regard to gray pearlitic cast iron with various chemical composition.

*Keywords: laser treatment, gray cast iron, pearlite, melting zone depth, processing modes, thermal hardening, structure*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Значительную роль в повышении надежности деталей судовых технических средств занимает поверхностная термическая обработка.

Лазерное упрочнение является одним из методов термоупрочнения металлов, который заключается в обработке поверхности детали высококонцентрированным источником нагрева, что, в свою очередь, дает возможность локализовать участок обрабатываемой поверхности в пределах зоны лазерного воздействия. Размеры зоны лазерного воздействия являются регулируемыми параметрами, ввиду чего представляется возможным упрочнять локально поверхность без изменения структуры и свойств основного металла.

Лазерное упрочнение сопровождается высокими скоростями нагрева и охлаждения обрабатываемого материала, что также дает экономические и технологические преимущества. Данный метод позволяет получить упрочненный слой с высокими физико-механическими характеристиками, обеспечить минимальную остаточную деформацию либо полностью ее устранить в зависимости от геометрических параметров детали [1].

Лазерная обработка, в зависимости от плотности мощности, может выполняться как без оплавления упрочняемой поверхности, так и с оплавлением. Выбор способа упрочнения зависит от требуемых свойств в результате такой обработки, таких как глубина структура и механические свойства зоны упрочнения.

Например, при лазерной обработке без оплавления поверхности, шероховатость последней практически не изменяется, а также отсутствует явление коробления детали. Поэтому данный вид упрочнения можно использовать в качестве финишной операции. Однако, глубина упрочненного слоя остается сравнительно невысокой (до 0,3 мм). В свою очередь при обработке с оплавлением оптимальная глубина упрочненной зоны может достигать 1 мм. Но при таком методе упрочнения возможно появление пор, трещин, а также рост шероховатости. Для устранения этих недостатков может потребоваться дополнительная механическая обработка [2] — [6].

Применительно к лазерному упрочнению чугунных деталей стоит отметить тот факт, что преимущества лазерного упрочнения проявляются в полной мере тогда, когда обработка сопровождается оплавлением рабочей поверхности и происходит ее отбел при последующем охлаждении. Поэтому актуальной является задача получения упрочненного слоя, содержащего в своей структуре ледебурит, обеспечивающий высокую износостойкость поверхности, что становится возможным при лазерной обработке с оплавлением поверхности [1].

Важно отметить, что отличительной особенностью серого чугуна, влияющей на его механические свойства и интенсивность изнашивания, является его структура. Известно, что наилучшей структурой в отношении сопротивления износу в узлах трения является перлит с включениями графита и фосфидной эвтектики. Здесь выполняется условие принципа Шарпи, согласно которому наиболее твердые структурные составляющие должны залегать в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие — образовывать сплошную матрицу.

Для получения требуемых параметров зоны лазерного воздействия при лазерном термоупрочнении можно варьировать параметрами режима обработки, такими как плотность мощности, скорость обработки, а также диаметром луча [7] — [9].

Стоит отметить то, что, несмотря на большое количество работ, посвященных обработке серых чугунов, не всегда является возможным использовать результаты уже имеющихся исследований для решения конкретных задач из-за большого объема типов чугунов, гетерогенности их структуры, степени локальности, а также кратковременности лазерного воздействия и типа лазерной установки.

Целью настоящего исследования является установление закономерности изменения глубины зоны оплавления при одинаковых технологических режимах применительно к различным типам серого перлитного чугуна.

## 1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования исходной структуры чугуна по графиту и металлической основе выполняли в соответствии с ГОСТ 3443-87.

Лазерное упрочнение с оплавлением поверхности проводили на установке «Комета-2».

Металлографические исследования проводили на микроскопе Leica DM4000 M при увеличениях от  $\times 50$  до  $\times 1000$  раз до травления и после травления в 4 % растворе азотной кислоты в спирте.

Измерение твердости проводили на микротвердомере МНТ-10 при нагрузке 150 Н и увеличении  $\times 500$ .

Для определения химического состава исходного материала использовали сканирующий электронный микроскоп LEO EVO 50XVP.

Исследования проводили на образцах прямоугольного сечения с размерами  $10 \times 10 \times 30$  мм из серого перлитного чугуна марки СЧ30 (ГОСТ 1412-85). В результате анализа химического состава образцы были условно разделены на 3 группы:

*Группа 1:*  $C = 3,63 \%$ ,  $Si = 1,02 \%$ ,  $Mn = 1,08 \%$ ,  $S = 0,08 \%$ ,  $P = 0,85 \%$ , структура серого чугуна с неравномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 120 — 250 мкм; металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 — 0,8 мкм; фосфидная эвтектика тройная зернистого строения и с пластинками цементита равномерного распределения.

*Группа 2:*  $C = 3,16 \%$ ,  $Si = 1,60 \%$ ,  $Mn = 0,80 \%$ ,  $S = 0,08 \%$ ,  $P = 0,26 \%$ , структура серого чугуна с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 120 — 250 мкм; металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 — 0,8 мкм; фосфидная эвтектика тройная зернистого строения в виде разорванной сетки, диаметр ячеек сетки до 1000 мкм;

*Группа 3:*  $C = 3,21 \%$ ,  $Si = 1,92 \%$ ,  $Mn = 0,63 \%$ ,  $S = 0,22 \%$ ,  $P = 0,19 \%$ , структура серого чугуна с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 250 — 500 мкм; металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве от 90 % с межпластинчатым расстоянием до 0,3 мкм; площадь занятая цементитом ледебурита 5 — 15 мкм<sup>2</sup>, площадь наибольшего включения цементита ледебурита 10000 — 16000 мкм<sup>2</sup>.

При проведении эксперимента в качестве независимых факторов, влияющих на параметр оптимизации (глубину зоны оплавления) были выбраны: плотность мощности ( $Q$ ), скорость перемещения луча ( $v$ ), диаметр луча ( $d$ ).

Интервалы изменения факторов были выбраны на основе априорной информации и предварительных исследованиях:

- мощность излучения — 1,2 кВт;
- диаметр лазерного луча — 4 мм – 6 мм;
- скорость перемещения луча — 5 – 40 мм/с;
- плотность мощности (при Гауссовом распределении) — 190 – 430 Вт/мм<sup>2</sup>.

Выбранные уровни факторов и интервалы их варьирования приведены в табл. 1

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		+1	0	1	
Плотность мощности $Q$ , Вт/мм <sup>2</sup>	$x_1$	430	310	190	120
Скорость перемещения лазерного луча $v$ , мм/с	$x_2$	40	22,5	5	17,5
Диаметр луча $d$ , мм	$x_3$	6	5	4	1

Матрица планирования полного факторного эксперимента  $2^3$  и результаты его проведения приведены в табл. 2. Эксперимент проводили при равномерном дублировании опытов.

Таблица 2

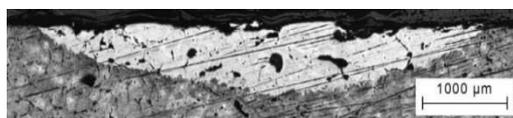
**Результаты измерения глубины зоны оплавления**

Номер опыта	Матрица планирования			Группы исследуемых чугунов		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	1	2	3
				Глубина оплавления, мкм		
			$У_{1ср}$	$У_{2ср}$	$У_{3ср}$	
1	+	+	+	191	240,5	174
2	-	+	+	215,5	268	191,5
3	+	-	+	228,5	287	246,5
4	-	-	+	254,5	321,5	257,5
5	+	+	-	261,5	371,5	254
6	-	+	-	290,5	409	291,5
7	+	-	-	311	449	325
8	-	-	-	370	472,5	352,5

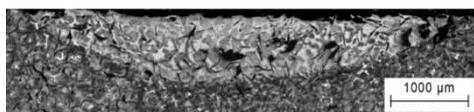
**2. РЕЗУЛЬТАТЫ**

На режимах, приведенных в табл. 1, применительно к чугунам рассматриваемых в данной работе групп, выполнялась лазерная обработка с оплавлением поверхности.

Общий вид зон лазерного воздействия представлен на рис. 1. Геометрические параметры зон лазерного воздействия приведены в табл. 3.



a)  $v = 40$  мм/с,  $d = 4$  мм



б)  $v = 5$  мм/с,  $d = 6$  мм



в)  $v = 20$  мм/с,  $d = 4$  мм

Рис. 1 Общий вид зон лазерного воздействия чугуна типа 1 (а), типа 2 (б), типа 3 (в),  $\times 50$

Геометрические параметры зоны лазерного воздействия (см. рис. 1) приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Геометрические параметры зоны лазерного воздействия**

Группа чугуна	Ширина зоны лазерного воздействия $L_{злв}$ , мкм	Глубина зоны лазерного воздействия $h_{злв}$ , мкм	Ширина зоны оплавления $L_{опл}$ , мкм	Глубина зоны оплавления $h_{опл}$ , мкм
1	4093,8	612,5	2625,0	200,0
2	6368,8	906,3	5456,3	243,8
3	4318,8	812,5	2865,3	213,3

Сравнительные результаты исследования микротвердости до лазерной обработки (Исх) и зоны термического воздействия после лазерной обработки (ЛЮ) приведены в табл. 4.

При лазерном упрочнении деталей из серого перлитного чугуна в месте обработки формируется зона термического влияния (ЗТВ), которая характеризуется наличием в структуре мартенсита, остаточного аустенита, графита и фосфидной эвтектики, а также зона оплавления (ЗО) в которой формируется структура,

состоящая из мелких дендритов аустенита, выросших при кристаллизации расплавленного металла и окруженных дисперсным ледебуритом. Графит при этом растворяется в расплаве. Главные оси дендритов ориентированы в сторону отвода тепла, т.е. к кромке дорожки оплавления [2], [10], [11].

Структуры зон лазерного воздействия для различных групп исследуемых серых чугунов приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Сравнительные результаты исследования

Параметр	Состояние материала					
	Группа 1		Группа 2		Группа 3	
	Исх	ЛО	Исх	ЛО	Исх	ЛО
Микротвердость металлической основы (средняя), HV	300	574	400	706	334	756
Строение фосфидной эвтектики	ТЗСПЦ	Т <sub>мз</sub>	ТЗС	Ф + Fe <sub>3</sub> P + Ц	Т <sub>и</sub> + Т <sub>пц</sub>	Л + М + А <sub>ост</sub>
Микротвердость фосфидной эвтектики, HV	560	734	815	873	708	852
Глубина зоны термического влияния, мкм	–	612,5	–	906,3	–	812,5
Глубина зоны оплавления, мкм	–	200,0	–	243,8	–	213,3

Л — ледебурит; М — мартенсит; А<sub>ост</sub> — аустенит остаточный; Т<sub>и</sub> — тройная игольчатая; Т<sub>пц</sub> — тройная с пластинками цементита; ТЗС — тройная зернистого строения в виде разорванной сетки; Т<sub>мз</sub> — тройная мелкозернистая; ТЗСПЦ — тройная зернистого строения с пластинками цементита равномерного распределения.

В процессе лазерной обработки доэвтектического серого перлитного чугуна в зоне термического влияния вначале происходит превращение перлита в аустенит и превращения перлитно-графитовой составляющей чугуна, связанные с эффектом контактного плавления или растворения графита в аустените. Так же имеют место подплавления в местах залегания фосфидной эвтектики. Структуры фосфидной эвтектики и микротвердость приведены в табл. 4.

Неоднородность ЗО обусловлена кратковременностью лазерного воздействия, не позволяющего получить однородный по составу (прежде всего по углероду) жидкий раствор в расплавленном объеме. Этому способствует и одновременное расплавление участков гетерогенной структуры. Графит обладает большой теплопроводностью, особенно в нагретом состоянии, кроме того, графит — практически абсолютно черное тело, что способствует поглощению лазерного излучения. Тепло легко проникает по пластинкам графита и вызывает расплавление металлической основы вокруг пластинок графита (эффект контактного плавления). Расплавление металлической основы эвтектоидного состава запаздывает, а кристаллизация ее начинается раньше. Главным фактором, определяющим конечную структуру этого слоя, является количество растворенного графита за время оплавления [10] и [12].

Отличительной особенностью строения зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) чугунов является неровная линия плавления между ЗО и ЗТВ, что обусловлено эффектом контактного плавления. Вследствие разных размеров графитных включений расплавленные объемы в разной степени насыщаются углеродом, что приводит к формированию различных структур после затвердевания: ледебурита, ледебурита с ячейками аустенита, мартенсита, мартенсита и остаточного аустенита (в зоне оплавления). Высокая скорость нагрева вызывает значительный перегрев, а высокая скорость охлаждения приводит к разной степени насыщения матрицы углеродом из включений графита. В результате нагрева этой зоны выше критической точки Ас1 (температур порядка 1147 °С) перлитная основа превращается в аустенит, а потом происходит ее быстрое охлаждение.

Степень переохлаждения аустенита определяет механизм и кинетику превращения, а, следовательно, и структуру продуктов превращения [2], [13]. Насыщение расплава из полурасплавленной частицы графита при последующем охлаждении приводит к образованию области со структурой белого чугуна. По мере удаления от включений графита происходит уменьшение микротвердости за счет уменьшения диффузии углерода в металлическую основу и уменьшения его содержания в кристаллической решетке мартенсита. В участках с температурой, меньшей эвтектической, происходит лишь диффузия углерода из графита в аустенит и образование после охлаждения двухслойных — мартенситной и аустенитной — оторочек, толщина которых уменьшается с увеличением глубины залегания графита вплоть до полного исчезновения [14] — [17].

Обработку результатов эксперимента проводили по методике в случае равномерного дублирования опытов. Для каждой группы чугунов рассчитывали построчные дисперсии и проверяли однородность дисперсий по критерию Кохрена. Поскольку выполнялось условие  $G_{\text{табл}} = 0,6798 > G_{\text{расч}} = 0,228; 0,249; 0,479$ , то ряды дисперсий считались однородными.

Расчет коэффициентов регрессии для чугунов групп 1 и 2 показал, что во всех случаях величина доверительного интервала коэффициентов регрессии, характеризующих совместное взаимодействие  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{123}$ , а для чугуна типа 3 коэффициентов  $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$  менее доверительного интервала, следовательно, они не имеют значимости.

Таким образом, для определения глубины зоны оплавления, применительно к исследуемым группам чугунов, были получены следующие уравнения регрессии в кодированном виде:

для чугунов группы 1:

$$y = 265,3 - 17,3x_1 - 25,7x_2 - 42,9x_3 + 6,6x_2x_3; \tag{1}$$

для чугунов группы 2:

$$y = 352,4 - 15,4x_1 - 30,1x_2 - 73,1x_3 + 5,1x_2x_3; \tag{2}$$

для чугунов группы 3:

$$y = 351,4 - 15,4x_1 - 30,1x_2 - 73,1x_3 + 5,1x_1x_3. \tag{3}$$

Адекватность моделей проверяли по критерию Фишера. При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  табличное значение критерия Фишера  $F_{\text{табл}} = 3,84$ . Поскольку  $F_{\text{табл}} = 3,84 > F_{\text{рас}} = 2,026; 0,623; 0,479$ , то принята гипотеза об адекватности моделей.

В результате перехода от кодированных значений к натуральным, используя формулу перехода:

$$x_1 = (Q - 310)/120; x_2 = (v - 22,5)/17,5; x_3 = (d - 5)/1,$$

глубину зоны оплавления в исследуемом диапазоне режимов лазерной обработки можно определить следующим образом:

для чугунов группы 1:

$$h_{\text{опл}} = 599,95 - 0,14Q - 3,34v - 51,38d + 0,38vd; \tag{4}$$

для чугунов группы 2:

$$h_{\text{опл}} = 829,40 - 0,13Q - 3,19v - 79,71d + 0,29vd; \tag{5}$$

для чугунов группы 3:

$$h_{\text{опл}} = 615,11 - 0,29Q - 1,93v - 55,98d + 0,04Qd. \tag{6}$$

График зависимости глубины оплавления при лазерной обработке от диаметра и скорости перемещения луча при фиксированном значении плотности мощности ( $310 \text{ Вт/мм}^2$ ) в виде линий одного уровня для исследуемых чугунов приведен на рис. 2.

Полученные выражения (4 — 6) позволяют с точностью величины ошибки определить прогнозируемую глубину оплавления при лазерной обработке в заданном диапазоне параметров для серых перлитных чугунов в рассматриваемых зонах варьирования химического состава.

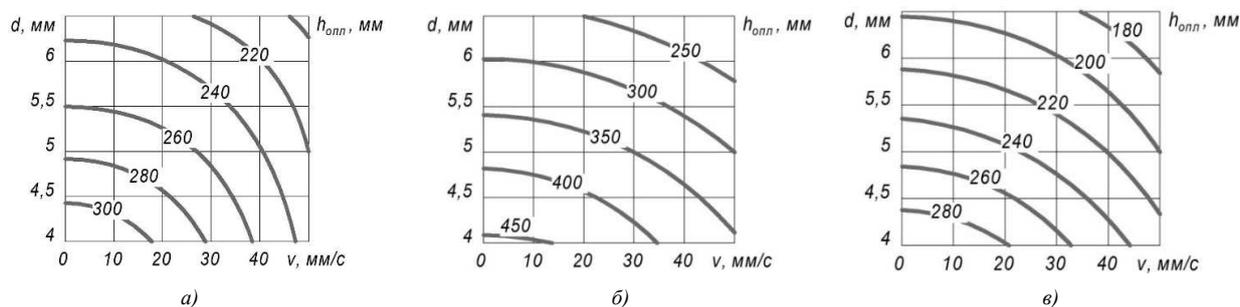


Рис. 2 Зависимость глубины оплавления ( $h_{\text{опл}}$ , мкм) от скорости перемещения луча ( $v$ , мм/с) и диаметра луча ( $d$ , мм) для чугунов группы 1 (а), группы 2 (б), группы 3 (в)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытным путем определено, что исходная структура и химический состав материала деталей влияют на глубину и свойства зоны лазерного воздействия при упрочнении с оплавлением. Так, серые перлитные чугуны, определенные в работе как тип 2, в процессе обработки приобретают большую глубину зоны оплавления, чем чугуны типов 1 и 3. При этом разница между глубиной зоны оплавления чугунов типов 1 и 3 хоть и имеется, но является незначительной. Данный факт объясняется различным содержанием графита в структуре металла, а также особенностями металлической структуры и фосфидной эвтектики.

В результате факторного эксперимента построены регрессионные зависимости, связывающие глубину зоны оплавления с параметрами технологического процесса лазерного упрочнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходаковский В.М., Патенкова Е.П., Куринная А.В., Толмачев А.А. Структурообразование поверхностного слоя серых чугунов при лазерном упрочнении с оплавлением поверхности//Вестник морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского. Сер. Судостроение и судоремонт. — Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2006. — Вып. 12/2006. — с. 25 — 34.
2. Кулешов И.И., Ходаковский В. М. Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей//Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2016. — №6 (40). — с. 155 — 168.
3. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение эффективности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых энергетических установок//Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — с. 814 — 828.
4. Ходаковский В.М., Патенкова Е.П., Кулешов И.И. Исследование влияния режима лазерной обработки на глубину и структуру упрочненной зоны чугунных деталей судовых ДВС//Вестник морского государственного университета. Сер. Судостроение и судоремонт. — Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2016. — Вып. 74/2016. — с. 28 — 36.
5. Матвеев Ю. И., Казаков С. С. Формирование структур серого чугуна в зоне лазерного воздействия // Вестник НГИЭИ №1 (2) том 2. — 2011. — 41 — 53 с.
6. Матвеев Ю. И., Казаков С. С. Особенности лазерной обработки поршневых колец судовых среднеоборотных дизелей // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. №2. — 2010. с. 34 — 38
7. Chena Y., Gana C.H., Wanga L.X., Yua G., Kaplan A. Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd: YAG laser beam with two-dimensional array distribution//Applied Surface Science. — 2005. — No 245. — pp. 316 — 321.
8. Deore Hemant, Rathod M.J., Dr, Hiwarkar V.D., Dr. Influence of Laser Surface Hardening on Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron//International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering. — 2017. — Volume 5 (6). — pp. 1126 — 1132.
9. Soriano C., Leunda J., Lambarri J., Garcia Navas V., Sanz C. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades//Applied Surface Science. — 2011. — No. 257. — pp. 7101 — 7106.
10. Крапошин В.С. Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после по-верхностного оплавления // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1994, №2. — с. 2 — 5.
11. Чугун / Под ред А.Д. Шермана, А.А. Жукова. — М. : Металлургия, 1991. — 576 с.
12. Свойства конструкционных материалов на основе углерода / Под ред. В.П. Соседова. — М.: Металлургия, 1975. — 336 с.
13. Металловедение / Б.И. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. /Под ред. Б.И. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
14. Сафонов А.Н. Особенности лазерной закалки поверхности графитизированных сталей и чугунов // Вестник машиностроения. — 1999, № 4. — с. 22 — 26.
15. Григорьянц А.Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. — М.: Высшая школа, 1988. — 161 с.
16. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1989. — 302 с.
17. Григорьянц А.Г., Сафонов А. Н. Методы поверхностной лазерной обработки. — М. : Высш. шк., 1987. — 191 с.

## REFERENCES

1. Khodakovskiy V.M., Patenkova E.P., Kurinnaya A.V., Tolmachev A.A. *Strukturoobrazovanie poverhnostnogo sloya seryh chugunov pri lasernom uprochnenii s oplavleniem poverkhnosti* [Shaping of surface of gray cast irons during laser hardening with surface melting]//Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta im. adm. G.I. Nevel'skogo. Ser. Sudostroyeniye i sudoremont. — Vladivostok : Mor. gos. un-t. 2006. — Вып. 12.2006. — pp. 25 — 34.
2. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. *Povysheniye rabotosposobnosti porshneykh kanavok golovok porshney sudovykh malooborotnykh dvigateley* [Improving the operability of the piston's crowns rings grooves of low-speed propulsion marine diesel engines] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 6(40) (2016): pp. 155 — 168. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-155-168.

3. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. *Povysheniye effektivnosti lazernogo uprochneniya chugunnykh detaley sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Improvement efficiency of laser hardening of iron details of ship's power plants]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova 9.4 (2017): pp. 814 — 828. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-814-828.
4. Khodakovskiy V.M., Patenkova E.P., Kuleshov, I.I. *Issledovanie vliyaniya rezhima lazernoy obrabotki na glubinu i strukturu uprochnyonnoy zony chugunnykh detaley sudovykh DVS* [Research on the influence of laser treatment mode on the depth and structure of strengthened area of cast iron details of ship's diesel engines] Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta, (74), 2016, pp. 28 — 36.
5. Matveev, Yu.I., Kazakov S.S. *Formirovaniye struktur serogo chuguna v zone lazernogo vozdeystviya* [Shaping of gray cast iron structures in the area of laser treatment] Vestnik NGIEHI, 2(1 (2)), 2011.
6. Matveev Yu.I., Kazakov S.S. *Osobennosti lazernoy obrabotki porshnevnykh kolets sudovykh sredneoborotnykh dizeley* [On laser treatment of piston rings of medium-speed ship's diesel engines] Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya 2 (2010).
7. Chena Y., Gana C.H., Wanga L.X., Yua G., Kaplan A. Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd: YAG laser beam with two-dimensional array distribution. Applied Surface Science. — 2005. — No. 245. — pp. 316 — 321.
8. Deore Hemant, Rathod M.J., Dr., Hiwarkar V.D., Dr. Influence of Laser Surface Hardening on Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron. International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering. — 2017. — Volume 5 (6). — pp. 1126 — 1132.
9. Soriano C., Leunda J., Lambarri J., Garcia Navas V., Sanz C., Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. Applied Surface Science. — 2011. — No. 257. — pp. 7101 — 7106.
10. Kraposhin V.S. *Vliyaniye ostatochnogo austenita na svoystva staley i chugunov posle poverhnostnogo oplavleniya* [Influence of residual austenite on the properties of steels and cast irons after surface melting]//Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. (2), 2.
11. *Chugun* [Cast Iron]: Reference book ed. AD Sherman, AA Zhukov. M.: Metallurgiya.—1991.— 576 p.
12. Sosedov, V.P. *Svoystva konstruktivnykh materialov na osnove ugleroda: spravochnik*. [Properties of carbon-based structural materials. Reference book] Moscow: Metallurgiya.
13. *Materialovedenie* [Materials Science] B.I. Arzamasov, I.I. Sidorin, G.F. Kosolapov et al. ed. B.I. Arzamasov. — M.: Mashinostroenie, 1986. — 384 p.
14. Safonov A.N. *Osobennosti lazernoy zakalki poverhnosti grafitizirovannykh staley i chugunov* [On laser treatment of graphitized steels and cast irons surfaces] Vestnik mashinostroeniya, (4), 22.
15. Grigoryants A.G., Safonov A.N. *Osnovy lazernogo termouprochneniya splavov* [Principles of laser thermal strengthening of alloys] M.: Vyssh. Shk., 1988.
16. Grigoryants A.G., Ivanov, P.S. *Osnovy lazernoy obrabotki materialov* [Principles of laser treatment of materials]. Uspehi nauki i tekhniki, 1989.
17. Grigoryants A.G., Safonov A.N. *Metody poverhnostnoy lazernoy obrabotki* [Methods of surface laser treatment]// M.: Vysshaya shkola, 191, 10, 1987.

## ОБОЗРЕНИЕ: РС ВНЕДРЯЕТ ТРЕБОВАНИЯ К НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) разработал требования по применению инновационной технологии сварки — трением с перемешиванием.

Соответствующее циркулярное письмо № 314-04-1585ц размещено в открытом доступе в разделе «Онлайн информация — Циркулярные письма» на официальном сайте РС. Документ вступает в силу с 21 июля 2021 года.

Технология сварки трением с перемешиванием применяется в основном при производстве конструкций и изделий из алюминия и его сплавов. Применение данного вида сварки по сравнению с классическим аргонодуговым процессом сварки имеет ряд преимуществ: позволяет повысить производственные, экономические и экологические показатели сварочного процесса, а также получить стабильные качество и механические свойства сварных соединений.

Как пояснил главный специалист отдела конструкции корпуса и судовых устройств Сергей Кордонец, в процессе такой сварки специальный инструмент поступательно движется, вращаясь, вдоль линии стыковки свариваемых листов и обеспечивает за счет трения локальный нагрев, размягчение и перемешивание материала их кромок, что создает их прочное соединение. Снижение общей трудоемкости позволяет сократить цикл изготовления деталей, отсутствие остаточных напряжений в сварном соединении обеспечивает сохранение геометрии деталей сборочных единиц. Кроме того, за счет повышения производительности и отказа от сварочных материалов (проволока, газ и пр.) возможно снизить себестоимость продукции.

Применение нового метода сегодня актуально для сварки плоских листовых заготовок при изготовлении алюминиевых емкостей контейнеров-цистерн. В дальнейшем предполагается расширить область применения этой прогрессивной технологии также на судовые конструкции, что позволит широко применять ее в судостроительном производстве.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.5

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ДЕЙДУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ

**А.А. Халявкин**, канд. техн. наук, ООО «Газпром добыча Астрахань», Астрахань,

e-mail: [sopromat112@mail.ru](mailto:sopromat112@mail.ru)

**Д.О. Шацков**, канд. физ.-мат. наук, Астраханский государственный университет (ФГБОУ ВО «АГУ»), Астрахань, e-mail: [denislli@mail.ru](mailto:denislli@mail.ru)

**В.А. Мамонтов**, д-р техн. наук, Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»), Астрахань

**А.Я. Ауслендер**, ФГБОУ ВО «АГУ», Астрахань, e-mail: [auslender.anna@mail.ru](mailto:auslender.anna@mail.ru)

В работе рассматривается судовой валопровод, основной целью которого является передача крутящего момента от двигателя к винту и восприятия осевого усилия от винта к корпусу судна. Критерием работоспособности судового валопровода является величина износа дейдвудных подшипников. При определенной величине износа повышается напряженно-деформированное состояние валопровода. В работе приведены выражения для определения нормативных значений допускаемых зазоров между гребным валом и подшипником в зависимости от их размеров и материала подшипника. Предложена методика определения коэффициента жесткости подшипника с учетом износа и упругих свойств для разных материалов подшипников. Определено влияние износа на длину контакта гребного вала с дейдвудным подшипником.

*Ключевые слова:* валопровод, дейдвудный подшипник, коэффициент жесткости, износ, зазор, ресурс, колебания, резонанс, надежность

### METHODOLOGY TO DETERMINE THE STIFFNESS COEFFICIENT OF DEADWOOD BEARINGS

**A.A. Khalyavkin**, PhD, "Gazprom dobycha Astrakhan" LLC, Astrakhan, e-mail: [sopromat112@mail.ru](mailto:sopromat112@mail.ru)

**D.O. Shatskov**, PhD, Astrakhan State University, Astrakhan, e-mail: [denislli@mail.ru](mailto:denislli@mail.ru)

**V.A. Mamontov**, DSc, Astrakhan State Technical University, Astrakhan

**A.Ya. Auslender**, Astrakhan State University, Astrakhan, e-mail: [auslender.anna@mail.ru](mailto:auslender.anna@mail.ru)

The paper considers the ship's shafting, the main purpose of which is the transmission of torque from the engine to the screw and the perception of axial force from the screw to the hull of the ship. The criterion for the efficiency of the ship's shaft line is the amount of wear of deadwood bearings. At a certain amount of wear, the stress-strain state of the shafting increases. In this paper, calculations have been used to determine the standard values of the permissible gap between the propeller shaft and the bearing, depending on their size and bearing material. The design scheme of the ship's shafting on elastic supports of the stiffness coefficient has been presented. A method for determining the bearing stiffness coefficient taking into account wear and elastic properties for different bearing materials has been proposed. The effect of wear on the contact length of the propeller shaft with the deadwood bearing has also been determined.

*Keywords:* shafting, deadwood bearing, stiffness coefficient, wear, gap, service life, vibrations, resonance, reliability

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных элементов судовой энергетической установки судна является валопровод. Он опирается на дейдвудные и промежуточные опоры. Задачей валопровода является передача крутящего момента от двигателя к движителю судна и восприятие осевого усилия от движителя к корпусу судна. Изучению напряженно-деформированного состояния с технологической, механической и конструкционной точки зрения валопровода посвящено большое количество работ. Представленная статистика дефектов и отказов в работах [3, 12], выявленных при эксплуатации и ремонте судна, указывают, что задача повышения надежности валопровода в настоящее время остается актуальной.

Одним из критериев рабочего состояния валопровода является предельный зазор между гребным валом и дейдвудным подшипником, который в процессе износа увеличивается. Предельно допустимые зазоры при эксплуатации в дейдвудных подшипниках, набранных планками из бакаута, древесных слоистых пластиков ДСП-А и ДСП-Б, древеснотекстолитового пластика Д5ТСП, лигнита, новотекса, резинометаллическими цельными и капролоновыми втулками должны соответствовать нормативным значениям, которые определяются по формулам (1), (2) и (7):

- для дейдвудных подшипников с вкладышами из неметаллических материалов при диаметре вала по облицовке  $d_{гр} \leq 600$  мм:

$$\Delta = 0,012d_{гр} + 1,8; \quad (1)$$

- для дейдвудных подшипников с вкладышами из неметаллических материалов при диаметре вала по облицовке  $d_{гр} \geq 600$  мм:

$$\Delta = 0,005d_{гр} + 6, \quad (2)$$

где  $\Delta$  — предельный допустимый зазор при эксплуатации, мм;  
 $d_{гр}$  — диаметр гребного вала (по облицовке), мм.

В работе [5] для определения допускаемых износов дейдвудных подшипников предлагается методика, которая основывается на получении номограммы допускаемых износов кормового и носового дейдвудных подшипников судна. Сама методика основывается на определении параметров нагружения валопровода ( $\Delta M_i$ ) и его опор ( $\Delta R_i$ ) и сравнение их с допускаемыми значениями, которые имеют обозначение  $[\Delta M_i]$  и  $[\Delta R_i]$  соответственно. Далее устанавливается предельный срок эксплуатации дейдвудного устройства. Определяется весь диапазон износов обеих опор в виде номограммы (см. рис. 1).

Численные значения износов могут быть определены как [5]:

$$\Delta_k = V_k T; \quad \Delta_n = V_n T, \quad (3)$$

где  $V_k, V_n$  — скорость износа кормового и носового дейдвудных подшипников;  
 $T$  — период времени.

При построении номограмм для каждого вида судна, на основе износов дейдвудных подшипников, может быть установлен безопасный период эксплуатации и определены сроки проведения доковых ремонтов.

Следует также отметить, что определение нагружения валопровода ( $\Delta M_i$ ) и его опор ( $\Delta R_i$ ) в работе [5] основываются на статистических расчетах судового валопровода.

В одной из своих работ [8] В.К. Румб для определения монтажных и допускаемых значений износов дейдвудных подшипников, ссылаясь на работу [2], рассматривает следующее выражение:

$$\Delta = 3,643 \frac{\mu n d l}{h p (1 + l/d)}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  — диаметральный зазор, мм;  
 $\mu$  — динамическая вязкость смазки, Па·с;  
 $n$  — частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>;  
 $d$  — диаметр шейки вала, м;  
 $h$  — толщина смазочного слоя, мкм;  
 $p$  — средняя удельная нагрузка в подшипнике, МПа;  
 $l$  — длина подшипника, м.

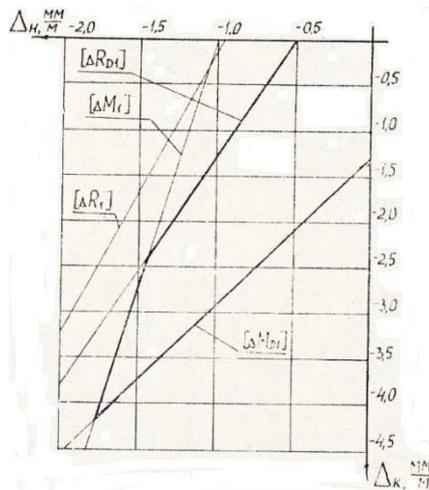


Рис. 1 Номограмма допусаемых износов дейдвудных подшипников судна «Тибия» проект 1348:  
 $\Delta_k$ ,  $\Delta_c$  — износы в кормовом и носовом дейдвудных подшипниках

Автор работы отмечает, что при заданном значении толщины смазочного слоя  $h$  вычисление зазора  $\Delta$  (4) не представляет затруднений. Сложность определения  $h$  обусловлено тем, величина  $\mu$  входящая в выражение, зависит не только от вида смазки, но и от температуры в рабочей зоне подшипника. При повышении температуры вязкость уменьшается. Выражение определения вязкости может быть представлено в виде [8]:

$$\mu = \mu_0 (T_0/T)^m, \quad (5)$$

где  $\mu_0$  — динамическая вязкость смазки, соответствующая температуре  $T_0$ ;  
 $m$  — показатель степени, причем для масел дейдвудных подшипников  $m = 2,5 \div 3,5$ .

Выражение (4) не позволяет с достаточной точностью определить монтажный и допусаемый зазор в дейдвудном подшипнике.

Из анализа работ [4, 9], связанных с исследованиями статического и динамического расчетов судового валопровода, следует, что разработчики стараются учесть упругие и механические свойства дейдвудных подшипников уже при проектировании судового валопровода [9]. Во многих работах расчетная схема представляет собой балку круглого постоянного или переменного сечения, которая опирается на упругие опоры, моделирующие дейдвудные опоры скольжения точечного типа с размерностью Н/м или протяженные упругие основания с размерностью Н/м<sup>2</sup>.

В работе [4] при анализе влияния упругих свойств дейдвудных подшипников на поперечные колебания судового валопровода и образования трещин в кормовой части судна атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь» расчетная схема представляла собой балку, которая опиралась на два упругих основания и на одну упругую опору. Сами упругие основания представляли собой последовательно расположенные между собой независимые друг от друга пружины с коэффициентом жесткости  $k$ . При моделировании резино-эбонитовых планок дейдвудного подшипника принималось значение коэффициента жесткости  $k = 230$  МН/м ( $2,30 \cdot 10^8$  Н/м). С уменьшением значения коэффициента до  $k = 130$  МН/м ( $1,30 \cdot 10^8$  Н/м) упругое основание моделируют материалом втулок дейдвудных подшипников, изготовленных из чистой резины.

В работах [10, 13] представлено выражение определения коэффициента жесткости как по длине, так и по диаметру без учета зазора в дейдвудном подшипнике. Усредненный коэффициент жесткости подшипника  $k$  (Н/м) длиной  $l$  будет определяться как:

$$k = Q/\Delta = \frac{\pi E d}{4h} l. \quad (6)$$

В случае же определения коэффициента жесткости в вертикальном (и в любом другом радиальном направлении) по диаметру уравнение (3.32) примет вид:

$$k = \frac{\pi E d^2}{4h}. \quad (7)$$

Следует отметить, что представления выражения (6) и (7) определения коэффициента жесткости не учитывают диаметральный зазор, а, следовательно, длину контакта гребного вала с дейдвудными подшипниками принимают равной диаметру  $d$  ( $2r$ ) гребного вала с облицовочным покрытием. Диаметральный зазор зависит от разности диаметра гребного вала и дейдвудного подшипника  $D$  ( $2R$ ), а также от упругих свойств материала подшипника.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ С УЧЕТОМ ЗАЗОРА

Для исследования взаимодействия контакта гребного вала с дейдвудным подшипником представим математическую модель в виде двух элементов: вал с радиусом  $r$  и дейдвудный подшипник с радиусом  $R$  (см. рис. 2). Поскольку модуль упругости стали на 2 — 3 порядка больше модуля упругости материала втулки или вкладыша дейдвудного подшипника, будем считать вал и корпус абсолютно жесткими [6, 7].

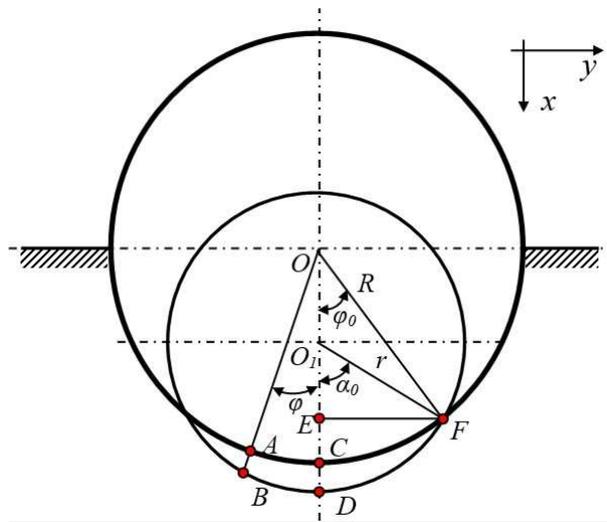


Рис. 2 Общий вид деформированного контакта вала в дейдвудном подшипнике с зазором

Зазор  $\Delta$ , который равен отрезку  $OO_1$ , между гребным валом и дейдвудным подшипником, равен сумме диаметрального зазора и осадки  $\delta$  по оси  $x$ :

$$OO_1 = \Delta = (R - r) + CD. \quad (8)$$

Как видно из рис. 2 осадка равна отрезку  $CD$ . Далее, для определения величины радиальной осадки вала в дейдвудном подшипнике, запишем координаты векторов  $O_1F$ ,  $O_1B$ ,  $O_1D$  через осадку по оси  $x$ , радиальную осадку  $\chi$  (отрезок  $AB$ ) и зазора  $\Delta$ :

$$\begin{cases} O_1F = (R \cos \varphi_0 - \Delta; R \sin \varphi_0); \\ O_1B = ((R + \chi) \cos \varphi - \Delta; (R + \chi) \sin \varphi); \\ O_1D = (R + \delta - \Delta; 0). \end{cases} \quad (9)$$

Длины векторов (9) будут иметь вид:

$$\begin{cases} |O_1F|^2 = R^2 - 2R\Delta \cos \varphi_0 + \Delta^2; \\ |O_1B|^2 = R^2 + 2R\chi + \chi^2 - 2(R + \chi)\Delta \cos \varphi + \Delta^2; \\ |O_1D|^2 = R^2 + \delta^2 + \Delta^2 + 2R\delta - 2R\Delta - 2\delta\Delta. \end{cases} \quad (10)$$

Векторы  $O_1F$ ,  $O_1B$  и  $O_1D$  одинаковой длины представлены как радиусы окружности. Исходя из этого, приравняем попарно векторы и составим следующую систему:

$$\begin{cases} R^2 - 2R\Delta\cos\varphi_0 + \Delta^2 = R^2 + 2R\chi + \chi^2 - 2(R + \chi)\Delta\cos\varphi + \Delta^2; \\ R^2 - 2R\Delta\cos\varphi_0 + \Delta^2 = R^2 + \delta^2 + \Delta^2 + 2R\delta - 2R\Delta - 2\delta\Delta. \end{cases} \quad (11)$$

Проведем элементарные преобразования:

$$\begin{cases} -2R\Delta\cos\varphi_0 = 2R\chi + \chi^2 - 2(R + \chi)\Delta\cos\varphi; \\ -2R\Delta\cos\varphi_0 = \delta^2 + 2R\delta - 2R\Delta - 2\delta\Delta. \end{cases} \quad (12)$$

Выразим зазор в каждом уравнении системы (12):

$$\begin{cases} \Delta = \frac{2R\chi + \chi^2}{2(R + \chi)\cos\varphi - 2R\cos\varphi_0}; \\ \Delta = \frac{\delta^2 + 2R\delta}{2R + 2\delta - 2R\cos\varphi_0}. \end{cases} \quad (13)$$

Откуда получаем равенство:

$$\frac{2R\chi + \chi^2}{2(R + \chi)\cos\varphi - 2R\cos\varphi_0} = \frac{\delta^2 + 2R\delta}{2R + 2\delta - 2R\cos\varphi_0}. \quad (14)$$

Раскроем скобки и приведем подобные:

$$\frac{\chi(2 + \chi R^{-1})}{\cos\varphi - \cos\varphi_0 + \chi R^{-1}\cos\varphi} = \frac{\delta(2 + \delta R^{-1})}{1 - \cos\varphi_0 + \delta R^{-1}} \quad (15)$$

При малых значениях величин  $\chi R^{-1}$  и  $\delta R^{-1}$  их можно отбросить. Поэтому равенство (15) представим следующим образом:

$$\frac{2\chi}{\cos\varphi - \cos\varphi_0} = \frac{2\delta}{1 - \cos\varphi_0}. \quad (16)$$

Выражение определения радиальной осадки относительно осадки вала, исходя из равенства (16), в дейдвудном подшипнике по оси  $x$  будет иметь следующий вид:

$$\chi = \frac{\delta(\cos\varphi - \cos\varphi_0)}{1 - \cos\varphi_0}. \quad (17)$$

Интеграл распределенной нагрузки, на основании полученных результатов в работах [10, 13], относительно угла с учетом зазором выражается в виде:

$$q = \int_{-\varphi}^{\varphi} \sigma_y r d\varphi = \frac{E}{h} \Delta r \int_{-\varphi}^{\varphi} \frac{(\cos\varphi - \cos\varphi_0)\cos\varphi_0}{1 - \cos\varphi_0} d\varphi. \quad (18)$$

Окончательное выражение распределенной нагрузки примет вид:

$$q = \frac{Ed}{2h} \Delta \left[ \frac{0,5}{1 - \cos\varphi_0} (2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0) \right]. \quad (19)$$

На основании (6) и (7) выражение коэффициента жесткости (Н/м) уже с учетом зазора будет выглядеть следующим образом:

$$k = \frac{Ed^2}{2h} \left[ \frac{0,5}{1 - \cos\varphi_0} (2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0) \right]. \quad (20)$$

Сам же угол контакта (в радианах) определим из выражения (11):

$$\varphi_0 = \arccos \frac{(d + \Delta)\Delta + (\Delta + \delta)^2}{(d + 2\Delta)(\Delta + \delta)}. \quad (21)$$

Из полученного выражения (20), можно сделать вывод, что на значения угла контакта влияет величина зазора, диаметр гребного вала с облицовочным покрытием и величина осадки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика позволяет определить значение коэффициента жесткости, который характеризует упругие и механические свойства дейдвудного подшипника в статических и динамических расчетах. А также оценить реальную ширину контакта валопровода с дейдвудным подшипником.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балацкий Л.Т. Эксплуатация и ремонт дейдвудных устройств морских судов / Л.Т. Балацкий, Т.Н. Бегаоен. — М.: Транспорт, 1975. — 160 с.
2. Виноградов С.С. Износ и надежность винто—рулевого комплекса судов / С.С. Виноградов, П.И. Гавриш.— М.: Транспорт, 1970.— 232 с.
3. Гаврилюк Р.Н. Конструктивно—технологические основы создания подшипников качения для судового валопровода с повышенными эксплуатационными характеристиками: дис. канд. техн. наук: 05.08.04/Р.Н. Гаврилюк. — Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. Гос. ун-т вод. коммуникаций, 2011. — 189 с.
4. Кельзон А.С. Оптимизация укладки судовых валопроводов /А.С. Кельзон, Н.В. Январев, В.Г. Мурамович // Судостроение, № 5 1993 г. — с. 15—16.
5. Комаров В.В. Предельно допустимые износы подшипниковых пар дейдвудных устройств валопроводов/В.В. Комаров//Судостроение и судоремонт. Материалы по обмену опытом, 1990 — с. 11 — 15.
6. Платонов В.Ф. К расчету подшипников скольжения из пластмасс /В.Ф. Платонов// Автомобильная промышленность, № 7 1960 г. — с. 24 — 27.
7. РТМ 31.5004-75. Подшипники скольжения гребных валов из неметаллических материалов. Технико-эксплуатационные требования к материалам, изготовлению и эксплуатации. URL: <http://www.iprosoft.ru/docs/?nd=1200060657> (дата обращения: 20.08.2020).
8. Румб В.К. Прогнозирование долговечности дейдвудных подшипников /В.К. Румб// Морской вестник № 2 (26) 2008 г. — с. 30 — 31.
9. Халывкин А.А. Оценка влияния упругих свойств кормового дейдвудного подшипника на значение собственной частоты при линейных поперечных колебаниях судового валопровода/А.А. Халывкин, А.Я. Ауслендер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — с. 983 — 992. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-983-992.
10. Халывкин А.А. Исследование влияния механических и упругих свойств дейдвудных подшипников на численное значение коэффициента жесткости / А.А. Халывкин, С.А. Макеев, В.А. Мамонтов, Д.О. Шацков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. с. 71 — 79. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-71-79.
11. Халывкин А.А. Влияние контакта валопровода с дейдвудным подшипником на его рабочее состояние/ А.А. Халывкин, Д.О. Шацков// Сборник статей Международной научно-практической конференции «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы» (09 января 2020 г., г. Магнитогорск). / в 2 ч. Ч.1 — Уфа: Omega science, 2020. — с. 107 — 110.
12. Чура М.Н. Эксплуатационные повреждения гребных валов / М.Н. Чура, А.В. Файвисович // Транспортное дело России. — 2011. — № 11. — С. 110—112.
13. Halyavkin A. Determination of stiffness coefficient of stern shaft bearing / A. Halyavkin, I. Razov, V. Mamontov, G. Kushner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 90. — Is. 1. — Pp. 012078. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012078.

## REFERENCES

1. Balatsky L.T. *Ekspluatatsiya i remont dejdvudnyh ustrojstv morskikh sudov* [Operation and repair of deadwood devices of sea vessels] / L.T. Balatsky, T.N. Begagoen. — M.: Transport, 1975. — 160 p.
2. Vinogradov S.S. *Iznos i nadyozhnost vinto-rulevogo kompleksa sudov* [Wear and reliability of the screw-steering complex of ships] / S.S. Vinogradov, P.I. Gavrish. — M.: Transport, 1970. — 232 p.
3. Gavriljuk R.N. *Konstruktivno-tekhnologicheskie osnovy sozdaniya podshipnikov kacheniya dlya sudovogo valoprovoda s povyshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami* [Constructive and technological bases of creation of rolling bearings for a ship shaft line with increased operational characteristics: dis. candidate of technical sciences: 05.08.04] / R.N. Gavriljuk. — St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State University of Water Communications, 2011. — 189 p.
4. Kelzon A.S. *Optimizatsiya ukladki sudovyh valoprovodov* [Optimization of stowage of marine shafting] / A.S. Kelzon, N.In. Yanvarev, V.G. Muratovic // Shipbuilding, No. 5, 1993. — pp. 15 — 16.
5. Komarov V.V. *Predelno dopustimye iznosy podshipnikovyh par dejdvudnyh ustrojstv valoprovodov* [The maximum permissible wear of the bearings stern tube shafting devices] / Vladimir Komarov //Shipbuilding and ship repair. Materials for the exchange of experience, 1990. — pp. 11 — 15.
6. Platonov V.F. *K raschetu podshipnikov skolzheniya iz plastmass* [To the calculation of sliding bearings made of plastics] / V.F. Platonov // Automotive Industry, No. 7, 1960. — pp. 24 — 27.
7. РТМ 31.5004-75. Plain bearings of propeller shafts made of non-metallic materials. Technical and operational requirements for materials, manufacturing and operation. URL: <http://www.iprosoft.ru/docs/?nd=1200060657> (accessed on: 20.08.2020).
8. Rumb V.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti dejdvudnyh podshipnikov* [Forecasting the durability of stern tube bearings] / V.K. Rumb // Marine Bulletin No. 2 (26), 2008 — pp. 30 — 31.

9. Khalyavkin A.A. *Ocenka vliyaniya uprugih svoystv kormovogo dejvdunogo podshipnika na znachenie sobstvennoy chastoty pri linejnyh poperechnykh kolebaniyah sudovogo valoprovoda* [Assessment of the influence of the elastic properties of the aft stern tube bearing on the value of natural frequency during linear transverse vibrations of the ship shafting] / A.A. Khalyavkin, A.Ya. Auslender // Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S O. Makarov. — 2018. — T. 10. — No. 5. — pp. 983 — 992. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-983-992.
10. Khalyavkin A.A. *Issledovanie vliyaniya mekhanicheskikh i uprugih svoystv dejvdunyh podshipnikov na chislennoe znachenie koeffitsienta zhestkosti* [Study of the influence of mechanical and elastic properties of stern tube bearings on the numerical value of the stiffness coefficient]. Khalyavkin, S.A. Makeev, V.A. Mamontov, D.O. Shatskov // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2019. No. 2. — pp. 71 — 79. DOI: 10.24143 / 2073-1574-2019-71-79.
11. Khalyavkin A.A. *Vliyaniye kontakta valoprovoda s dejvdunym podshipnikom na ego rabochee sostoyaniye* [Influence of the shaft line contact with the stern-tube bearing on its working condition]. / A.A. Khalyavkin, D.O. Shatskov // Collection of articles of the International scientific-practical conference "Implementation of the results of innovative developments: problems and prospects" (January 09, 2020, Magnitogorsk) / in 2 h. Part 1 — Ufa: Omega science, 2020. — pp. 107 — 110.
12. Chura M.N. *Ekspluatatsionnye povrezhdeniya grebnykh valov* [Operational damage to propeller shafts] / M.N. Chura, A.V. Faivisovich // Transport business of Russia. — 2011. — No. 11. — pp. 110 — 112.
13. Halyavkin A. Determination of stiffness coefficient of stern shaft bearing / A. Halyavkin, I. Razov, V. Mamontov, G. Kushner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 90. — Is. 1. — Pp. 012078. DOI: 10.1088 / 1755-1315 / 90/1/012078.

## ОБОЗРЕНИЕ: ПРИ ПОДДЕРЖКЕ РС В ГУМРФ ИМЕНИ АДМИРАЛА С.О. МАКАРОВА ОТКРЫТ ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ПО КОДЕКСУ МГТ



Специализированный тренажерный комплекс для подготовки специалистов по Международному кодексу по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ) открыт в Государственном университете морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова при поддержке Российского морского регистра судоходства (РС).

Новый тренажерный комплекс «Макаровка» предназначен для подготовки курсантов плавательных специальностей и повышения квалификации экипажей судов, работающих на газомоторном топливе.

Основанием для реализации проекта послужили введение в действие Международной морской организацией Кодекса МГТ (IGF Code), документа, направленного на снижение уровня вредных выбросов в атмосферу, безопасной и эффективной постройки и эксплуатации судов с использованием энергосберегающих и экологических технологий, а также активизация строительства судов, использующих сжиженный природный газ в качестве топлива.

Проект создания материально-технической базы для подготовки специалистов по эксплуатации судов, использующих газ и иное топливо с низкой температурой вспышки, а также специалистов по техническому наблюдению за проектированием, строительством и эксплуатацией таких судов, был реализован ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова при инициативной поддержке РС.

Тренажерный комплекс по Кодексу МГТ включает специализированный класс по изучению специфики технической эксплуатации судов, использующих газ в качестве топлива и двухтопливных двигателей, тренажерный модуль по привитию практических навыков по газовой бункеровке, а также тренажер по борьбе с газовыми пожарами.

В состав обновленного пожарного полигона Центра по выживанию на море вошли тренажеры-имитаторы судовых систем горящего трубопровода и горящего двигателя, а также система пожаротушения компрессионной пеной. Обучение на тренажерном комплексе позволит получить знания о системах предотвращения и тушения специфических газовых пожаров на судах, подпадающих под действие Кодекса МГТ, а также на практике отработать операции по борьбе с пожаром. Оснащенная системой видеонаблюдения пультовая станция инструктора обеспечивает постоянный контроль за ходом тренировки, поддержание голосовой связи с ее участниками, а также руководство работой всех систем и оборудования огневых тренажеров с обеспечением максимальных мер безопасности для обучаемых.

«Мы ожидаем, что практические занятия, проводимые в реалистичных условиях подготовки на модернизированной учебной базе университета, будут служить хорошей платформой для обучения специалистов по действиям как в рутинных, так и в аварийных ситуациях на судах, подпадающих под требования Кодекса МГТ — отмечает ректор ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова профессор Сергей Барышников. — Как всегда при реализации наших новых проектов, будем рады быть полезными для передовых судоходных компаний, строящих и эксплуатирующих современный высокотехнологичный флот, для курсантов нашего университета и действующих моряков, спешащих получить работу на перспективных судах. Искренне благодарны Российскому морскому регистру судоходства за постоянную и ощутимую поддержку наших начинаний».

«Взаимодействие с ведущими морскими вузами страны — важная составляющая политики Регистра. Стратегическое партнерство предусматривает совместные усилия, направленные на поддержку высокого уровня подготовки курсантов и квалификации экипажей. С развитием сегмента судов на газомоторном топливе компетенции в этой области приобретают сегодня все большее значение. Благодаря тесному взаимодействию с ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова мы имеем возможность заложить основы безопасной эксплуатации современного высокотехнологичного флота уже на стадии обучения молодых специалистов», — сказал генеральный директор РС Константин Пальников.

Целевыми группами обучения на модернизированной учебно-тренажерной базе Института ДПО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова могут выступать как курсанты плавательных специальностей института «Морская академия» ГУМРФ, так и члены экипажей судов-газовых бункеровщиков, газозовов СП, оборудованных двухтопливными двигателями, а также других судов, использующих газ в качестве топлива, инспекторы Российского морского регистра судоходства, специалисты по морской логистике газомоторного топлива.



## ЭЛЕКТРОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.316:658.58

### ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ

**Н.В. Широков**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, e-mail: shirokovn@inbox.ru

В статье рассмотрен ряд подходов, направленных на решение задачи безаварийной эксплуатации судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Показано, что в целом ряде ситуаций, связанных с отказами источников электроэнергии, современные средства управления не решают эту проблему. Предложено использовать метод предупредительного управления, обеспечивающий структурную адаптацию судовой электроэнергетической системы к возникшей неисправности. Предложен алгоритм самоорганизации СЭЭС, осуществляемый исходя из прогнозирования развития текущей ситуации в электроснабжении судна, ее технического состояния, а также и технического состояния генераторных агрегатов. В статье рассмотрен ряд режимов, в которых современные средства защиты СЭЭС оказываются неэффективными, хотя полностью соответствуют Правилам классификации и постройки морских судов. В этой связи делается предположение о целесообразности изучения вопроса о необходимости корректировки требований Российского морского регистра судоходства относительно организации такого управления электроэнергетической системой, при котором отказ в частично работоспособное состояние будет происходить без перерыва в электроснабжении ответственных устройств судна. В статье предложена функциональная схема простого прибора, обеспечивающего предупредительную разгрузку СЭЭС, осуществляемую до отключения неработоспособного генераторного агрегата. Его применение позволяет исключить перегрузку сети и работу системы в переходных режимах, на которые современные первичные двигатели не рассчитаны. Разработан и представлен алгоритм управления СЭЭС в штатном режиме, позволяющий предотвратить появление обратной мощности и обеспечить правильное функционирование системы при отказе генераторного агрегата. В статье предложено производить превентивный запуск аварийного дизель-генератора не в момент исчезновения напряжения в сети, а в ряде штатных ситуаций, прямым следствием которых является прекращение электроснабжения судна, например, в случае пожара в помещении вспомогательных дизель-генераторов. При этом аварийный источник электроэнергии запускается до отключения основных и в случае исчезновения напряжения мгновенно подключается к шинам и обеспечивает бесперебойное электроснабжение ответственных устройств.

*Ключевые слова:* безаварийная эксплуатация, судовая электроэнергетическая система, предупредительное управление, защита от обратной мощности, предупредительная разгрузка сети, превентивный запуск аварийного дизель-генератора

## PREVENTIVE PROTECTION OF THE SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM WITH PARALLEL GENERATOR SETS

N.V. Shirokov, PhD, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: shirokovn@inbox.ru

The article considers a number of approaches aimed at solving the problem of trouble-free operation of ship's electric power systems (SEPS). It has been shown that in a number of situations related to failures of power sources, modern control tools are not effective. In this regard, it has been proposed to use the method of preventive control, which provides structural adaptation of the ship's electric power system to the resulting malfunction. The algorithm of SEPS self-organization has been proposed, which is carried out on the basis of forecasting the development of the current situation in the ship's power supply, its technical condition, as well as the technical condition of the generator sets. The article considers a number of situations when modern means of protection of SEPP are not effective, although they fully comply with the Rules of Classification and Construction of Sea-Going Ships. In this regard, studying the need to adjust the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping regarding the organization of such management of the electric power system has been suggested, in which the failure to a partially operational state will occur without interruption in the power supply of the responsible devices of the vessel. The article proposes a functional diagram of a simple device that provides preventive unloading of the ship's electric power plant (SEPP), carried out before the shutdown of an inoperable generator set. This allows the system to avoid network overload and system operation in transient modes, for which modern primary engines are not designed. An algorithm for controlling the SEPP in non-standard mode has been developed and presented, preventing the appearance of reverse power and ensuring the correct functioning of the system in the event of a failure of the generator set. A preventive start of an emergency diesel generator not at the time of the disappearance of the voltage in the network, but in a number of emergency situations has been proposed, the direct consequence of which is the termination of the ship's power supply, for example, in the event of a fire in the auxiliary diesel generators. In this case, the emergency power source is started before the main power supply is switched off, and in the event of a voltage loss, it is instantly connected to the buses and provides uninterrupted power supply to the essential devices.

**Keywords:** accident-free operation, ship's electric power system, preventive management, protection against reverse power, preventive unloading of the network, preventive start-up of an emergency diesel generator

### ВВЕДЕНИЕ

Под судовой электроэнергетической системой (СЭЭС) будем понимать совокупность связанных между собой судовых электротехнических устройств, объединенных процессом генерации, распределения, преобразования, потребления электрической энергии и управления этими процессами [1]. От ее правильного функционирования зависит эффективность и безаварийность работы судна, сохранность груза и безопасность членов экипажа. Перерыв в электроснабжении ответственных потребителей вызывает нарушение технологических процессов, потерю управляемости, а иногда и хода судна, что в сочетании с такими внешними условиями как работа в узкостях, районах с интенсивным движением или в штормовых условиях может иметь катастрофические последствия.

Самым сложным, ответственным и вызывающим наибольшее число отказов является процесс производства электроэнергии. Практика показывает, что отключение генераторных агрегатов (ГА) защитой по перегрузке, обратной мощности или по причине отказа системы управления (СУ) в большинстве случаев приводит к возникновению аварийной ситуации на судне, вызванной перерывом электроснабжения. Данное обстоятельство объясняется не достаточной эффективностью применяемых средств управления СЭЭС в нештатных ситуациях, которые были разработаны еще в середине прошлого века. Все это обуславливает актуальность разработки и практической реализации подходов, обеспечивающих непрерывное электроснабжение ответственных потребителей электроэнергии в случае выхода из строя одного или нескольких ГА.

Рассмотрим работающие параллельно ГА как автономную генерирующую систему (АГС), элементами которой являются сами ГА, связанные между собой и предназначенные для снабжения судна электрической энергией требуемого качества [2]. Для того чтобы система была работоспособна и функционировала необходимо и достаточно, чтобы точка  $S(\bar{X})$ , характеризующая ее техническое состояние (ТС), принадлежала области  $H$ , которая в статье [3] определяется как пересечение ряда пространств, а именно:

$$H = B_x \cup M_y \cup M_z \cup M_u, \quad (1)$$

где  $B_x$  — область изменения допустимых значений первичных параметров;

$M_y$  — пространство, характеризующее отображение области изменения значений выходных параметров системы в пространстве первичных параметров;

$M_z$  — пространство, характеризующее отображение области изменения значений параметров функциональных блоков системы в пространстве первичных параметров;

$M_u$  — пространство, характеризующее отображение области изменения значений управляющих воздействий в пространстве первичных параметров.

Так как в решаемой задаче глубина диагностирования определена параметрами ГА, являющимися элементами системы и более крупных функциональных блоков нет, то  $B_x \equiv M_z$ , следовательно, для данного частного случая можно записать:

$$H = B_x \cup M_y \cup M_u. \quad (2)$$

При этом пересечение  $B_x \cup M_y$  задает область работоспособности объекта, пересечение которой с пространством  $M_u$  определяет область  $H$ , принадлежность которой точки  $S(\bar{X})$  характеризует функционирование работоспособной системы.

В статье [3] показано, что, осуществляя сегментацию области  $H$ , можно получить усеченные области правильного функционирования СЭЭС ( $w^f$ ), каждая из которых определяется, например, количеством и составом работающих ГА. В этом случае ответственные потребители судна будут снабжаться электроэнергией требуемого качества, если в данном режиме работы электростанции будет выполняться условие

$$S(\bar{X}) \subset w^f. \quad (3)$$

Если хотя бы один из параллельно работающих ГА вышел из строя, то условие (2) выполняться не будет. Но при этом можно инициировать переход СЭЭС в режим работы, при котором будет выполнено условие (3) и перерыва в электроснабжении судна не произойдет. На этом основан метод предупредительного управления, представляющий, согласно [3], процесс формирования такого воздействия на СЭЭС, в результате которого ТС системы после срабатывания защиты, отключающей неработоспособный ГА, будет принадлежать одной из усеченных областей правильного функционирования.

## ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНАЯ РАЗГРУЗКА СЭЭС

Рассмотрим систему защиты судовой электроэнергетической системы от перегрузки, применяемую на современных судах, которая в случаях с автоматизированной электростанцией, как правило, имеет два уровня [4, 5].

Если нагрузка хотя бы одного из ГА превысит допустимое значение, то срабатывает предупредительная сигнализация, и через выдержку времени формируется команда на отключение неотвеченных устройств (НОУ). Эта операция позволяет снизить нагрузку АГС и перегруженного агрегата и может выполняться в несколько этапов, на каждом из которых через установленный промежуток времени осуществляется отключение заданной группы потребителей. Применение выдержки времени на срабатывание первого уровня защиты от перегрузки позволяет избежать ошибок первого рода и не допускать ошибочной разгрузки сети при бросках тока во время запуска мощных электродвигателей.

Если же нагрузка на ГА после отключения части потребителей останется выше установленного критического (аварийного) значения, то срабатывает аварийная сигнализация, и формируется команда на отключение автоматического выключателя перегруженного агрегата, что однозначно приводит к исчезновению электроснабжения судна. Данный подход полностью соответствует требованиям 8.2.2 и 8.2.3 части XI «Электрическое оборудование» Правил классификации и постройки морских судов (Правил РС), и вполне успешно работает при штатных режимах СЭЭС, для которых и был в свое время разработан.

В этой связи в момент ( $t_0$ ), когда нагрузка работающего ГА достигнет заданного значения, например, равного 80 % от номинальной мощности генератора, СУ через выдержку времени в 15 — 20 с формирует сигнал на запуск резервного агрегата. По этой команде осуществляется пуск первичного двигателя, например, дизеля, возбуждение генератора, синхронизация, включение на параллельную работу и принятие нагрузки ГА. Интервал времени ( $t_{\text{пуск}}$ ) от момента  $t_0$  до момента ( $t_1$ ), когда разность нагрузок между параллельно работающими машинами достигнет допустимой величины, варьирует в зависимости от типа и мощности агрегатов, величины и характера нагрузки, типа применяемой СУ и ряда других параметров. Но в целом для современных СЭЭС, использующих алгоритмы работы, включающие нахождение резервного ГА в дежурном режиме,  $t_{\text{пуск}}$  составляет около одной минуты. Если в течение этого промежутка времени произойдет увеличение нагрузки и генератор окажется перегруженным, то отключение НОУ позволит уменьшить его нагрузку ниже критического значения. Если этого не произойдет, то агрегат будет отключен по перегрузке. При этом такой рост нагрузки в течение  $t_{\text{пуск}}$  маловероятен, так как обычно подруливающие устройства, компрессоры и другие мощные потребители оснащаются системами программируемого пуска.

Исключение составляет ситуация, при которой резервный агрегат не запускается вследствие выхода из строя, например, по причине недопустимой величины разряда аккумуляторов при стартерной системе пуска. Но даже в этом случае благодаря действиям экипажа срабатывание второй ступени защиты происходит крайне редко.

Существенно другая ситуация складывается при отказе одного из работающих агрегатов. Предположим, что в параллель работают два ГА и на одном из них произошла серьезная неисправность, сопровождающаяся, например, стремительным падением давления смазочного масла дизеля вследствие выхода из строя системы смазки. В этом случае одновременно с предупредительным сигналом АПС, согласно 4.4.2 части XV «Автоматизация» Правил РС, также формируется сигнал на запуск резервного генератора. Но если интервал времени от момента снижения давления масла от предупредительного значения до критического окажется меньше, чем  $t_{\text{пуск}}$ , то произойдет отключение данного агрегата от сети до момента включения резервного ГА на параллельную работу. В этом случае нагрузка неисправной перейдет на оставшуюся работоспособную машину, причем произойдет ударный наброс нагрузки. Если в момент возникновения неисправности СЭЭС работала в наиболее эффективном режиме и нагрузка агрегатов составляла около 75 % от их номинальной мощности, то суммарная нагрузка на оставшийся в работе ГА составит 150 % от его номинальной мощности и при этом характер изменения нагрузки будет существенно превышать значения, установленные в 2.11.3 части IX «Электрическое оборудование» Правил РС. В таких условиях дизеля практически всех производителей «проваливаются» по частоте вращения и отключаются защитой или просто выходят из строя, что в любом случае приводит к исчезновению напряжения в сети и к аварийной ситуации на судне. При этом ввиду наличия выдержки времени, устройства отключения НОУ не срабатывают.

Учитывая подобную ситуацию, ряд фирм разработал устройства разгрузки СЭЭС, отключающие заранее выбранные группы потребителей без выдержки времени, если нагрузка ГА превысит, например, 130 % от его номинальной мощности и при этом предполагается отключение части ответственных устройств второй категории. Однако практика показала, низкую эффективность применения данного технического решения. Это объясняется следующими обстоятельствами. С одной стороны, полностью отказаться от выдержки времени при отключении выбранной группы потребителей не удастся, так как практически каждый прямой пуск электропривода насоса мощностью порядка 10 % от номинальной мощности генератора приводит к броску тока в сети и ошибочному отключению многих потребителей. С другой стороны, стремительная разгрузка ГА в момент снижения его оборотов вследствие перегрузки приводит к существенным переходным процессам, исход которых зависит от многих факторов и в целом проблематичен. В этой связи большинство случаев заканчивается отключением оставшегося работоспособным агрегата и прекращением электроснабжения судна.

С целью предотвращения подобных ситуаций в рамках предупредительного управления предлагается осуществлять разгрузку СЭЭС при отказе ГА до его отключения от сети, не допуская перегрузки оставшихся работоспособными агрегатов. На рис. 1 представлена функциональная схема устройства, реализующего данный подход для наиболее тяжелого режима работы СЭЭС с двумя ГА.

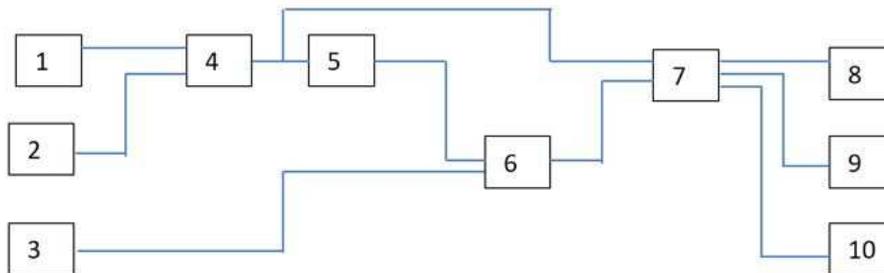


Рис.1 Функциональная схема устройства предупредительной разгрузки СЭЭС:

- 1, 2 — датчики нагрузки первого и второго генераторов соответственно; 3 — блок контроля технического состояния агрегатов;  
 4 — сумматор; 5 — пороговый блок; 6 — логический элемент «И»; 7 — блок выбора отключаемых потребителей;  
 8 — 10 — группы отключаемых потребителей

Сигналы, пропорциональные нагрузке генераторов с выходов датчиков 1 и 2 поступают на входы сумматора 4, откуда сигнал, пропорциональный нагрузке сети, подается на вход порогового блока 5. Величина порога выбирается, исходя из возможности принятия дополнительной нагрузки одним агрегатом, и может быть пропорциональна, например, 90 % от номинальной мощности одного генератора. Если нагрузка агрегатов составляет 70 — 75 %, то на выходе блока 5 формируется сигнал логическая «1», информирующий, о том, что в случае отказа и отключения одной из машин произойдет перегрузка и отключение второй. При возникновении неисправности, приводящей к отключению неработоспособного ГА, на второй вход

логического элемента «И» 6 с выхода блока 3 контроля ТС агрегатов также поступает сигнал логическая «1». На выходе блока 6 появляется логическая «1», свидетельствующая о необходимости разгрузки сети. По этому сигналу может осуществляться разгрузка СЭЭС посредством отключения блоков 8 — 10 с использованием блока 7. Данный вариант схемы позволяет оптимизировать число отключаемых потребителей с учетом текущей нагрузки сети. При этом сигнал логическая «1» на выходе блока контроля ТС формируется до достижения контролируемым параметром критического значения и до отключения автоматического выключателя, соответствующего ГА.

Сущность подхода основана на том, что после снижения давления смазочного масла дизеля ниже допустимой величины и формирования предупредительного сигнала АПС до момента срабатывания автоматического выключателя неисправного генератора неработоспособный агрегат продолжает вырабатывать электроэнергию. При этом в случае выхода из строя, например, масляного насоса двигателя время снижения давления смазочного масла ( $t_{\text{масла}}$ ) от предупредительного ( $P_{\text{пред}}$ ) до аварийного ( $P_{\text{авар}}$ ) значения зависит от мощности дизеля, производительности насоса, диаметра масляного трубопровода, конфигурации системы смазки, вязкости самого масла и ряда других факторов.

В целом,  $t_{\text{масла}}$  для современных машин составляет несколько секунд. Так, для агрегата 6ДГ ОМЗ интервал времени от  $P_{\text{пред}}=4,7 \text{ кг/см}^2$  до  $P_{\text{авар}}=4,1 \text{ кг/см}^2$  при таком виде отказов колеблется в диапазоне 8 — 10 с. Учитывая, что время предупредительной разгрузки в первую очередь определяется временем размыкания контакторов управления потребителей и временем срабатывания датчиков давления и не превышает 0,1 с, данный подход применим и в более сложных ситуациях, например, при разрыве маслопровода, когда давление масла падает в течение одной-двух секунд. При этом собственное время срабатывания прибора, функциональная схема которого представлена на рис. 1, для транспортных судов не превышает 20 мс.

Таким образом, в рамках предупредительного управления описываемое устройство измеряет нагрузку сети, оценивает мощность, которую сможет развить исправная машина после отключения неработоспособной, и в момент выхода ГА из строя, если это необходимо, отключает выбранную группу потребителей. Происходит структурная адаптация системы электроснабжения к возникшей неисправности и после отключения неработоспособного агрегата нагрузка сети окажется такой, что перегрузка исправного ГА не произойдет, условие (3) окажется выполненным и переход СЭЭС в частично работоспособное состояние осуществится без аварийной ситуации.

## ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНАЯ ЗАЩИТА СЭЭС ОТ ОБРАТНОЙ МОЩНОСТИ

В случае выхода из строя топливной системы, аппаратуры подачи воздуха в первичный двигатель или при потере возбуждения генератора происходит самопроизвольная разгрузка ГА и переход в двигательный режим. Это нештатный режим работы СЭЭС, часто сопровождающийся перерывом в электроснабжении и аварийной ситуацией на судне. Для предотвращения работы генератора в этом случае на судах применяется предаварийное управление СЭЭС, которое в качестве диагностического признака использует величину мощности, потребляемую генератором в двигательном режиме в течение заданного времени, называемое защитой от обратной мощности.

В соответствии с 8.2.4 части XI «Электрическое оборудование» Правил РС предельная величина обратной мощности, при которой отключают генераторы переменного тока, составляет 8 — 15 % от номинальной мощности ГА для агрегатов, использующих в качестве приводного двигателя дизель и 6 %, если первичный двигатель — это турбина [1]. Наличие выдержки времени на отключение ГА по обратной мощности объясняется тем, что существуют такие режимы работы СЭЭС, при которых один из исправных генераторов начинает потреблять энергию из сети. К ним относится режим рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть при работе грузоподъемных механизмов, режим включения генератора на параллельную работу, параллельная работа агрегатов с малой нагрузкой, динамические режимы, связанные с отключением мощных потребителей [1 — 3]. При этом защита должна срабатывать не более чем за 10 с, но одновременно обеспечивать возможность передачи мощности, отдаваемой из судовой сети (см. 8.2.4 части XI «Электрическое оборудование» Правил РС).

Использование такого диагностического признака во многих случаях позволяет избежать ошибочного отключения работоспособного ГА. Однако, с другой стороны, в момент отказа система защиты срабатывает позже, чем следует, что существенно снижает ее эффективность, может привести к возникновению аварийной ситуации на судне [1]. Это объясняется тем, что в случае параллельной работы двух ГА, при подобного рода отказах, нагрузка на работоспособный агрегат удваивается и при этом сеть дополнительно

нагружается обратной мощностью, что часто сопровождается перегрузкой и отключением исправной машины [1, 6, 7].

Рассмотрим в качестве примера работу двух ГА, загруженных на 70 % и 75 % от номинальной мощности ( $N_{ном}$ ) соответственно. Предположим, что вышла из строя система подачи топлива первого агрегата (ГА1), что привело к прекращению поступления питания в первичный двигатель. В этом случае ГА1 в течение, например, 5 с выработает топливо, имеющееся в фильтрах и трубопроводах, одновременно переводя нагрузку на работоспособный агрегат. В момент полной разгрузки вышедшей из строя машины нагрузка ГА2 составит 145 % от номинальной величины и будет увеличиваться за счет появления обратной мощности, величина которой может превысить 20% от  $N_{ном}$ . При этом величина и динамика роста нагрузки, приходящейся на работоспособный агрегат, оказываются такими, что скорость вращения вала дизеля падает, снижается частота и напряжение генератора, работоспособный агрегат отключается защитой на основании 4.4.6 части XV «Автоматизация» Правил РС, происходит перерыв в электроснабжении судна. Отключение неответственных устройств, осуществляемое с выдержкой времени после перегрузки, просто не успевает сработать или срабатывает слишком поздно и оказывается не эффективным.

Таким образом, работа генераторного агрегата в течение заданного времени с обратной мощностью, превышающей допустимое значение, оказывается недостаточно информативным признаком для реализации качественной защиты СЭЭС от перерыва в электроснабжении. Это обуславливает необходимость разработки и скорейшего внедрения новых подходов, обеспечивающих идентификацию неработоспособного состояния вышедшего из строя ГА до момента перегрузки исправных агрегатов, работающих параллельно.

В этой связи обратим внимание на то обстоятельство, что в приведенном примере нагрузка работоспособного агрегата увеличивается, а вышедшего из строя уменьшается и при этом неравномерность загрузки ГА достаточно велика, много больше величины, допустимой Правилами РС или установленной технической документацией на СУ СЭЭС. Тогда условие идентификации неработоспособного ГА можно записать следующим образом:

$$F_i = L_1 \wedge L_2 \wedge l_i, \quad (4)$$

где  $F_i$  — событие, заключающееся в том, что  $i$ -ый агрегат перешел в неработоспособное состояние;  
 $L_1$  — событие, заключающееся в том, что нагрузка одного из генераторов увеличивается, а другого — уменьшается;  
 $L_2$  — событие, заключающееся в том, что разность нагрузок генераторных агрегатов больше заданного значения ( $\Delta P_{зад}$ );  
 $l_i$  — событие, заключающееся в том, что нагрузка  $i$ -го агрегата уменьшается.

Таким образом, для идентификации неработоспособного состояния ГА измеряют величину неравномерности загрузки ГА и определяют момент отклонения последней за пределы установки, соответствующей  $\Delta P_{зад}$ , определяют момент, когда нагрузка одного ГА уменьшается, а нагрузка другого ГА увеличивается и при совпадении этих моментов, ГА, нагрузка которого уменьшается, признают неработоспособным [8]. В настоящее время разработан ряд подходов, позволяющих своевременно идентифицировать неработоспособное состояние агрегата, вследствие которого соответствующий генератор может перейти в двигательный режим [2, 8, 9].

На рис. 2 представлена блок схема алгоритма предупредительного управления СЭЭС для случая возникновения подобного рода отказов в режиме функционирования системы, при котором ГА уже работают параллельно в автоматическом режиме. По команде «Пуск» вводятся параметры  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_{доп}$ ,  $P_{отк}$ , где  $P_1$  — нагрузка, принимаемая первым агрегатом ГА1;  $P_2$  — нагрузка, принимаемая вторым агрегатом ГА2;  $P_{доп}$  — допустимая нагрузка одного ГА;  $P_{отк}$  — нагрузка, ниже которой можно отключать неработоспособный ГА. Сигналы, пропорциональные текущему значению нагрузок, поступают в устройство с соответствующих датчиков  $P_{sens1}$ ,  $P_{sens2}$  и осуществляется идентификация технического состояния ГА1 и ГА2. Если условие (4) выполняется для одного из агрегатов (соответствующее  $F_i = 1$ ), то этот агрегат признается неработоспособным, и на следующем этапе оценивается возможность исправной машины принять на себя всю нагрузку сети. В случае возможной ее перегрузки ( $P_1 + P_2 > P_{доп}$ ) осуществляется предупредительная разгрузка СЭЭС с последующим отключением разгружающегося неработоспособного ГА при условии, что мгновенный наброс его нагрузки не приведет к недопустимым переходным процессам в сети ( $P_i < P_{отк}$ ). Предложенный подход позволяет, используя новый диагностический признак, осуществить своевременную адаптацию системы к возникшей неисправности, минув аварийную ситуацию на судне.

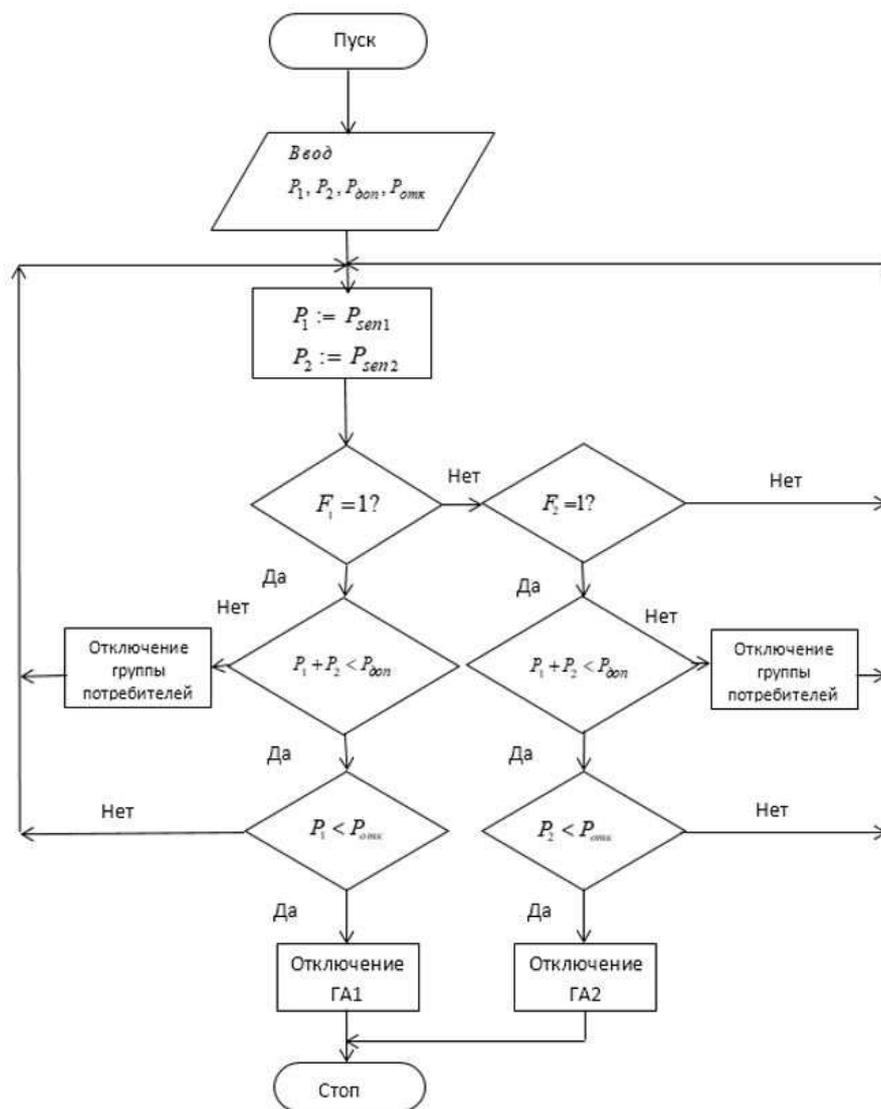


Рис. 2 Блок схема алгоритма предупредительного управления СЭЭС при параллельной работе ГА в автоматическом режиме

## ПРЕВЕНТИВНЫЙ ЗАПУСК АВАРИЙНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

В случае возникновения аварийной ситуации на судне, связанной с перерывом электроснабжения, автоматически запускается аварийный дизель-генератор (АДГ) (согласно 9.3.4.2 части XI «Электрическое оборудование» Правил РС). Обычно его мощность меньше, чем мощность резервного агрегата и время запуска тоже существенно меньше. В этой связи при исчезновении напряжения на шинах ГРЩ, как правило, первым запускается и начинает снабжать электроэнергией ответственных устройств АДГ, что часто позволяет предотвратить возникновение аварии на судне. Тем не менее, перерыв в электроснабжении имеется и может быть весьма опасен.

В этой связи целесообразен превентивный запуск АДГ до наступления, но при наличии реальной угрозы обесточивания СЭЭС. Данный подход обеспечивает мгновенное включение аварийного источника электроэнергии в случае исчезновения напряжения на шинах ГРЩ.

Предупредительное управление АДГ целесообразно осуществлять в случае аварийной ситуации на судне, связанной с пожаром или затоплением помещения, где находятся ГА основной электростанции. Это

объясняется тем, что в случае пожара в машинном отделении или помещении дизель-генераторов члены экипажа, в соответствии с хорошей морской практикой и действующими инструкциями по борьбе за живучесть судна, осуществляют закрытие быстрозапорных клапанов, перекрывающих подачу топлива и смазочного масла от соответствующих цистерн, что приводит к быстрой остановке основных источников электроэнергии. В этой связи превентивный запуск АДГ по сигналу о пожаре в помещении, где расположены ГА, позволит избежать перерыва в электроснабжении ответственных устройств, в том числе и пожарного насоса.

Похожая ситуация складывается и в случае затопления, когда уровень воды достигнет обмоток генераторов, то произойдет короткое замыкание и обесточивание судна. Это обуславливает формирование команды на запуск АДГ по команде от соответствующих датчиков уровня, что также обеспечит непрерывное снабжение электроэнергией ответственных устройств, в том числе и осушительных насосов.

С другой стороны, превентивный запуск АДГ может быть предусмотрен в некоторых режимах нештатной работы СЭЭС, связанных с отказом основных источников электроэнергии. К таким ситуациям относится неисправность ГА при его одиночной работе на сеть или выход из строя сразу всех параллельно работающих агрегатов. Очевидно, что подача команды на запуск АДГ в этом случае повысит живучесть СЭЭС в опасной ситуации. В статье [3] представлена блок-схема алгоритма, согласно которому при одновременном отклонении параметров ГА1 и ГА2 за пределы допуска и в случае, если отключение групп потребителей окажется не эффективным, формируют сигнал на запуск АДГ. В отличие от традиционных решений, когда обычно стремятся сократить время запуска АДГ, в данном случае предлагается формировать команду управления не при обесточивании судна, а несколько ранее, по особым предупредительным сигналам, что позволит исключить перерастание опасной ситуации в аварийную, потерю управления судном и нештатную остановку главного двигателя.

Данный подход для случая отказов ГА не является универсальным, так как возможны дефекты, при которых время изменения контролируемого параметра от предупредительного до аварийного значения меньше, чем время запуска АДГ. Однако это обстоятельство не исключает его применение, так как оно, по крайней мере, не усугубляет сложившуюся ситуацию, а в большинстве случаев предотвращает аварийный режим работы судна, вызванный исчезновением электропитания ответственных устройств. Или хотя бы сокращает время перерыва в их электроснабжении.

При этом предложенный подход только дополняет существующий способ автоматического запуска АДГ при потере электропитания от основного источника электроэнергии и не противоречит 9.3.4.2 части XI «Электрическое оборудование» Правил РС и 3.2 правила 43 СОЛАС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Специалистами ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» разработан и изготовлен опытный образец системы предупредительного управления автономной электроэнергетической системой (СПУ) «Мажор-1», выполняющий следующие функции:

- предупредительную разгрузку сети;
- предупредительную защиту электроэнергетической системы от обратной мощности;
- превентивный запуск АДГ;
- защиту от ошибочных действий экипажа в нештатных ситуациях, связанных с выходом из строя хотя бы одного из работающих ГА.

Опытный образец изготовлен на отечественных контроллерах, широко применяемых при изготовлении систем пожарной сигнализации общепромышленного назначения, и с успехом прошел стендовые испытания. Для СЭЭС все предложенные технические решения могут быть легко реализованы на базе специализированного микропроцессорного контроллера SYMAP-ECG, широко используемого на судах всего мира и одобренного к применению Российским морским регистром судоходства.

Все предложенные алгоритмы для своей реализации предполагают обработку информации, широко используемой в системах управления СЭЭС, и не требуют для своего создания существенных материальных ресурсов. При этом их применение позволит в большинстве случаев исключить возникновение аварийной ситуации на судне, связанной с перерывом электроснабжения ответственных устройств. При этом, на взгляд автора, требуется корректировка ряда положений Правил РС, касающихся обеспечения защиты ГА от перегрузки и обратной мощности и формирования команды на запуск АДГ.

## ВЫВОДЫ

1. Существующие способы, обеспечивающие защиту генераторных агрегатов, часто оказываются не эффективными для предотвращения исчезновения напряжения в сети СЭЭС при отказе хотя бы одного из работающих источников электроэнергии. В этом случае для обеспечения безаварийного перехода из работоспособного в частично работоспособное состояние системы целесообразно применение метода предупредительного управления.

2. Рассмотренные алгоритмы управления в нештатных ситуациях демонстрируют то, что в рамках предупредительного управления принимается решение, реализация которого позволяет избежать аварии СЭЭС путем перевода ее в состояние правильного функционирования в соответствие с [3]. При этом используются результаты технического диагностирования ГА и прогнозируется развитие энергетического состояния сети.

3. Дальнейшее развитие средств защиты СЭЭС при работе в нештатных режимах, связанных с отказом оборудования, диктует целесообразность дальнейшей корректировки Правил РС в части предотвращения аварийных ситуаций на судне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широков Н.В. Метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении электротехнической системой / Н.В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — с. 390 — 401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.
2. Saushev A., Shirokov N., Kuznetsov S. Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power / Aleksandr Saushev, Nikolay Shirokov, Sergey Kuznetsov // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021, 1258 AISC, p. 388 – 398. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_33.
3. Широков Н.В. Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2019. — Т.11. — № 2. — с. 396 — 405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.
4. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учебник для вузов. 2-е издание, переработанное и дополненное / А.П. Баранов// — СПб.: Судостроение, 2005. — 528 с.
5. Лукин С.А. Автоматическое управление электроэнергетической установкой природоохранного судна «РОССИЯ» / С.А. Лукин, К.В. Недалков, Е.Б. Тихонович // Судостроение. — 2000. — № 2. — с. 42 — 46.
6. Yaghobi H. Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator / H. Yaghobi // IET Electric Power Applications. — 2018. — Vol. 12. — Is. 4. — pp. 508 – 517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491
7. Samami M. Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators / M. Samami, M. N. Azary // IET Electric Power Applications. — 2019. — Vol. 13. — Is. 12. — pp. 2128 — 2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961
8. Пат. 2715555 Российская Федерация, МПК H02N 3/08 Способ определения неработоспособного генераторного агрегата / Н.В. Широков; заяв. и патентообл. ООО «Форпик Стандарт Сервис». — № 2019137276; заявл. 19.11.2019; опубл. 02.03.2020, Бюл. № 7. — 9 с.
9. Пат. 2735951 Российская Федерация, МПК H02N 7/08 Способ определения неработоспособного генераторного агрегата / Н.В. Широков; заяв. и патентообл. ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. — № 2020125251; заявл. 30.07.2020; опубл. 11.11.2020, Бюл. № 32. — 15 с.

## REFERENCES

1. Shirokov N.V. *Metod isklyucheniya omonimichnykh oblastey v predupreditel'nom upravlenii elektrotekhnicheskoy sistemy* [Method for eliminating homonymous areas in warning control of the electrical system] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 12.2 (2020): pp. 390 — 401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.
2. Saushev A., Shirokov N., Kuznetsov S. *Predupreditel'noe upravlenie sudovoy elektroenergeticheskoy sistemy pri otkaze istochnikov elektroenergii* [Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power] — Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021, 1258 AISC, pp. 388 — 398. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_33.
3. Shirokov N.V. *Predupreditel'noye upravleniye sudovoy elektroenergeticheskoy sistemy pri otkaze istochnikov elektroenergii* [Warning control of ship's electric power system in case of the power sources failure] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 11.2 (2019): pp. 396 — 405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.
4. Baranov A.P. *Sudovye avtomatizirovannyye elektroenergeticheskiye sistemy uchebnik dlya vuzov* [Ship automated electric power systems: College study guide] St. Petersburg — Sudostroenie, 2005.
5. Lukin S.A., Nedyal'cov K.V., Tichonovuch E.B. *Avtomaticheskoye upravleniye elektroenergeticheskoy ustanovkoy prirodnoochnannogo sudna "ROSSIYA"* [Automated control of electric power plant of environment protection vessel "ROSSIYA"]. Судостроение. — 2000. — № 2. — pp. 42 — 46.
6. Yaghobi H. Fast predictive technique for reverse power detection in synchronous generator IET Electric Power Applications 12.4 (2018): pp. 508 — 517. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0491.

7. Samami M., Milad N.A. Novel fast and secure approach for reverse power protection in synchronous generators. IET Electric Power Applications 13.12 (2019): pp. 2128 — 2138. DOI: 10.1049/iet-epa.2018.5961.
8. Shirokov N.V. RU 2 715 555 C1, IPC H02H 3/08. *Sposob opredeleniya nerabotosposobnogo generatornogo agregata* [Method of determining a non-operational generator set] Russian Federation, assignee. Publ. 02 June 2020.
9. Shirokov N.V. RU 2 735 951 C1, IPC H02H 3/08. *Sposob opredeleniya nerabotosposobnogo generatornogo agregata* [Method of determining a non-operational generator set] Russian Federation, assignee. Publ. 11 June 2020.

## ОБОЗРЕНИЕ

### РС ВЫПОЛНИЛ ПРИНЦИПИАЛЬНОЕ ОДОБРЕНИЕ ПРОЕКТА ПЛАВУЧЕЙ СПГ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) выполнил принципиальное одобрение (Approval in Principle) проекта первой плавучей СПГ-электростанции (Floating Storage Regasification and Power — FSRP), предназначенной для эксплуатации в России.

Конструктивно инновационное судно представит собой плавучее СПГ-хранилище вместимостью около 180 000 м<sup>3</sup>, из которого газ через систему регазификации будет поступать в газотурбинную установку, генерирующую электроэнергию для выдачи на береговые объекты. СПГ-электростанция отличается высокой производительностью — ее общая мощность по выработке электроэнергии составит 356 МВт.

Объекты такого типа востребованы в удаленных районах, где отсутствует возможность или существенно затруднена прокладка газовых сетей, а также сооружение наземных стационарных электростанций. В частности, проектируемая электростанция рассчитана на работу в суровых климатических условиях при температуре до –40 °С.

Судно проектируется на класс РС. Символ класса: **KE⊗ AUT1-ICS ANTI-ICE WINTERIZATION(–40) FSO Gas carrier type 2G RGU Berth-connected ship(S) Floating power plant.**

### РС РАЗАРАБОТАЛ НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ОБОРУДОВАНИЮ СУДОВ DAS

Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) разработал требования по оборудованию судов двойного действия (Double Acting Ship — DAS).

Соответствующее циркулярное письмо № 315-12-1589ц размещено в открытом доступе в разделе «Онлайн информация — Циркулярные письма» на официальном сайте РС. Документ вступит в силу с 1 августа 2021 года.

Циркулярное письмо вводит в Правила классификации и постройки морских судов требования для судов двойного действия к конструкции кормового поста управления судном, составу, расположению и конфигурации на нем радио-, навигационного, электрического оборудования, оборудования автоматизации, а также требования по отображению навигационной информации. Кормовой пост на судах DAS служит для навигации и управления судном при длительном движении во льдах кормой вперед.

Новые требования сформулированы на основе результатов научно-исследовательской работы, выполненной по заказу РС, а также накопленного Регистром практического опыта классификации таких судов, который включил свыше 10 проектов, в т.ч. суда для проекта Ямал СПГ.

УДК 629.5.035-83

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ СУДОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

**Л.Н. Токарев**, д-р техн. наук., ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург  
**Д.А. Макаров**, канд. техн. наук, АО «ОКБ «Аэрокосмические системы», Дубна  
**А.В. Григорьев**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,  
e-mail: info@eds-marine.ru

В статье рассмотрены особенности работы гребного электродвигателя в составе судовой системы электродвижения с полупроводниковым преобразователем. Опыт эксплуатации систем электродвижения и результаты компьютерного моделирования показывают, что при питании гребного электродвигателя от полупроводникового преобразователя в электрической сети могут наблюдаться кратковременные всплески напряжения, значительно превышающие номинальное значение. Появление импульсного напряжения высокой величины связано с широтно-импульсной модуляцией транзисторов автономного инвертора, который входит в состав полупроводникового преобразователя. Наличие импульсов может привести к пробое изоляции гребного электродвигателя и отказу системы электродвижения. Для оценки опасности возникновения перенапряжений в цепи питания гребного электродвигателя необходимо на стадии технического проектирования провести моделирование физических процессов в системе электродвижения судна. Для подтверждения полученных расчетным путем результатов целесообразно проведение экспериментальных исследований перенапряжений на обмотках гребного электродвигателя на физических моделях с применением прототипа полупроводникового преобразователя частоты.

*Ключевые слова:* электродвижение судна, гребной электродвигатель, полупроводниковые преобразователи

## FEATURES OF PROPULSION MOTORS OPERATION AS A PART OF SHIP ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS

**L.N. Tokarev**, DSc, Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg  
**D.A. Makarov**, PhD, JSC "Aerospace systems", Dubna  
**A.V. Grigoryev**, PhD, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg,  
e-mail: info@eds-marine.ru

This article discusses the features of operation of the propulsion motor as part of the ship electric propulsion system with a semiconductor converter. The experience in operating electric propulsion systems and the results of computer simulation show that when the propulsion motor is powered from a semiconductor converter, short-duration voltage surges can be observed in the electrical network that significantly exceed the rated value. The appearance of a high pulse voltage is associated with the pulse-width modulation of transistors of an autonomous inverter within the semiconductor converter. The presence of pulses may lead to breakdown of the propulsion motor insulation and failure of the electric propulsion system. To assess the risk of overvoltage in the power supply circuit of the propulsion motor, it is necessary to simulate physical processes in the ship electric propulsion system at the engineering design stage. To confirm the results obtained by calculation, it is also advisable to conduct experimental studies of overvoltage on the windings of propulsion motor on physical models using a prototype semiconductor frequency converter.

*Keywords:* electric ship propulsion, electric propulsion motor, semiconductor converters

Расчеты переходных процессов в гребных электрических установках (ГЭУ) с полупроводниковыми преобразователями (ПП) показывают, что при запираии транзисторов инвертора преобразователя частоты возникают перенапряжения, способные пробить изоляцию гребных электродвигателей (ГЭД). Особенностью данных перенапряжений является их чрезвычайно малая длительность, составляющая единицы и доли микросекунд. Специалисты могут не зафиксировать импульсы такого вида, не имея измерительной аппаратуры (осциллографов) очень высокого временного разрешения.

Для оценки возможности возникновения перенапряжений высокого уровня в системе электродвижения с преобразователем частоты рассмотрим структурную схему, представленную на рис. 1.

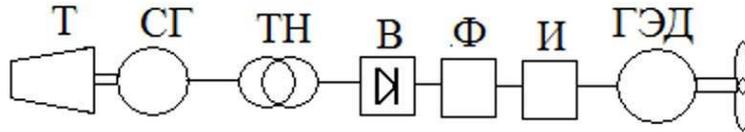


Рис. 1 Структурная схема системы электродвижения:

$T$  — турбина;  $CG$  — синхронный генератор;  $TH$  — трансформатор напряжения;  $B$  — выпрямитель;  $\Phi$  — фильтр;  $I$  — инвертор;  $ГЭД$  — гребной электродвигатель

Импульсные перенапряжения малой длительности величиной в десятки и более киловольт в системе электродвижения (СЭД) могут возникать в цепях инвертора, питающего обмотки ГЭД. Основной причиной перенапряжений являются ЭДС самоиндукции, возникающие в результате быстрого уменьшения тока в цепях с индуктивностями, в том числе в обмотках двигателя, при запираии транзисторов инвертора.

В научной литературе по системам электродвижения не приводятся материалы по математическому описанию переходных процессов в электрических цепях, формирующих каждый отдельный импульс тока и напряжения при широтно-импульсном управлении силовыми транзисторами.

В данной статье рассматриваются процессы, возникающих при запираии транзисторов инвертора в составе преобразователя частоты.

Вариант принципиальной схемы силовой части преобразователя частоты с трехуровневым инвертором приведен на рис. 2.

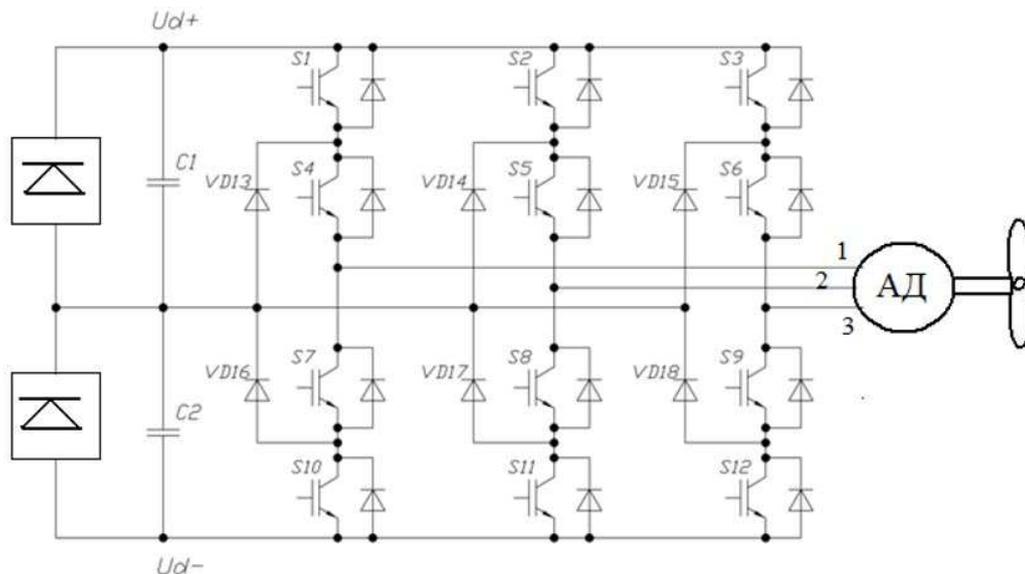


Рис. 2 Схема силовой части инвертора:

$S$  — транзисторы;  $VD$  — диоды;  $C$  — конденсаторы фильтра,  $U_d$  — напряжение выпрямителей звена постоянного тока,  $AD$  — асинхронный двигатель

В соответствие со схемой инвертора, постоянное напряжение выпрямителя, из которого инвертор формирует синусоиды изменяемой частоты на клеммах ГЭД, получается с помощью полупроводниковых выпрямителей. Выпрямленное напряжение фильтруется конденсаторами С1 и С2. Напряжение на обмотках ГЭД, в данном случае асинхронного, формируется системой управления инвертором в виде чередующихся прямоугольных импульсов, представленных на рис. 3.

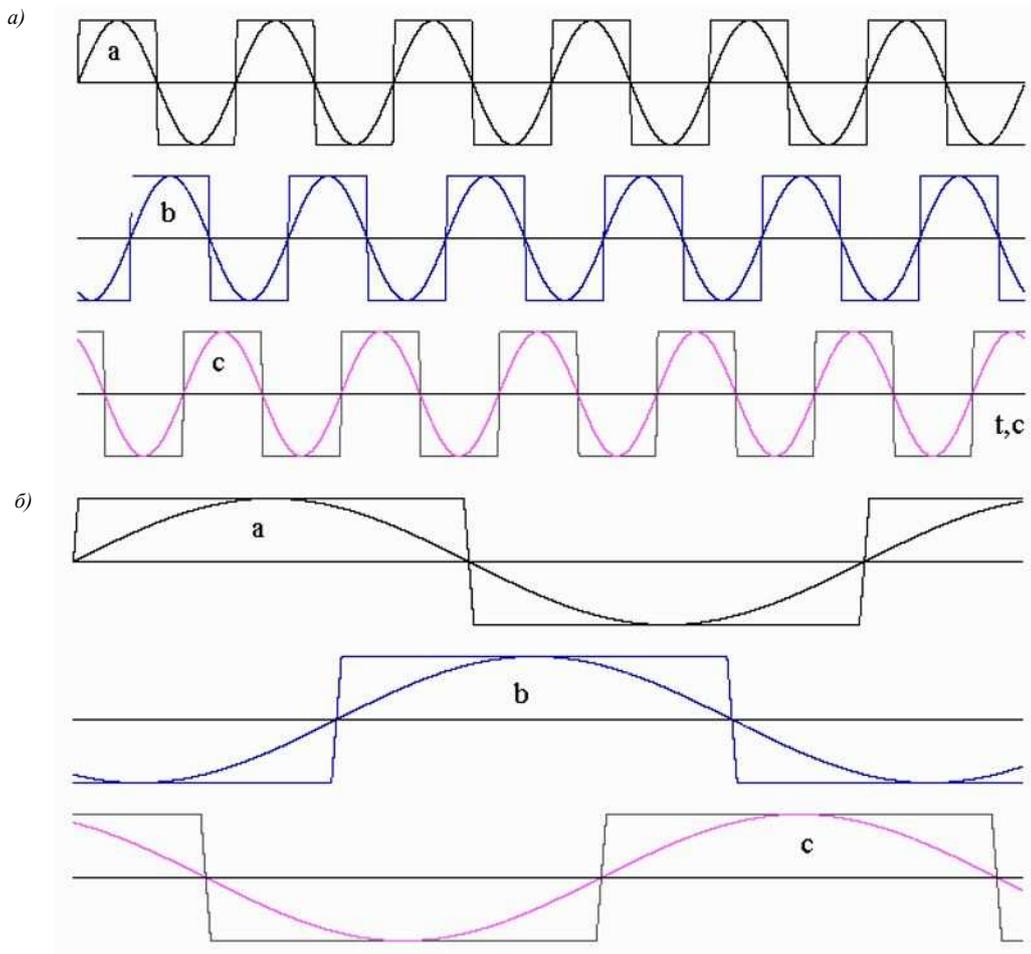


Рис. 3 Мгновенные значения выходного напряжения инвертора:  
*a* — частота 50 Гц; *б* — частота 5 Гц

Меня частоту следования импульсов, можно изменять частоту напряжения на обмотках двигателя, как это показано на рис. 3.

Для приближения формы напряжения и тока к синусоидальной используется широтно-импульсная модуляция, которая заключается в разделении каждого из прямоугольных импульсов на пакет, состоящий из множества составляющих, неизменных по величине, но изменяемых по времени существования.

Один из результатов воздействия закона управления импульсами на среднее значение тока в обмотках двигателя показан на рис. 3. В данном случае при одних и тех же периоде следования и напряжении питания, ширина каждого из отдельных импульсов напряжения менялась так, чтобы среднее значение тока в начале периода синусоиды было малым, а затем, с течением времени, сначала увеличивалось, затем уменьшалось, образуя переменный синусоидальный ток.

Существование пачек импульсов напряжения иллюстрирует приведенная на рис. 4 осциллограмма напряжений на выходе инвертора одного из образцов одноуровневого преобразователя частоты, управляющего частотой вращения гребного асинхронного двигателя, спроектированного в России для судна с электродвижением переменного тока.

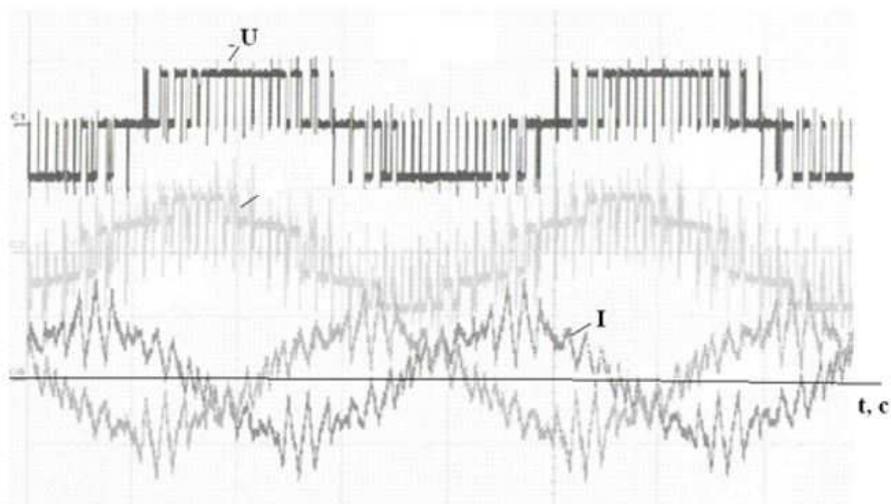


Рис. 4 Осциллограмма напряжений и токов на якорной обмотке асинхронного ГЭД

В верхней части рисунка показано, как широтно-импульсная модуляция преобразует прямоугольные импульсы напряжения, показанные на рис. 3, в пакеты прямоугольных сигналов переменной длительности. Несовершенство конструкций преобразователей частоты приводило к тому, что высокочастотные колебания огибающих тока в фазах гребного электродвигателя достигали 70 — 80 % амплитуды основной гармоники.

Опыт настроек и конструирования последующих систем позволили улучшать формы кривых тока. Как следует, например, из осциллограммы, представленной на рис. 5, в системе электродвижения ледокола проекта 22220 доля высокочастотной огибающей токов статора ГЭД уменьшена, примерно, до 20 % от амплитуды основной гармоники.

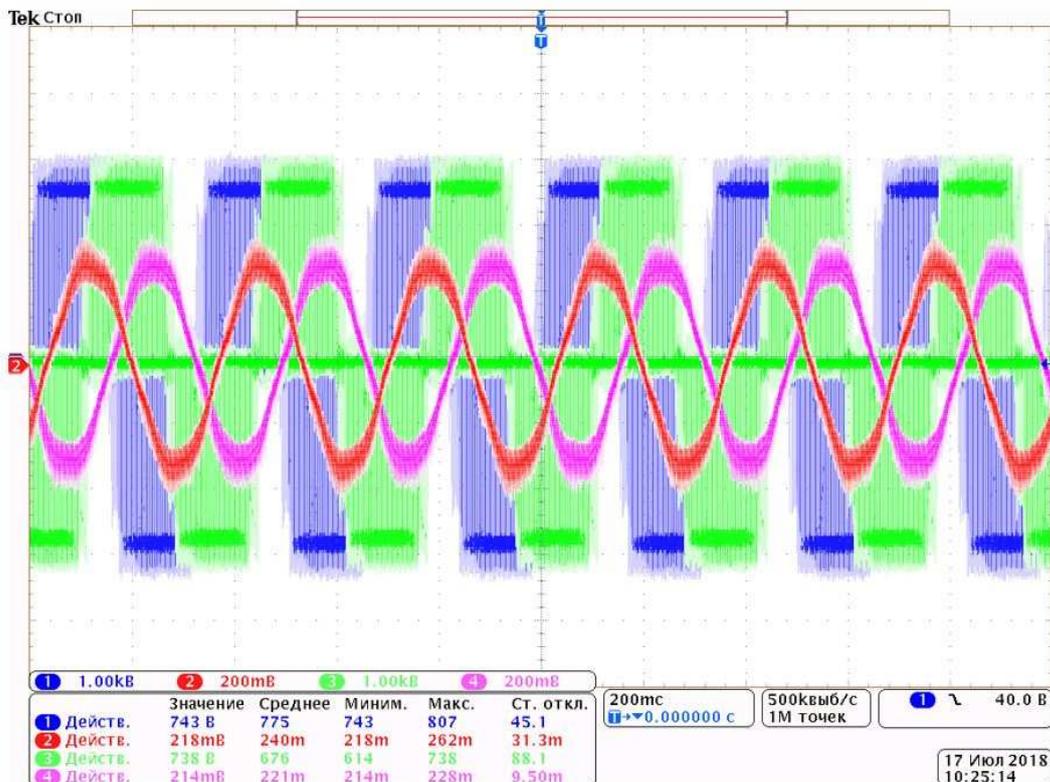


Рис. 5 Прямоугольные широтно-модулированные импульсы напряжения и основной синусоиды тока в якорной обмотке ГЭД

Однако это не значит, что проблема перенапряжений близка к решению. Колебания тока в активно-индуктивных цепях обмоток ГЭД пропорциональны скорости изменения токов и вызывают высокие уровни ЭДС самоиндукции. Учитывая, что ЭДС равна производной от формы кривой изменения магнитного поля, ее величина может достигать значений, опасных для изоляции гребной электрической машины.

Учитывая сказанное выше, для оценки опасности возникновения перенапряжений рассмотрим процессы формирования каждого отдельного импульса тока в обмотках гребного двигателя.

В каждом прямоугольном модулированном импульсе напряжения, формируемом алгоритмом управления силовыми транзисторами инвертора преобразователя частоты, транзисторы периодически включаются и отключаются с частотой модуляции. При этом напряжение выпрямителей периодически прикладывается к паре фазных обмоток гребного двигателя.

Конструктору инверторов важно учитывать, что ЭДС самоиндукции, возникающая при изменении тока импульса и равная, в соответствии с законом электромагнитной индукции, произведению индуктивности обмоток  $L$  на производную тока ( $e = L di/dt$ ) зависит не столько от величины индуктивности обмоток двигателя, сколько от крутизны фронта изменения тока в обмотках.

Рассмотрим, что происходит при подаче сигнала системы управления на отпирание и запираание силовых транзисторов. При отпирании транзисторов  $s1, s4, s8, s11$  в цепи обмоток ГЭД, обозначенных на рис. 2 цифрами 1 и 2, появляется нарастающий ток. Постоянная времени нарастания тока определяется параметрами цепи, индуктивностями и активными сопротивлениями обмоток ГЭД.

Через промежуток времени, определенный частотой модуляции, из системы управления преобразователем подается сигнал на запираание транзисторов  $s1, s4$ . При этом эквивалентное сопротивление цепи «источник питания с фильтрующими конденсаторами  $C1 - C2$ , транзисторы  $S1 - S4$  — обмотки фаз 1 и 2 статора ГЭД» резко возрастает за время не более одной миллионной доли секунды (одной микросекунды).

Из-за возрастания эквивалентного сопротивления запираемых транзисторов начинает резко уменьшаться ток в обмотках двигателя. Изменение тока приводит к возникновению ЭДС самоиндукции на клеммах двигателя. Ориентировочно, время запираания силовых транзисторов составляет от 100 наносекунд до одной-двух мкс. За столько же времени ток в импульсе должен уменьшиться от полного значения, равного нескольким сотням или тысячам ампер, до величины, определяемой параметрами схемы разряда, включающей обмотки ГЭД, переходы «коллектор — эмиттер» открытых транзисторов  $s8 - s11$  и обратных диодов транзисторов  $s7 - s10$ .

Нетрудно подсчитать, что если бы цепь тока разряда не замыкалась через указанные обратные диоды и ток в каждом импульсе при запираании транзисторов снижался бы до нуля, то максимальное значение ЭДС самоиндукции, пропорциональное производной процесса изменения тока и, соответственно, магнитного потока, сцепленного с обмотками электродвигателя, достигало бы огромной величины, измеряемой многими десятками, даже сотнями киловольт.

При многократном воздействии импульсов напряжения в изоляции протекают процессы старения, что несомненно приведет к пробое изоляции с течением времени даже при меньших значениях перенапряжений.

Проблема частично решается тем, что поддерживаемый ЭДС самоиндукции ток через обмотки ГЭД, в данном случае через клеммы 1 — 2, замыкается через открытые транзисторы  $s8, s11$  и обратные диоды, шунтирующие транзисторы  $s7 - s10$ .

Некоторые специалисты проводят анализ процесса переключения тока от одного импульса к другому, принимая мгновенным переход тока из цепи, содержащей транзисторы  $s1, s4$ , обмотки ГЭД, транзисторы  $s8, s11$ , в цепь, содержащую обмотки ГЭД, транзисторы  $s8, s11$  и обратные диоды, шунтирующие транзисторы  $s7, s10$ . Если бы переход действительно был мгновенным, то форма тока имела бы вид синусоиды без высокочастотной составляющей, показанной на рис. 4 и 5.

Реально в момент перехода обратные диоды открываются не мгновенно. Следует учитывать, в частности, что внешняя характеристика диодов имеет «полку» в районе нуля системы координат. Напряжение к диоду приложено, но ток диода равен или близок нулю. Этого достаточно, чтобы в цепи тока появилось большое внутреннее сопротивление, снижающее ток и магнитное поле, сцепленное с обмоткой двигателя. Поскольку эти процессы протекают исключительно быстро, ЭДС самоиндукции достигает больших величин. Кроме того, следует иметь в виду, что в цепь разряда включается дополнительная индуктивность кабелей и шин, соединяющих обмотки двигателя с транзисторами и обратных диодов с транзистором  $s4$ .

Никакие технические средства, в виде, например, LC-цепей, шунтирующих обмотки ГЭД, специальных полупроводниковых ограничителей, например, варисторов, и др. не дают требуемого эффекта снижения перенапряжений. Изоляция обмоток ГЭД в процессе эксплуатации будет постоянно подвергаться «бомбардировке» импульсами перенапряжений.

Следует обратить внимание на очень важное обстоятельство. При напряжении ГЭД до 1000 В пробоя изоляции, как правило, не наблюдается. А если пробой и происходит, то причины их объясняются какими угодно физическими факторами, только не перенапряжениями. Нельзя исключить, что при очень малой длительности импульсов перенапряжений потери энергии на процессы релаксационных видов поляризации в изоляции, на движение сквозных зарядов так распределяются в массе диэлектрика, что изоляция машин сохраняет свои диэлектрические свойства.

При высоком напряжении многократное воздействие коротких импульсов перенапряжений на процессы переноса зарядов очевидно чаще может приводить к необратимому разрушению структуры изоляционных материалов.

Важным обстоятельством является то, что любой процесс изменения тока в цепи ГЭУ неразрывно связан с изменением энергии, заключенной в магнитном поле. Любое действие, направленное на изменение тока, например, разрыв электрической цепи механическим выключателем или полупроводниковым коммутатором, неизбежно сопровождается изменением энергии и преобразованием энергии в тепло. Чем большую часть энергии мы своими действиями преобразуем и чем меньше времени выделяем на преобразование, тем большее напряжение возникает в электрической цепи. Любые технические средства уменьшения ЭДС самоиндукции не дадут эффекта.

Из вышесказанного следуют, что для исключения вероятности пробоя изоляции электрических машин, входящих в состав ГЭУ, необходимо:

1. провести математическое и компьютерное моделирование ГЭУ с расчетом перенапряжений на обмотках ГЭД;
2. провести экспериментальные исследования перенапряжений на обмотках ГЭД на физических моделях ГЭУ с применением прототипа полупроводникового преобразователя частоты;
3. провести исследования изоляционных материалов на воздействие импульсов перенапряжений малой длительности, но высокой величины;
4. по результатам проведенных исследований внести соответствующие корректировки в нормативные документы РС на электрические машины, работающие в составе ГЭУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершинин В.И. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В.И. Вершинин [и др.] // Труды Крыловского государств. науч. центра. — 2019. — № 1 (387). — с. 107 — 122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122.
2. Гельвер Ф.А. Гребная электроэнергетическая установка с общими шинами постоянного тока / Ф. А. Гельвер // Судостроение. — 2018. — № 2. — с. 22 — 27
3. Романовский В.В. Перспективы развития систем электродвижения / В.В. Романовский, Б.В. Никифоров, А.М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2018. — Т. 10 — № 3. — с. 586 — 596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Хватов О.С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О.С. Хватов, И.А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 35. — с. 337 — 340.
5. Росин Е.И. Автоматизированные гребные электрические установки. Движение судна и его главная установка: текст лекции ЛЭТИ / Е.И. Росин. — Л., 1986. — 48 с.
6. Быков А.С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А.С. Быков, В.В. Башаев. — СПб.: Элмор 2004. — 319 с.
7. Романовский В.В. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В.В. Романовский, В.А. Малышев, А.С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169– 181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181
8. Doerry N., John A., and Cy K. History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy. Proceedings of the IEEE 103.12 (2015): pp. 2243 — 2251. DOI: 10.1109/ JPROC.2015.2494159.
9. Chan C.C. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling / C.C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen // IEEE transactions on vehicular technology. — 2009. — Vol. 59. — Is. 2. — pp. 589 — 598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.
10. Chen J.S. Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles / J.S. Chen//Energies. — 2015. — Vol. 8. — Is. 6. — pp. 4697 — 4723. DOI: 10.3390/en8064697.
11. Малышев В.А. Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса / В.А. Малышев, В.С. Иванов, В.С. Соловей // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — с. 172 — 184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.
12. Григорьев А.В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А.В. Григорьев, Р.Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — с. 40 — 46.
13. Григорьев А.В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А.В. Григорьев, Р.Р. Зайнуллин, С.М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — с. 202 — 213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

14. Григорьев А.В. Целесообразность применения СЭД на судах вспомогательного флота. / Григорьев А.В., Штрамбранд В.И., Зайнуллин Р.Р. //Морской флот № 4, 2014, с. 38 — 40.
15. Григорьев А.В. Судовая система электродвижения нового поколения. //Морской флот № 2, 2012, с. 38 — 40.
16. Григорьев А.В. Анализ тормозных режимов гребных электрических установках. / Григорьев А.В., Быков А.С. //Эксплуатация морского транспорта: ежеквартальный сборник научных статей № 3 (61), СПб.: Типография «Феникс», 2010 г., с. 62 — 66.
17. Григорьев А.В. Опыт проектирования и результаты испытаний единой электроэнергетической установки судна «Вайгач». // Изв. вузов. Электромеханика № 4, 2008, с. 28 — 31.
18. Григорьев А.В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения. / Григорьев А.В., Романовский В.В., Зайнуллин Р.Р. //Эксплуатация морского транспорта: ежеквартальный сборник научных статей, выпуск № 4 (62), СПб.: Типография «Феникс», 2010 г., с. 76 — 78.
19. Григорьев А.В. Перспективная судовая единая электроэнергетическая установка. / Григорьев А.В., Глеклер Е.А. // Эксплуатация морского транспорта: ежеквартальный сборник научных статей, выпуск № 3 (53), СПб.: Типография «Феникс», 2008, с. 68 — 70.
20. Григорьев А.В. Опыт эксплуатации электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач». / Григорьев А.В., Лившиц А.И., Глеклер Е.А., Улитовский Д.И. // Судостроение № 6, 2010, с. 29 — 31.

## REFERENCES

1. Vershinin V.I., Makhonin S.V., Parshikov V.A., Khomyak V.A. *Sozdaniye system elektrodvizheniya dlya sudov razlichnogo naznacheniya* [Development of electric propulsion systems for ships of various types] Transactions of the Krylov State Research Centre 1(387) (2019): pp. 107 — 122. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-107-122
2. Gelver F.A. *Grebnyaya elektroenergeticheskaya ustanovka s obshchimi shinami postoyannogo toka* [Shipboard electric propulsion plants with common DC buses] Sudostroenie 2 (2018): pp. 22 — 27.
3. Romanovsky V.V., Nikiforov B.V. Makarov A.M. *Perspektivy razvitiya system elektrodvizheniya* [Prospects for the development of electromotive systems] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 10.3 (2018): pp. 586 — 596. DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.
4. Khvatov O.S., Tarpanov I.A. *Sudovaya propulsivna gibridnaya ustanovka* [Ship hybrid propulsion installation] Bulletin of VSAWT 35 (2013): pp. 337 — 340.
5. Rosin E.I. *Avtomatizirovannyye grebnye elektricheskie ustanovki. Dvizhenie sudna i ego glavnaya ustanovka* [Automated electric propulsion installations. Ship movement and its main propulsion], L., 1986.
6. Bykov A.S., Bashaev V.V. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnykh ledokolov* [Electric propulsion installations of nuclear ice breakers] St. Petersburg, Elmor, 2004.
7. Romanovskiy V.V., Malishev V.A., Bezhik A.S. *Analiz skhemnykh resheniy grebnykh elektricheskikh ustanovok s raspredelennoy shinoy postoyannogo toka* [Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 11.1 (2019): pp. 169 — 181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.
8. Doerry N. History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy /N. Doerry, J. Amy, C. Krolick //Proceedings of the IEEE. — 2015. — Vol. 103. — Is. 12. — pp. 2243 — 2251. DOI: 10.1109/PROC.2015.2494159.
9. Chan C.C. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling / C.C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen // IEEE transactions on vehicular technology. — 2009. — Vol. 59. — Is. 2. — pp. 589 — 598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.
10. Chen J.S. Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles /J.S. Chen // Energies. — 2015. — Vol. 8. — Is. 6. — pp. 4697 — 4723. DOI: 10.3390/en8064697.
11. Malyshev V.A., Ivanov V.S., Solovey V.S. *Raschet i vybor tormoznykh rezistorov grebnoy elektricheskoy ustanovki tankera ledovogo klassa* [Calculation and selection of brake resistors for electric propulsion installation of ice class tanker] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 5(39) (2016): 172–184. DOI: 10.21821/2309- 5180-2016-8-5-172-1844.
12. Grigorev A.V., Zaynullin R.R. *Analiz vozmozhnosti i tselesoobraznosti primeneniya system elektrodvizheniya na sudakh vspomogatelnogo flota* [Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 5(27) (2014): pp. 40 — 46.
13. Grigoryev A.V., Zaynullin R.R., Malyshev S.M. *Perspektivy primeneniya staticheskikh istochnikov elektroenergii na sudakh s sistemami elektrodvizheniya* [Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants] Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 12.1 (2020): pp. 202 — 213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020- 12-1-202-213/
14. Grigorev A.V., Shtrambrand V.I., Zaynullin R.R. *Tselesoobraznost primeneniya SED na sudakh vspomogatelnogo flota* [Practicability of electric propulsion application on vessels of auxiliary fleet] Morskoy flot 4(2014): pp. 38 — 40.
15. Grigorev A.V. *Sudovaya sistema elektrodvizheniya novogo pokoleniya* [Ship electric propulsion system of new generation] Morskoy flot 2(2012): pp. 38 — 40.
16. Grigorev A.V., Bykov A.S. *Analiz tormoznykh rezhimov grebnykh elektricheskikh ustanovok* [Analysis of breaking regimes of electric propulsion installations] Eksploatatsiya morskogo transporta: ezhekvaralniyi sbornik nauchnykh statey 3(61) (2010): pp. 62 — 66.
17. Grigorev A.V. *Opyt proektirovaniya i rezul'taty ispytaniy edinoy elektroenergeticheskoy ustanovki sudna "Vaigach"* [Experience of designing and testing results of unified electric power installation of "Vaigach" vessel]. Izv. vuzov. Elektromekhanika 4 (2008): pp. 28 — 31.
18. Grigorev A.V., Romanovskiy V.V., Zaynullin R.R. *Skhemye resheniya perspektivnykh nizkovoltnykh sudovykh sistem elektrodvizheniya* [Circuit solutions of long range low-voltage ship electrical propulsion plants] Eksploatatsiya morskogo transporta 4(62)(2010): pp. 76 — 78.
19. Grigorev A.V., Glekler E.A. *Perspektivnaya sudovaya edinaya elektroenergeticheskaya ustanovka* [Long range unified ship electric power installation] Eksploatatsiya morskogo transporta: 3 (53) (2008): pp 68 — 70.
20. Grigorev A.V., Livshits A.I., Glekler E.A., Ulitovskii D.I. *Opyt eksploatatsii elektroenergeticheskoi ustanovki gidrograficheskogo sudna "Vaigach"* [Experience of application of electric power plant of hydrographic vessel "Vaigach"], Sudostroenie 6 (2010): pp. 29 — 31.

# 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](http://www.translit.ru) (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

**2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.**

**2.3.1** Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

**.1** полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

**.2** описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziologia [Neurophysiology]*. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

**2.3.2** Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

**2.3.3** Заглавие статьи не берется в кавычки.

**2.3.4** Год ставится за заглавием журнала.

**2.3.5** Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

**2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.**

**2.4.1** Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

**2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.**

**2.5.1** Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed 22.05.2012).

**2.5.2** Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem"* [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](http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html). (accessed 23.06.2013).

#### 2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

#### 2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

#### 3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала <https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php>.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

#### 3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

- цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

- краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

- следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

- не включать несущественные детали;

- обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

- использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

- выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

## 4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация — книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

## 5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовки, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

## 6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

**6.1** Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (boiko.ms@rs-class.org).

**6.2** Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

**6.3** По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

**6.4** Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

**6.5** Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

**6.6** Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.



В оформлении издания использовались графические материалы  
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>  
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>  
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>  
[www.fonstola.ru/](http://www.fonstola.ru/)  
[www.wallpapers.ru/](http://www.wallpapers.ru/)  
<http://www.ye42oester.nl/>  
<http://miraziz.uz/>  
<http://www.radioscanner.ru/>  
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>  
<http://www.russiapost.su/archives/12268>  
<http://utimenews.org/ru/>  
<http://kmtп.ru/>  
<http://www.efg-berlin.de/>  
<http://maritimeforum.net/>  
<http://korabley.net/>  
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

Фото для обложки журнала предоставлено Гильямировым Евгением Борисовичем,  
старшим инженером-инспектором Мурманского филиала РС

Российский морской регистр судоходства  
**Журнал**  
**«Научно-технический сборник**  
**Российского морского регистра судоходства»**  
**вып. 62/63**

*Редакционная коллегия журнала*

Редактор *А.В. Спиленко*  
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*  
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 13.08.21. Формат 60 × 84/8  
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства  
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8  
[www.rs-class.org/ru/](http://www.rs-class.org/ru/)