

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

**МОРСКИЕ АВТОНОМНЫЕ НАДВОДНЫЕ СУДА**  
ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО СУДОВОЖДЕНИЯ

**МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ**  
ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**СУДА ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ**  
ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА ВО ЛЬДАХ



№ 74  
ИЮЛЬ  
2024

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

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.А. Кутейников

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

ISSN 2223-7097

#### **Редакционная коллегия**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В.Н. Тряскин – 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.**

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor-in-Chief

Mikhail Kuteynikov

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

ISSN 2223-7097

#### **Editorial board**

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

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

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

Andrey Grigoriev – Candidate of Technical Science, Admiral

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

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

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

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

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

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

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

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

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

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

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

Subscription index is 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

№ 74

## RESEARCH BULLETIN BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

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

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

Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

2.5.18 – Проектирование и конструкция судов

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

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

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

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

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

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

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

2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics

2.5.18 – Design and construction of ships

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

2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург  
2024



## СОДЕРЖАНИЕ

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

- Чудаков Е.В., Молчанова Н.Ф., Грищенко Е.С., Иксанов М.В.* Роль титана в обеспечении бактериальной чистоты питьевой воды на судах . . . . . 4
- E.V. Chudakov, N.F. Molchanova, E.S. Grischenko, M.V. Iksanov* Role of titanium in ensuring bacterial purity of drinking water on ships
- Тряскин В.Н., Кутейников М.А., Рудь С.О., Крупина Н.А., Кулеши В.А.* Методические рекомендации для обоснования допустимых условий эксплуатации судна во льдах . . . . . 11
- V.N. Tryaskin, M.A. Kuteynikov, S.O. Rud, N.A. Krupina, V.A. Kulesh* Methodological recommendations for justification of allowable conditions for operating of ships in ice

### МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

- Чебан Е.Ю., Никущенко Д.В., Старкова Т.В., Жигалов Д.О.* Предварительная оценка гидродинамических характеристик большегрузного катамарана на мелководье с помощью численных методов . . . . . 23
- E.Yu. Cheban, D.V. Nikushchenko, T.V. Starkova, D.O. Zhigalov* Preliminary estimation of hydrodynamic parameters of a large cargo catamaran in shallow water using numerical methods
- Семенова В.Ю., Альбаев Д.А.* Определение ускорений в произвольных точках судна на основании нелинейной теории в условиях регулярного волнения. . . . . 36
- V.Yu. Semenova, D.A. Albayev* Determination of accelerations at arbitrary points of a ship based on nonlinear theory in regular waves

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

- Тряскин В.Н., Мороз В.С.* Методика и алгоритм определения допустимых скоростей при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля . . . . . 47
- V.N. Tryaskin, V.S. Moroz* Methodology and algorithm for determination of permissible speeds at a ship's vertical side crash against the ice field edge

**МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА**  
**MATERIALS AND WELDING**

*Филин В.Ю., Ильин А.В., Ларионов А.В., Назарова Е.Д.* Обоснование требований МАКО и Регистра к выбору материалов корпусных конструкций, эксплуатируемых при низких климатических температурах Часть 2 — сопротивление распространению трещины . . . . . 56

*V.Yu. Filin, A.V. Ilyin, A.V. Larionov, E.D. Nazarova* Substantiation of IACS and RS requirements for the selection of hull materials for structures operated at low climatic temperatures  
Part 2 – resistance to crack propagation

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

*Пустовой И.Ф., Сорокин Д.С.* Применение технологии «гелевая мультимодальная добавка FE-DO» для восстановления параметров работы судового оборудования . . . . . 70

*I.F. Pustovoy, D.S. Sorokin* Application of "gel multimodal additive FE-DO technology" for operation parameters restoration of shipboard machinery and equipment

**КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ СУДОВ**  
**CYBERSECURITY OF SEA-GOING SHIPS**

*Окунев В.А.* Нормативные документы по обеспечению кибербезопасности и киберустойчивости морских судов . . . . . 79

*V.A. Okunev* Regulatory documents on cybersecurity and cyber resilience of sea-going ships

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

*Айзинов С.Д., Буцанец А.А., Смоленцев С.В., Сенченко В.Г., Лопатин М.С.* Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения . . . . . 83

*S.D. Aysinov, A.A. Butsanets, S.V. Smolentsev, V.G. Senchenko, M.S. Lopatin* Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping



## БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 669.295:629.5.045.64

### РОЛЬ ТИТАНА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЧИСТОТЫ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ НА СУДАХ

**Е.В. Чудаков**, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, e-mail: mail@crism.ru

**Н.Ф. Молчанова**, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

**Е.С. Грищенко**, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

**М.В. Иксанов**, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

В работе исследуется возможность использования титана в качестве материала для судовых систем питьевой воды. Проведены испытания по оценке санитарно-гигиенических свойств титанового сплава VT1-0 и исследовано качество питьевой воды, находящейся с ним в контакте. Установлено, что титановый сплав не оказывает влияние на качество воды, что подтверждается как лабораторными, так и натурными испытаниями. По результатам испытаний получено Санитарно-эпидемиологическое заключение от департамента государственного санитарно-эпидемиологического надзора на транспорте МЗ РФ. ЦКБ «Балтсудопроект» выполнена опытная проработка судовой системы водоснабжения питьевой воды с применением титановых сплавов.

**Ключевые слова:** титан, система питьевой воды, санитарно-гигиенические свойства, санитарные нормы, обеззараживание воды, бактерии

### ROLE OF TITANIUM IN ENSURING BACTERIAL PURITY OF DRINKING WATER ON SHIPS

**E.V. Chudakov**, PhD, National Research Center Kurchatov Institute — Central Research Institute "Prometey", St. Petersburg, e-mail: mail@crism.ru

**N.F. Molchanova**, National Research Center Kurchatov Institute — Central Research Institute "Prometey", St. Petersburg

**E.S. Grisichenko**, National Research Center Kurchatov Institute — Central Research Institute "Prometey", St. Petersburg

**M.V. Iksanov**, National Research Center Kurchatov Institute — Central Research Institute "Prometey", St. Petersburg

The study explores the possibility of using titanium as a material for marine drinking water systems. Tests have been conducted to assess the sanitary and hygienic properties of the VT1-0 titanium alloy and the quality of the drinking water in contact with it has been investigated. It has been found that the titanium alloy does not affect the quality of water, which is confirmed by both laboratory and field tests. Based on the test results, a Sanitary and Epidemiological Conclusion has been received from the Department of State Sanitary and Epidemiological Surveillance on Transport of the Ministry of Health of the Russian Federation. CDB "Baltsudoproekt" has carried out pilot study of the ship's drinking water supply system using titanium alloys.

**Keywords:** titanium, drinking water system, sanitary and hygienic properties, sanitary standards, water disinfection, bacteria

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем, выдвигаемых Международной морской организацией (ИМО) перед правительствами и судовладельцами, является разработка мероприятий, направленных на защиту морской среды от загрязнения с судов и улучшение экологической ситуации в портах, повышение комфортности обитания на судах и сохранение здоровья членов экипажей плавающих судов.

Одним из основных факторов, влияющих на здоровье членов экипажа, является вода. Вода может служить одним из возможных путей распространения инфекционных заболеваний «от худой воды матросы начинают чувствовать боль в желудке и появляется резь в животе» писал морской врач Дроздов [1].

Впервые требования по поддержанию «доброкачественности питьевой воды» на судах были установлены Петром I и включены в корабельный устав [1].

Можно утверждать, что состояние здоровья экипажей судов зависит от качества и количества водопотребления, а система водоснабжения в целом характеризует обитаемость судна.

На судах старой постройки было принято разделение систем водоснабжения на питьевую и мытьевую, что определялось различными требованиями к воде соответствующего назначения. В настоящее время к воде независимо от целей ее использования предъявляются одни и те же требования на соответствие ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая» [2]. Учитывая важность проблемы обеспечения экипажи судов качественной пресной водой, независимо от ее назначения и с целью повышения санитарно-эпидемиологических требований к системам водоснабжения судов Международной организацией по стандартизации были приняты стандарты, устанавливающие правила проектирования судовых систем питьевой воды без разделения ее на воду для питья и удовлетворения санитарно-гигиенических нужд.

В соответствии с этими требованиями в 2010 году был гармонизирован российский отраслевой стандарт «Система питьевой воды судовая. Правила проектирования» [2]. При разработке стандарта были учтены требования международных нормативных документов и принята единая система питьевой воды. Необходимость изменений была вызвана повышением требований по защите питьевой воды от загрязнения и исключения попадания в систему непригодной для питья воды. На основании этого автономные системы питьевой воды и хозяйственно-бытовых потребностей были исключены, а вся пресная вода на судне должна соответствовать единым требованиям.

Система питьевой воды состоит из: емкости для хранения запасов питьевой воды, трубопроводов, арматуры, насосов, устройств для очистки, обеззараживания, подогрева и охлаждения, контрольно-измерительной аппаратуры и др. Количество цистерн для хранения запаса воды должно быть не менее двух, так как свежую воду необходимо принимать в свободные цистерны, не допуская ее смешивания со старой неизрасходованной водой.

Для изготовления цистерн применяют коррозионно-стойкую сталь или углеродистую сталь с защитными покрытиями.

Коррозионные разрушения в цистернах обычно незначительны, но защита и ремонт этих трудно вентилируемых емкостей является трудозатратной операцией, выполняемой тяжелых условиях.

Во всех случаях при использовании цистерн с покрытиями или нержавеющей сталью воду необходимо подвергать обеззараживанию каждые 10 сут [1].

Обеззараживание питьевой воды на судах можно выполнять различными методами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее распространенными являются: хлорирование, серебрение, озонирование и т.п.

При методе обеззараживания воды хлором ухудшаются органолептические показатели воды и накапливаются устойчивые хлорорганические соединения, обладающие канцерогенным и мутагенным действием. Бактерицидный эффект при хлорировании проявляется при концентрации активного хлора в воде 0,1 — 0,7 мг/л. При снижении концентрации хлора в воде наблюдается реактивация микроорганизмов и их размножение.

При использовании метода серебрения в воде наблюдается его выраженное влияние на уничтожение бактерий группы кишечной палочки, но при этом серебро не проявляет антимикробного действия по отношению к сапрофитным бактериям, оказывающих значительное влияние на качество воды при длительном хранении. Кроме того, серебро вступает во взаимодействие с поверхностями цистерн и трубопроводов, переходя в неактивное состояние.

Заменив хлорирование и серебрение пресной воды в судовых условиях и одновременно повысить качество питьевой воды стало возможно за счет применения титановых сплавов, бактериостатический эффект которых был зарегистрирован в отношении микрофлоры пресной воды и при очистке воды от органических загрязнений титановыми коагулянтами [3 — 5]. Одним из основных гигиенических

показателей, характеризующих любое обеззараживающее средство, является степень его воздействия на микроорганизмы. Известно, что титановые сплавы являются инертными по отношению ко всем живым тканям. Наиболее подходящим материалом для применения в судовых системах питьевой воды можно считать титан марки ВТ1-0.

Основные механические свойства сплава ВТ1-0 при 20 °С:

предел прочности — 45 — 60 кгс/мм<sup>2</sup>;

предел текучести — 38 — 50 кгс/мм<sup>2</sup>;

относительное удлинение — 12,5 %;

относительное сужение — 45 %.

Отсутствие технических проблем для решения вопроса о применении титановых сплавов в судовой системе питьевой воды сплавов показывает, что это технически и экологически оправдано. Однако, для использования нового материала главным требованием является наличие действующего санитарно-эпидемиологического заключения, выданного Государственной санитарно-эпидемиологической службой РФ.

Для решения этого вопроса были проведены испытания по оценке санитарно-гигиенических свойств титанового сплава и исследованию качества питьевой воды, находящейся с ним в контакте.

## 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Под качеством воды понимают совокупность микробиологических, токсикологических и органолептических показателей.

Санитарно-эпидемиологическая безопасность и качество питьевой воды по ГОСТ 2874 оценивается тремя группами нормативов, соблюдение которых обеспечивает: благоприятные органолептические свойства воды, безвредность ее химического состава (санитарно-токсикологические показатели) и эпидемиологическую безопасность (бактериологические показатели).

Работы по исследованию качества питьевой воды, находящейся в контакте с титановыми сплавами, были выполнены в Государственном лабораторном центре Государственного санитарно-эпидемиологического надзора РФ. Они включали лабораторные испытания образцов и натурные испытания маломасштабной модели цистерны питьевой воды. Для лабораторных исследований были изготовлены образцы в форме пластин с размерами 2 × 100 × 100 мм, соответствующие требованиям Государственной санитарно-эпидемиологической службы. Испытывали образцы в исходном состоянии из основного металла и образцы, по периметру которых был наплавлен сварной шов, выполненный сварочной проволокой марки 2В.

Для проведения исследований в натуральных условиях была спроектирована ЦНИИМФ маломасштабная сварная модель цистерны, применительно к транспортным судам проекта 17340 и изготовлена в ЦНИИ КМ «Прометей» (см. рис. 1).



Рис. 1 Модель цистерны объемом 100 литров из сплава ВТ1-0

Подготовка поверхности образцов и модели цистерны к проведению исследований выполнена в соответствии с действующими Санитарными правилами для морских судов [6]. В настоящей работе не проводилось специальных исследований по механизму угнетения микроорганизмов в микрофлоре пресной воды

При проведении натуральных испытаний воду заливали из водопровода, обеззараживание не применяли, что существенно ужесточило условия проведения испытаний.

Исследования по санитарно-гигиенической оценке сплава марки ВТ1-0, находящегося в контакте с питьевой водой, состояли из следующих этапов:

- выполнение санитарно-химических исследований проб воды;
- выполнение санитарно-токсикологических исследований;
- выполнение санитарно-бактериологических исследований.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты санитарно-химических исследований воды, контактирующей с образцами из сплава марки ВТ1-0 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Санитарно-химические исследования воды, находящейся в контакте с титановыми образцами

Определяемые показатели	Результаты санитарно-химических испытаний, в зависимости от времени испытаний (в конце каждой недели)						Нормативы допустимых значений
	1-ая	2-ая	3-я	4-я	5-я	6-я	
Запах (баллы)	0	0	0	0	0	0	<2
Привкус (баллы)	0	0	0	0	0	0	<2
Цветность (градусы)	2	2	2	2	2	2	<20
Прозрачность (в см)	>30	>30	>30	>30	>30	>30	не менее 30
pH	7,0	7,0	7,1	7,0	7,3	7,5	6,0 — 9,0
Железо (мг)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,3
Алюминий (мг/л)	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	<0,1
Хром (мг/л)	0,0015	0,0010	0,0012	0,0015	0,0016	0,0016	<0,5
Никель (мг/л)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,1
Титан (мг/л)	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,1
Свинец (мг/л)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	<0,03
Окисляемость, (мг O <sub>2</sub> /л)	0,1	0,45	1,06	1,61	1,74	2,55	<15,0

За шестинедельный срок эксперимента показатели органолептических свойств питьевой воды, находящейся в контакте с образцами из титанового сплава: запах, привкус, цветность, прозрачность, не изменили первоначальных значений: остались в пределах нормативов. В начале и в конце эксперимента выявлено незначительное повышение на 0,5 м. моль/л жесткости воды (показатель pH) и окисляемости до 2,55 мгO<sub>2</sub>/л, но эти значения находятся в пределах допускаемых нормативов и наблюдаются в диапазоне, характерном для чистых вод. Санитарно-химические свойства питьевой воды, полностью соответствуют нормативам на протяжении всего времени испытаний.

Результаты санитарно-химических и санитарно-бактериологических исследований питьевой воды, находящейся в модели цистерны приведены в табл. 2. Модель цистерны, установленная на плавающее судно-водолей «Дон», в течение 30 сут находилась в ходовых условиях, т.е. подвергалась качке, волнениям на море. Обеззараживание воды при этом не применяли.

Эти результаты показывают, что в питьевой воде в течение 30 сут, не обнаружено ни запаха, ни привкуса. Вода не изменила прозрачности и цветности. Все значения соответствовали нормативам.

В соответствии с санитарными нормами основными показателями бактериальной чистоты питьевой воды являются коли-титр (количество бактерий группы кишечной палочки, определяемое при использовании жидких сред накопления, не менее 330 мл), коли-индекс (число бактерий E-coli на 1 л воды), ОМЧ (общее микробное число микроорганизмов в 1 см<sup>3</sup> воды).

Установлено, что все стандартные показатели бактериальной чистоты после 30-суточной экспозиции питьевой воды соответствуют нормам ГОСТ 2874: коли-титр 333, коли-индекс <3, ОМЧ-0.

Таблица 2

## Санитарно-химические исследования воды, находящейся в маломасштабной модели цистерны в эксплуатационных условиях

Определяемые показатели	Полученные результаты отбора проб в зависимости от времени хранения (недели)			Нормативы допустимых значений
	Загрузка 01.10	За период 01 — 15.10	За период 16 — 31.10	
Запах (баллы)	0	0	0	не более 2
Привкус (баллы)	0	0	0	не более 2
Цветность (градусы)	2	2	2	20
Прозрачность (в см)	> 30	> 30	> 30	не менее 30
рН	7,0	7,0	7,1	6,0 — 9,0
Железо (мг)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,3
Алюминий (мг/л)	не обн.	не обн.	не обн.	< 0,1
Хром (мг/л)	0,0015	0,0010	0,0012	< 0,5
Никель (мг/л)	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,1
Титан (мг/л)	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,1
Свинец (мг/л)	0,00284	0,00282	0,00279	< 0,03
Коли-титр	> 333	> 333	> 333	> 333
Коли-индекс	< 3	< 3	< 3	< 3
ОМЧ	0	0	0	< 100

Санитарно-токсикологические исследования проводили при определении суммарной токсичности по международному стандарту ISO 6341-82 «Качество воды. Определение угнетения подвижности *Daphnia Magna Straus*». В соответствии с международными стандартами маркером токсичности является определение плодовитости и изменение биомассы дафний.

В результате проведения токсикологических экспериментов было установлено, что образцы из титанового сплава марки ВТ1-0 не обладают токсическим действием, не приводят к гибели дафний или изменениям их активности.

Таким образом, установлено, что титановый сплав марки ВТ1-0, за шестинедельный период наблюдения не оказывает влияния на органолептические показатели качества воды и не приводит к изменению исходных значений концентрации химических веществ, в том числе алюминия, железа, хрома, никеля, свинца и титана, встречающихся в природных водах, добавляемых в процессе водообработки или мигрирующих из исследуемых образцов.

Показатели бактериальной чистоты питьевой воды также соответствуют нормам. Показатели коли-индекса < 3 означает, что патогенные микроорганизмы, присутствующие сверх допустимых доз, отсутствуют. Общее микробное число, равное 0, свидетельствует об отсутствии в воде бактерий типа «кишечной палочки». Полученные результаты испытаний титана, находящегося в контакте с питьевой водой, позволяют говорить о реализации гигиенических требований.

Департамент государственного санитарно-эпидемиологического надзора на транспорте МЗ РФ по результатам испытаний выдал Санитарно-эпидемиологическое заключение № 78.01.06.231.П.007664.10.01 на применение титанового сплава марки ВТ1-0 в судовых системах питьевой воды и заключение, что «питьевая вода, контактирующая в течение 30 дней с титановым сплавом марки ВТ1-0 в экспериментальных и натуральных условиях соответствовала требованиям ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая», см. рис. 2.

Опытная проработка судовой системы водоснабжения питьевой воды с применением титановых сплавов была выполнена ЦКБ «Балтсудопроект». Конструктивная схема была разработана применительно к серии транспортных судов лесовозов-пакетовозов проекта 17340. Пресная вода с берега через палубные наливные втулки подается в цистерну запаса, откуда она поступает к потребителям с помощью насосов или пневмоцистерн. Для сохранения качества питьевой воды и подавления микроорганизмов через систему трубопроводов в проекте были предложены трубы из титанового сплава марки ВТ1-0. Указанный проект был рассмотрен и «принят к сведению» Российским морским регистром судоходства (РС). Отсутствие склонности труб из титановых сплавов к струевой коррозии, позволяет увеличить скорость движения воды и уменьшить за счет этого диаметр и толщину стенок титановых труб в 1,5 — 2 раза. Повышенные скорости будут препятствовать застаиванию воды и накоплению патогенных микроорганизмов на стенках трубопроводов, что положительно скажется на качестве питьевой воды при хранении.



Рис. 2 Санитарно-эпидемиологическое заключение на применение сплава BT1-0 в цистернах питьевой воды

Известно, что титановые сплавы успешно применяются в трубопроводах питьевой воды в оффшорной технике [7].

Техническая возможность использования титановых сплавов в судовых системах пресной воды подкреплена нормативной документацией: титановые сплавы введены в разд. 8 части XIII «Материалы» Правил классификации и постройки морских судов РС, а экономическая и экологическая целесообразность представлена на рис. 3.

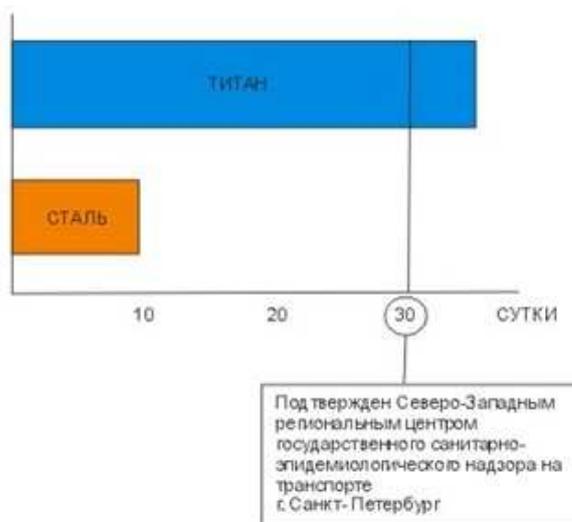


Рис. 3 Сравнение срока сохранности качества питьевой воды требованиям ГОСТ 2874-82 в цистернах из стали и титана

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Применение титанового сплава марки ВТ1-0 для изготовления судовых систем и цистерн питьевой воды:
- разрешено Государственной санитарно-эпидемиологической службой РФ и соответствует современным требованиям международных и отечественных санитарных органов;
  - применение, производство, проектирование титановых сплавов, защита от коррозии материалов, находящихся в контакте с титановыми сплавами, обеспечены нормативной документацией;
  - применение титановых сплавов для систем питьевой воды обеспечит повышение комфортности обитания на судах и снизит заболеваемость членов экипажа за счет повышения качества питьевой воды;
  - применение титановых сплавов для систем хранения питьевой воды является перспективным для судов нового типа танкеров-водозовозов пресной воды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломов О.П. Судовая гигиена / О.П. Ломов. — СПб.: Медицина, 1993. — 206 с.
2. Фомин А.П. О стандарте на правила проектирования судовых систем питьевой воды / А.П. Фомин // Судостроение. — 2010. — № 6, — с. 35 — 37.
3. Иголкин А.И. Исследование бактериостатических свойств титана в отношении микрофлоры пресной воды / А.И. Иголкин, Т.А. Иголкина, — Титан, 2009. — № 3, — с. 50 — 54.
4. Семенова В.Т. К проблеме применения титанового коагулянта / В.Т. Семенова, А.В. Коврякова // Медико-биологические и эколого-гигиенические проблемы оценки и прогнозирования воздействия факторов окружающей среды: сб. статей. — СПб, 1998, — с. 43.
5. Ильюшенко А.Ф. Порошковая металлургия титана в Беларуси: История, современное состояние и перспективы / А.Ф. Ильюшенко, В.В. Савич // Титан. — 2018. — № 1, — с. 16 — 32.
6. Санитарные правила для морских судов, М., Мортехинформреклама, 1984.
7. Леонов В.П. Перспективы применения конструкционных материалов на основе титановых сплавов для оборудования газонефтедобычи на арктическом морском шельфе / В.П. Леонов, А.С. Кудрявцев, Е.В. Чудаков // Нефть. Газ. Новации, 2013. — № 9, — с. 40 — 44.

## REFERENCES

1. Lomov O.P. *Sudovaya gigiena* [Ship hygiene] / O.P. Lomov, SPb.: Meditsina, 1993. — 206 p.
2. Fomin A.P. *O standarte na pravila proektirovaniya sudovykh sistem pityevoj vody* [About the standard on rules of design of ship systems of drinking water]. *Sudostroenie* [Shipbuilding]. 2010; No. 6, pp. 35 — 37.
3. Igolkin A.I., Igolkina T.A. *Issledovanie bakteriostaticheskikh svoystv titana v otnoshenii mikroflory presnoy vody* [Research of bacteriostatic properties of titanium concerning microflora of sweet water]. *Titan* [Titan]; 2009, No. 3, pp. 50 — 54.
4. Semenova V.T., Kovryakova A.V. *K probleme primeneniya titanovogo koagulyanta* [Problems of application of a titanic coagulant]. *Medical and biological and environmental hygienic problems of assessment and prediction of environmental factors impact*, coll. of articles, SPb, 1998, — p. 43.
5. Ilyushenko A.F., Savich V.V. *Poroshkovaya metallurgiya titana v Belarusi: Istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy* [Powder metallurgy of titanium in Belarus: history, current status and prospects]. *Titan* [Titan]; 2018, No. 1, pp. 16 — 32.
6. *Sanitarnye pravila dlya morskikh sudov* [Health regulations for sea vessels], M., Mortehinformreklama, 1984.
7. Leonov V.P., Kudryavtsev A.S., Chudakov E.V. *Perspektivy primeneniya konstrukcionnykh materialov na osnove titanovykh splavov dlya oborudovaniya gazoneftedobychi na arkticheskom morskome shelfe* [Perspectives in Applying Titanium-Based Structural Alloyed Materials for Oil and Gas Production Equipment offshore the Arctic Region]. *Oil. Gas. Innovations*, 2013; No. 9, pp. 40 — 44.

УДК 629.123:532.583.4

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ДОПУСТИМЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА ВО ЛЬДАХ

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

**М.А. Кутейников**, д-р техн. наук, ФГУП «Российский морской Регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

**С.О. Рудь**, ФГУП «Российский морской Регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: rud.so@rs-class.org

**Н.А. Крупина**, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ), Санкт-Петербург, e-mail: olks@aari.ru

**В.А. Кулеш**, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный государственный университет, Владивосток, e-mail: vkulesh@mail.ru

В статье рассмотрены новые методические рекомендации, обеспечивающие возможность разработки Паспорта ледовой безопасности для судов ледового плавания. Рассмотренные рекомендации частично представлены в действующих НМУ РС для решения аналогичных задач. В настоящей статье уделено внимание уточнениям существующих рекомендаций и дана более подробная характеристика вновь разработанным. Даны уточненные рекомендации для определения физико-механических характеристик льда для расчетов ледовой ходкости и ледовой прочности. Предложены практические методы расчета ледовой ходкости судна в различных ледовых условиях (самостоятельно в сплошном и битом льду, в канале за ледоколом) и методика определения достижимых скоростей движения судна при различном проценте использования мощности СЭУ. Уточнены некоторые положения методики оценки безопасных дистанций движения судна в канале за ледоколом при различной толщине и сплоченности льда, в том числе и для судов, оснащенных азимутальными пропульсивными комплексами. Изложены основные положения методики решения задач оценки ледовой прочности — определения допустимых и опасных скоростей движения судна, основанной на гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом. Предложена методика определения допустимых и опасных скоростей движения для судов с бульбовыми обводами, имеющих вертикальные участки борта в районе носового заострения. Указаны особенности определения допустимых скоростей движения в замерзающих акваториях порта судов с низким ледовым классом. Предложена методика оценки предельной толщины льда, которую корпус судна способен выдержать при ледовых сжатиях, основанная на вероятностно-детерминированном подходе к определению нагрузок при ледовых сжатиях.

**Ключевые слова:** судно ледового плавания, достижимые и допустимые скорости движения во льдах, строительная прочность, ледовая прочность, безопасные дистанции, ледовые сжатия

## METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR JUSTIFICATION OF ALLOWABLE CONDITIONS FOR OPERATING OF SHIPS IN ICE

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

**M.A. Kuteynikov**, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

**S.O. Rud**, FAI "Russian Maritime Register of Shipping, Saint-Petersburg", e-mail: rud.so@rs class.org

**N.A. Krupina**, Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), St. Petersburg, e-mail: olks@aari.ru

**V.A. Kulesh**, DSc, professor, Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, e-mail: vkulesh@mail.ru

The article discusses new methodological recommendations that provide the possibility of developing Safety Certificates for ice-going ships. The considered recommendations are partially presented in the existing RS regulatory documents for solving similar problems. This article pays attention to clarifications of existing recommendations and gives a more detailed description of the newly developed ones. Clarified recommendations for determining the physical and mechanical characteristics of ice for calculating ice movability and ice strength have been given. Practical methods for calculating the ice propulsion of a ship in various ice conditions (on its own in solid and broken ice, in a channel behind an icebreaker) and a method for determining the achievable speeds of a ship at different percentages of power utilization of the propulsion system are proposed have been proposed. Some provisions of the methodology for assessing the safe distances of a ship in a channel behind an icebreaker at different ice thickness and concentration have been clarified, including those for ships equipped with azimuthing propulsion systems. The main provisions of the methodology for solving problems of ice strength calculation — determining permissible and dangerous speeds of a ship's movement in ice, based on a hydrodynamic model of the interaction of the ship's hull with ice, have been outlined. A method for determining permissible and dangerous speeds for ships with bulbous hulls and vertical side in the area of the hull bow has been proposed. The features of determining permissible speeds of movement in the freezing waters of the port of ships with a low ice class have also been indicated. A method for estimating the ultimate ice thickness that a ship's hull can withstand during ice compression has been proposed based on a probabilistic-deterministic approach to calculate loads during ice compression.

**Keywords:** ice going vessel, achievable and permissible speeds in ice, building strength, ice strength, safe distances, ice compression

## ВВЕДЕНИЕ

Предыдущие рекомендации для расчета допустимых режимов эксплуатации судна во льдах были разработаны в 2008 году [1] на основе обобщения опыта разработки ледовых паспортов судов, идея создания которых впервые обстоятельно была описана 50 лет назад в монографиях [2, 3], изданных сотрудниками ААНИИ.

Российский морской регистр судоходства (РС) объявил о предоставлении услуг по разработке документа — «Паспорта ледовой безопасности» — на конференции в рамках международной выставки «Нева-2023».

Проблема становится актуальной также в связи с тем, что современные суда ледовых классов, как правило, имеют нетрадиционную форму корпуса, обусловленную желанием судовладельца всемерно повышать вместимость грузовых трюмов, а также применением азимутальных пропульсивных комплексов (ВРК). Это приводит к существенному (практически двойному) уменьшению протяженности носового заострения и, в связи с этим, — к большим углам наклона ватерлинии и борта в районе расчетной ватерлинии. Наличие ВРК обуславливает специфическую форму кормовой оконечности [5]. Такие особенности формы корпуса затрудняют капитану судна оценку допустимых режимов движения во льдах, базируясь только на опыте эксплуатации традиционных судов ледовых классов.

Кроме того, в настоящее время Регистром допускается применение бульбовых обводов и вертикальных бортов в носовой оконечности для судов с ледовым классом вплоть до высокого арктического класса **Arc7**. Методика оценки допустимых скоростей (нормирования ледовой прочности) для таких случаев отсутствует и требуется ее специальная разработка.

Суда с низким ледовым классом могут иметь в районах, подверженных взаимодействию со льдом, продольную систему набора, не характерную для судов ледовых классов. Рекомендации для построения кривых строительной прочности для таких конструкций в существующих НМУ РС не регламентировались.

Требования к конструкциям корпуса из условия ледовых сжатий также определяют допустимые условия эксплуатации. При разработке новых рекомендаций предложено использовать вероятностно-детерминированную модель определения ледовых нагрузок при ледовых сжатиях, разработанную для определения расчетных нагрузок на борта стоечных судов [6]. Модель позволяет получать оценки локальных ледовых нагрузок при сжатиях на конструкции судов, имеющих в средней части вертикальный борт или борт с небольшим углом развала шпангоутов.

Существующие НМУ не содержат рекомендаций для определения достижимых скоростей во льдах при самостоятельном плавании и при движении в канале за ледаколом. Такая информация также необходима и для обоснования допустимых условий ледового плавания.

В настоящей статье рассматриваются обновленные методические рекомендации для обоснования допустимых условий эксплуатации судна во льдах, выполненные коллективом авторов по заказу РС. Рассмотренные рекомендации частично представлены в существующих НМУ РС [4]. В настоящей статье уделено внимание уточнениям существующих положений и дана более подробная характеристика вновь разработанным.

## 1. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЬДА ДЛЯ РАСЧЕТОВ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ И ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ

В существующей редакции Методических рекомендаций приведены приближенные формулы, которые позволяют определить физико-механические и морфометрические характеристики льда, а также расчетные значения условного измерителя прочности льда на раздробление  $a_p$ , которые необходимы для обоснования ледовой прочности корпуса судна. Используются упрощенные (глобальные) критерии: арктические/неарктические моря, сезон навигации, толщина льда, характерный размер льдины. Эти рекомендации с учетом уточнений 2015 года могут быть приняты за основу. Для обновленных расчетных моделей ледовой ходкости в список физико-механических параметров должен быть добавлен коэффициент трения борта судна о лед  $k_f$ , а в перечень морфометрических параметров сплоченность льда  $S_i$ , баллы. В отдельных случаях, учитывая активную навигацию в пресноводных акваториях арктических морей (в первую очередь в Обской губе и Енисейском заливе), в новых НМУ предлагается уточнить рекомендуемую прочность льда при изгибе,  $\sigma_f$ . Для пресного зимнего льда могут быть приняты значения 0,9 — 1,1 МПа, и 0,3 — 0,5 — для летнего пресного льда, ослабленного таянием.

## 2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДНА В РАЗЛИЧНЫХ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ (САМОСТОЯТЕЛЬНО В СПЛОШНОМ И БИТОМ ЛЬДУ, В КАНАЛЕ ЗА ЛЕДОКОЛОМ)

Достижимая скорость при непрерывном движении судна в битых льдах может быть определена с использованием полуэмпирических методов расчета. Стоит отметить, что подавляющее число методов для оценки ледовой ходкости предназначены для анализа движения судна в сплошном ровном льду и расчета ледопроеходимости, как паспортной характеристики любого судна ледового плавания. Движению в битом льду посвящено существенно меньше методов. Методики расчета ледового сопротивления в мелкобитом и крупнобитом льду отличаются. Учитывая, что большинство существующих методик эмпирические или полуэмпирические, область их применимости также имеет ограничения. В первую очередь это касается размерений и формы корпуса судов.

Принимая во внимание, что в последние годы все больше крупнотоннажных судов осуществляют навигацию в ледовых условиях, наиболее актуальной является методика, эмпирические коэффициенты которой получены на основании обработки натуральных данных не только судов ледового плавания с традиционными для второй половины XX века размерениями и обводами, но и данные по крупнотоннажным судам. Данная методика представляется следующей совокупностью расчетных зависимостей

$$R_{ice} = 10^{-3} k_s \rho_i g B [0,243 \Theta h_i^{1,04} L_i^{0,3} + 0,112 (k_f + \alpha_b \tan \alpha_0) h_i^{1,66} L_i^{0,43} V^{1,07}] + \Delta R_c; \quad (1)$$

$$\theta = 1,25 \cdot (\cos \beta_0)^{2/3} (0,45 \varphi^{0,285}) [1 + 0,006 (18 - \beta_\infty)] [1 + 0,4 \Delta L / L]; \quad (2)$$

$$h_t = h_i (1 + 0,05 T_i); \quad (3)$$

$$k_s = 1,6729 (S_i/10)^3 - 1,8094 (S_i/10)^2 + 1,1392 (S_i/10); \quad (4)$$

$$\Delta R_c = 2 k_f \cdot \Delta L \cdot q_c, \quad (5)$$

где  $R_{ice}$  — ледовое сопротивление, кН;

$S_i$  — сплоченность льда в канале, баллы;

$\rho_i$  — плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения;

$B$  — ширина судна по ватерлинии, м;

$\Theta$  — функция формы корпуса;

$h_i$  — толщина льда, м;

$T_i$  — торосистость льда в баллах по 5-балльной шкале;

$L_i$  — максимальный размер льдин на пути судна; если проводка судна осуществляется двумя ледоколами, то  $L_i$  равна поперечной дистанции между ледоколами, м;

$\alpha_b$  — коэффициент полноты носовой части ватерлинии;

$\alpha_0$  — угол входа ватерлинии, град.;

$V$  — скорость движения судна, уз.;

$\Delta R_c$  — дополнительное ледовое сопротивление при сжатиях, кН;

$\Delta L$  — длина зоны контакта с корпуса судна со льдом, которая предполагается равной длине цилиндрической вставки, м;

$q_c$  — погонная ледовая нагрузка при сжатиях; в качестве предельного значения этой нагрузки предлагается принимать нагрузку, которая лимитируется прочностью ледяного покрова и определяется по формуле:  $q_c = k_q h_i^{1,5}$ , кН/м;

$k_q = 128$  для предельного давления;

$k_f = 0,1$  — коэффициент трения льда о корпус судна.

Предлагаемая расчетная зависимость предназначена для расчета ледового сопротивления крупнотоннажного судна при самостоятельном движении в мелкобитых льдах или при движении судна в канале, проложенном двумя ледоколами. Эта формула не применима для случая, когда ширина канала меньше, чем ширина судна.

Для оценки ледового сопротивления движению судов в крупнобитых льдах и обломках полей, т.е. при диаметре льдин от 20 м до 500 м, может использоваться формула, полученная в результате модификации эмпирической формулы А.Я. Рывлина [2]

$$R_{ice} = \frac{B}{2,35} \Theta (\omega_i + 9 V^{1,3}) h_i^{1,2}, \quad (6)$$

где  $\omega_i = -0,00019 L_i^2 + 0,20426 L_i$  — эмпирический коэффициент, зависящий от среднего диаметра льдин  $L_i$  (м); остальные обозначения входящих величин — см. выше.

**Расчет ледового сопротивления при движении в сплошном ровном льду.** Существует множество методов расчета ледового сопротивления при движении судна в сплошном ровном льду. ААНИИ традиционно использует модифицированный метод Каштеляна. Базовый метод был опубликован в статье [7]. За последние годы он был усовершенствован с учетом результатов модельных и натурных испытаний как судов ледового плавания с традиционными обводами, так и крупнотоннажных судов. Можно рекомендовать его использование для оценки ледового сопротивления при движении судов в сплошном ровном льду. Данный метод описывается формулой (обозначения те же, что и в предыдущих формулах)

$$R_{ice} = 54 \cdot B \cdot h_i^{4/3} \cdot \theta. \quad (7)$$

Тяга на швартовых,  $T_e$ , кН, может быть определена по известной зависимости

$$T_e = k_b (d_v \cdot N_p)^{2/3}, \quad (8)$$

где  $N_p$  — суммарная мощность на гребных валах, кВт;

$d_v$  — диаметр гребного винта, м;

$k_b$  — коэффициент, равный 0,78 — для одновалных судов, 0,98 — для двухвалных, 1,12 — для трехвалных.

**Оценка достижимой скорости.** Кривая достижимой скорости — это график зависимости скорости движения судна от толщины льда при заданной мощности на валах. Достижимая скорость определяется из условия равенства полного сопротивления судна тяге пропульсивного комплекса. Ледовое сопротивление для различных ледовых условий может быть определено по формулам, представленным выше. Для расчета полного сопротивления необходимо к ледовому сопротивлению добавить сопротивление движению судна на чистой воде.

Скорость движения судна в канале, проложенном ледоколом, будет определяться в первую очередь скоростью движения лидирующего ледокола. Во избежание сокращения дистанции между судном и ледоколом, скорость движения судна не может превышать скорость движения ледокола.

При оценке достижимой скорости движения судна в канале необходимо учитывать размеры льдин, плавающих в канале. При движении в канале за одним ледоколом в канале образуется тертый лед. В канале за двумя ледоколами максимальный размер льдин соответствует расстоянию между бортами ледоколов и, как правило, составляет около 20 м. То есть лед в канале за двумя ледоколами можно классифицировать как мелкобитый. В случае, если ширина канала меньше ширины судна, то при расчетах достижимых скоростей необходимо вводить дополнительное ледовое сопротивление, появляющееся вследствие доламывания кромок.

С учетом относительно небольшого количества ледоколов, находящихся в эксплуатации, информация о скоростях движения может быть внесена непосредственно в разрабатываемые Методические рекомендации. Это позволит унифицировать исходные данные для расчета безопасных режимов движения судов под проводкой ледоколов.

Предельная ледопрободимость судна — толщина сплошного ровного льда, преодолеваемая судном при движении с полной мощностью с минимально устойчивой установившейся скоростью. Скорость традиционно принимается равной 2 уз., поскольку при более низких скоростях суда с традиционным винторулевым комплексом теряют управляемость из-за снижения эффективности рулей [8].

Таким образом, кривые достижимой скорости в сплошном ровном льду, при различной мощности на валах, могут быть получены следующим образом.

1. По известной мощности определяется тяга пропульсивного комплекса.
2. При допущении, что тяга равна ледовому сопротивлению, поскольку сопротивление воды при малых скоростях движения мало, и скорость движения судна равна 2 уз., по формулам определяется толщина льда, преодолеваемая судном.
3. Определяется скорость движения судна на чистой воде при данной мощности на валах (эта информация может считаться известной для каждого судна).
4. Определяется достижимая скорость как прямая  $V_s(h_i)$ , соединяющая данные точки.

### 3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНЫХ ДИСТАНЦИЙ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В КАНАЛЕ ЗА ЛЕДОКОЛОМ

Методы оценки безопасных дистанций движения судна в канале за ледоколом, предложенные как в Методических рекомендациях 2012 года [4], так и в проекте аналогичного документа 2015 года и построенные на решении дифференциального уравнения неустановившегося движения вида

$$M(1 + \lambda) \frac{dV}{dt} = - \{R(V) + T\}, \quad (9)$$

могут быть приняты за основу в новой версии методики. При этом необходимо учитывать следующие особенности, позволяющие уточнить безопасную дистанцию между судном и лидирующим ледоколом.

1. Необходим учет морской практики, в частности невозможность мгновенной реакции судоводителя на возникшую нештатную ситуацию.

2. Необходимо предусмотреть запас дистанции между ледоколом и остановившимся судном, который как минимум должен составлять длину корпуса судна.

3. Необходимо ввести в расчет время выполнения операций с пропульсивным комплексом, в том числе время на реверс гребных винтов, время на разворот винто-рулевых колонок и тому подобное. Перечень, последовательность необходимых действий и их продолжительность зависят от характеристик винторулевого комплекса конкретного судна. Соответственно, при решении уравнения (9), на протяжении времени от момента подачи сигнала об остановке до момента, когда тяга винтов начнет работать в направлении, противоположном движению судна, тяга должна приниматься равной 0 (выполняется расчет движения судна по инерции). При этом сопротивлении льда рассчитывается по формулам, приведенным выше.

4. Желательно учитывать особенности строения канала, возникающего за ледоколом, в том числе наличие участка чистой воды за кормой.

5. Фактором, определяющим надежность расчета безопасной дистанции, является точность определения ледового сопротивления при движении в канале. Наиболее точной и объективной является информация о ледовой ходкости судна полученная в результате натурных ледовых испытаний. При наличии такой информации целесообразен ее учет при выполнении расчетов.

6. Информацию о ледовом сопротивлении, полученную путем модельных испытаний (при наличии), также целесообразно учитывать при выполнении расчетов.

### 4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНОЙ И ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДНА В РАЙОНЕ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ

Известно, что из условия прочности при взаимодействии со льдом множество возможных режимов движения судна во льдах можно разделить на следующие три области [9]:

- область нормальной эксплуатации, включающая режимы движения, при которых изменения формы и повреждения конструкции практически исключены;

- область рискованной эксплуатации (область возможной перегрузки конструкции), включающая режимы движения, при которых массовые повреждения конструкции исключаются, но возможной оказывается реализация отдельных ее повреждений с остаточными деформациями (стрелками прогибов), не превышающими допустимые значения;

- область повреждаемости конструкции, включающая режимы движения, которые вызывают появление либо массовых повреждений конструкции, либо отдельных ее повреждений с остаточными деформациями, превышающими допустимые значения.

Границы между указанными областями задаются расчетными режимами движения — допустимыми (кривая допустимых скоростей хода) и опасными (кривая опасных скоростей хода). Допустимый режим движения традиционно связывается с критерием фибровой текучести. В основу опасного режима движения положен комплексный критерий прочности, являющийся компиляцией критериев предельной прочности и ограниченных пластических деформаций. Допустимые и опасные скорости хода судна во льдах могут быть определены согласно предлагаемым Методическим рекомендациям по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах. Методика определения допустимых и опасных скоростей хода судна в различных ледовых условиях базируется на расчете и сопоставлении **строительной и ледовой прочности конструкций корпуса судна** [10].

**Строительная прочность** — комбинация значений параметров суммарной расчетной ледовой нагрузки  $P_{Ice}$ , которой соответствует заданное допускаемое состояние конструкций. Поскольку ледовая нагрузка имеет локальный характер, как по высоте борта, так и по длине корпуса судна, характеристикой строительной прочности является в общем случае следующая поверхность:  $p = p(b, l_s)$ , где  $p$  — максимальное расчетное давление в зоне контакта со льдом;  $b$  и  $l_s$  — высота и длина зоны контакта, соответственно. С учетом значительной протяженности зоны контакта вдоль борта судна параметр  $l_s$  оказывает не столь сильное влияние на строительную прочность. В расчетах обычно в качестве характеристики строительной прочности принимается зависимость

$$p = p(b). \quad (10)$$

Строительная прочность может быть определена с учетом фактического технического состояния конструкций. В этом случае применяется термин **фактическая прочность**.

**Допускаемое состояние конструкций** — допускаемый уровень напряженно-деформированного состояния элементов конструкций (обшивки, балок набора, листовых конструкций). Различают **безопасное** и **предельное** состояние конструкций. **Безопасное** состояние соответствует упругой стадии работы конструкций, когда наибольшие напряжения в элементах конструкций при действии ледовой нагрузки не превосходят номинального предела текучести материала. **Предельным** считается состояние конструкций, соответствующее локальной ледовой нагрузке, при которой исчерпывается несущая способность рассматриваемых элементов конструкций (в рамках принятой модели определения предельного состояния).

**Ледовая прочность конструкций** определяется комбинацией предельно допустимых значений параметров, описывающих внешние условия и характер взаимодействия корпуса судна со льдом (первичный удар, вторичный удар, удар при маневрировании или циркуляции), которым соответствует заданное допускаемое состояние конструкций с учетом их фактического технического состояния. В рамках принятой модели ударного взаимодействия корпуса судна со льдом в качестве параметров внешних условий принимаются: скорость поступательного движения судна во льдах  $v_0$ , толщина ледяного покрова  $H_{Ice}$ , предел прочности льда на изгиб  $\sigma_f$ , условный измеритель динамической прочности льда на раздробление  $a_p$  (параметр, непосредственно связанный с пределом прочности льда на смятие  $\sigma_c$ ). При этом каждой точке кривой строительной (или фактической) прочности ( $p, b$ ) единственным образом ставится в соответствие определенная комбинация (совокупность) внешних параметров ( $v_0, H_{Ice}, \sigma_f, a_p$ ).

Методика оценки допустимых скоростей движения во льдах судна, имеющего наклонные борта в районе носового заострения и поперечную систему набора бортовых конструкций, обстоятельно рассмотрена в существующих НМУ [4]. Задача решается на основе расчетных зависимостей гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом [10]. Кривые допустимых скоростей строятся из условия

$$P_{Ice} = P_{str} = P_b / \sin(\beta'),$$

где  $P_{Ice}$  — суммарное контактное усилие;

$P_{str}$  — строительная прочность бортовых конструкций в зоне контакта со льдом;

$P_b$  — усилие, соответствующее нагрузке, разрушающей лед заданной толщины и прочности;

$\beta'$  — угол наклона борта в точке контакта со льдом.

В проекте новых Методических рекомендаций по выполнению расчета допустимых условий эксплуатации судна во льдах впервые предложена оригинальная методика для оценки допустимых скоростей движения во льдах судов, имеющих в носовом районе вертикальные борта. Методика применима для конструкций как с поперечной, так и с продольной системой набора. Наличие таких участков конструкций является характерным для корпусов судов с бульбовыми обводами, имеющих низкую категорию ледовых усилений корпуса, или вообще без ледовых усилений. Такая же проблема может возникать и в случае нерационального выбора формы корпусов судов ледовых классов, прежде всего, в районах перехода в цилиндрическую ставку, когда углы наклона ватерлинии существенно отличаются от нуля  $\alpha \neq 0$ , а углы наклона борта уже незначительные  $\beta \leq 3^\circ$  или нулевые  $\beta = 0^\circ$ .

Методика, предложенная для определения допустимых скоростей хода во льдах для судов, имеющих участки вертикального борта в районах носового или кормового заострений, основана на решении задачи об определении ледовых нагрузок при ударе вертикальным бортом о кромку ледяного покрова, подробно рассмотренной в работе [11].

При ударе вертикальным бортом о кромку ледяного покрова зона контакта имеет форму прямоугольника практически при любой представляющей интерес геометрической форме кромки льда. Смятие кромки льда происходит по всей толщине ледяного покрова. Каждому заданному моменту взаимодействия соответствует определенное соотношение сторон зоны контакта, при этом в процессе удара высота зоны контакта остается

постоянной и равной расчетной толщине ледяного покрова, а длина зоны контакта непрерывно изменяется в зависимости от глубины внедрения борта в лед. Таким образом, качественно нарушается допущение об одномерности вытеснения разрушенного льда из зоны контакта, вполне обоснованно сделанное применительно к удару наклонным бортом. Кроме того, в случае вертикального борта ( $\beta' = 0$ ) безразмерные функции формы корпуса обращаются в бесконечность ( $F_i \rightarrow \infty$ ), что не позволяет использовать для решения данной задачи расчетные выражения, аналогичные входящим в расчетные зависимости для определения параметров ледовой нагрузки при ударе о лед наклонным бортом. В связи с этим требуется применение иной модели и алгоритма определения ледовых нагрузок.

Кривые строительной прочности для наружной обшивки, балок основного набора готовятся заранее на основе анализа работы конструкции в выбранном участке борта. По результатам анализа строится огибающая  $p_{env}(b)$ , которая затем используется в качестве исходной  $p(b) = p_{env}(b)$  для решения задачи определения допустимых скоростей. **При поперечной системе набора** кривые строительной прочности строятся на основе формул, предложенных в действующих НМУ. **При продольной системе набора** учитывается более существенное влияние длины зоны контакта на несущую способность продольных балок основного набора.

Определение расчетной длины зоны контакта для участков наклонного борта реализуется достаточно просто — прямым расчетом по формуле  $l_s = 1,6\sqrt{(2R)b \sin \beta'}$ , учитывая, что длина зоны контакта связана через геометрию борта (угол наклона борта  $\beta'$ ) и радиус скругления кромки льда  $R$  с высотой зоны контакта  $b = H$ . Для участков вертикального борта расчетная длина зоны контакта определяется после того, как будет найдено значение параметра  $\xi_p$ , который равен квадрату соотношения между длиной  $l_s$  и высотой  $b = H$  зоны контакта, соответствующим максимуму контактного давления [11].

Для вертикального борта и продольной системы набора бортовых конструкций коэффициенты расчетного изгибающего момента и перерезывающей силы, определяющие вид кривой строительной прочности продольных балок, могут быть получены по результатам обработки расчетов неразрезной балки с учетом сдвига. Для практических расчетов строительной прочности теоретическое распределение ледовых давлений по зоне контакта  $p = p_0[(1 - \bar{x}^2)(1 - \bar{y}_2)]^{1/4}$ , где  $p_0$  — давление в центре зоны контакта, предлагается заменить равномерным давлением по зоне контакта. В этом случае давление должно определяться из условия  $p = k_i p_0$ , где  $k_i \leq 1$  — числовой коэффициент. Принципы определения этого коэффициента зависят от того, по какому параметру должна обеспечиваться эквивалентность. Для построения строительной прочности обшивки  $k_1 = 1$ ; для основного набора —  $k_2 = 0,87$ ; для суммарной силы —  $k_3 = 0,76$ .

Основные положения методики рассмотрены в работе [12], включенной в настоящий сборник. В ней представлены все необходимые расчетные зависимости, позволяющие определить максимальные контактные давления и, соответственно, погонную нагрузку и наибольшее суммарное контактное усилие, знание которых необходимо для построения кривых допустимых скоростей с учетом возможного разрушения ледяного покрова небольшой толщины от потери устойчивости. Приведены также алгоритм и численный пример построения кривых допустимых скоростей для двух нефтеналивных судов с поперечной и продольной системой набора борта в зоне контакта со льдом.

Методические рекомендации в части определения безопасных условий эксплуатации судов в замерзающих акваториях портов не арктических морей учитывают, что в таких портах уже накоплен многолетний опыт управления ледовыми навигациями с учетом специфики и материально-технических возможностей конкретного порта, а также системы ледовых классов РС и условно соответствующих классов иностранных классификационных обществ. Это позволяет использовать базовые условия, заложенные в ледовые классы РС, и ограничения по классам, устанавливаемые капитанами портов, в качестве «условных измерителей» для расчета допустимых (безопасных) режимов работы судов во льдах. Например, параметры ледовых нагрузок — интенсивность (контактные давления), высота и длина зоны контакта, соответствующие ограничению по ледовому классу, связываются со скоростью движения судна, которая должна быть ограничена для соответствия с фактической ледовой прочностью [13]. Условие соответствия учитывает состояние загрузки (водоизмещение и осадки) судна, техническое состояние (износы) корпусных конструкций и пиковый характер эпюры ударных ледовых давлений в зоне контакта. Эта часть рекомендаций касается главным образом судов с низкой ледовой категорией или не имеющих ледовых усилений. Такие суда часто имеют носовые бульбы, которые отрицательно сказываются на ледопроходимости в сплошных льдах. Для разработки рекомендаций необходимо учесть соответствующие расчетные зависимости для определения параметров ледовой нагрузки при ударе о кромку льда, как наклонным [4], так и вертикальным бортом [11].

## 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЧНОСТИ БОРТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДНА В УСЛОВИЯХ СЖАТИЙ ВО ЛЬДАХ

### 5.1 Общие положения

При дрейфе сплоченных льдов в ледяном покрове возникают внутренние усилия, приводящие к подвижкам и сжатию льдов. Вероятность ледовых сжатий в районах со сложными ледовыми условиями достаточно высока. Даже сравнительно слабые сжатия препятствуют судоходству, поскольку приводят к существенному ограничению скорости хода судна во льдах.

Нагрузки, действующие на корпус судна при ледовых сжатиях, представляют большую опасность и часто становятся причиной серьезных повреждений конструкций, а для недостаточно прочных судов ледовые сжатия могут иметь катастрофические последствия. Поэтому ледовые сжатия следует считать **предельным эксплуатационным режимом**.

Нагрузки при сжатиях во льдах определяются усилиями, разрушающими ледяной покров. Транспортные суда ледовых классов, как правило, имеют вертикальные борта в средней части. Практически, расчет ледовой нагрузки на корпус транспортного судна при сжатиях — это определение усилия, разрушающего ледяной покров, при взаимодействии с вертикальной стенкой достаточно большой протяженности. Для определения допустимых внешних условий при ледовых сжатиях предложено использовать вероятностно-детерминированную модель определения ледовых нагрузок, разработанную для определения расчетных нагрузок на борта стоечных судов [6]. Такая 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 еще ряд других параметров, имеющих вероятностную природу [6].

Для определения расчетных нагрузок на участки корпуса судна с **наклонными бортами** может быть предложена вторая вероятностная модель, построенная на основе детерминированной модели стесненного поворота. В рамках этой модели анализируются механизмы контактного взаимодействия блоков льда в условиях стеснения деформаций, а также приближенно учитываются влияние размеров трещин по толщине льда, распределения температуры льда по толщине, солёности льда и в итоге — контактных усилий. Считается, что модель стесненного поворота позволяет снизить слишком большую чувствительность величины расчетной нагрузки к изменению угла наклона шпангоута и приводит к приемлемым длинам обломков  $a_0 = (2 \div 6)H$ , которые уменьшаются с увеличением угла наклона борта. Вероятностно-детерминированная модель определения расчетных нагрузок на участки корпуса судна с наклонными бортами разработана [6], но в новых методических рекомендациях по разработке Паспорта ледовой безопасности такая модель не предлагается, т.к. наклонные борта в средней части характерны для ледоколов и некоторых судов с высоким ледовым классом, для которых проблемы обеспечения прочности при ледовых сжатиях не являются критическими.

Параметрами ледяного покрова, непосредственно входящими в рассматриваемые расчетные модели оценок ледовых нагрузок на бортовые конструкции корпуса судна, являются толщина льда и его прочностные характеристики (предел прочности льда на сжатие, предел прочности льда на изгиб). При осуществлении имитационного моделирования для указанных характеристик необходима статистическая информация по возможным районам эксплуатации судов. Для каждого выбранного района будет работать свой закон распределения значений толщин и физико-механических характеристик ледяного покрова, обусловленный особенностью географического положения, гидрометеорологическими условиями и другими внешними факторами.

Наиболее полное представление о случайной величине прочностных параметров льда может быть получено на основании данных прямых измерений, систематически проводимых в конкретном районе в течение продолжительного (многолетнего) периода. Как правило, подобная информация существует только для отдельных регионов, где велась целенаправленная научная и изыскательская деятельность.

Для большинства районов, в частности для морей восточного сектора Арктики, объем экспериментальных данных оказывается весьма ограниченным. Информация о ледовом режиме для этих районов накапливается главным образом по наблюдениям с судов на отдельных участках маршрутов плавания, с полярных станций, с помощью спутниковой съемки и авиационных наблюдений. По данным многолетних наблюдений для морей российской Арктики могут быть получены теоретические законы распределений толщин ледяного покрова.

Прочностные свойства льда могут быть определены в этом случае посредством расчетных методов. Под расчетными методами оценки прочностных характеристик ледяного покрова понимаются эмпирические или статистические зависимости, основанные на результатах обработки данных испытаний натурных образцов. Получаемые расчетные выражения позволяют связать прочностные свойства льда с другими его физическими характеристиками или параметрами окружающей среды.

Новыми НМУ представляется возможность оценки допустимости ледовых сжатий для основных регионов эксплуатации судов: Балтийское море, Баренцево море, Карское море, Обская губа Карского моря, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, Каспийское море.

## 5.2 Рекомендации для определения расчетных ледовых нагрузок и допустимых условий при ледовых сжатиях

На основании анализа результатов моделирования ледовых нагрузок при ледовых сжатиях для различных районов возможной эксплуатации транспортных судов принята следующая концепция построения системы расчетных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок и допустимых условий при ледовых сжатиях.

1. В качестве нормативного параметра, характеризующего уровень допустимых ледовых условий эксплуатации принята **средняя толщина льда**  $H_{aver}$  в каждом рассматриваемом регионе.

2. Конкретные данные о замерзающих морях для каждого района допустимой эксплуатации стоечных судов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны средних значений толщин льда, м, для морей Российской Арктики и замерзающих неарктических морей

Район эксплуатации	$H_{aver}$ , м
Север Балтийского моря	0,67
Баренцевом море в районах с легкими ледовыми условиями	0,79
Карское море в районах с ледовыми условиями средней тяжести	1,34
Море Лаптевых в районах с ледовыми условиями средней тяжести	2,16
Восточно-Сибирском море в районах с ледовыми условиями средней тяжести	1,87
Чукотском море в районах с ледовыми условиями средней тяжести	2,00
Север Каспийского моря	0,73

3. В качестве нормируемых параметров расчетной ледовой нагрузки принимаются: интенсивность расчетной нагрузки  $p$ , расчетная высота зоны контакта  $b$ .

4. Усредненные нормативные значения параметров расчетной ледовой нагрузки на бортовые конструкции судов с **вертикальными бортами** для каждого района эксплуатации определяются по результатам оценки погонной ледовой нагрузки с использованием вероятностно-детерминированной модели [6].

5. Нормативная обеспеченность расчетной нагрузки устанавливается в зависимости от **среднестатистических значений толщины льда** в соответствующем районе эксплуатации судна в соответствии со следующим алгоритмом:

- определяется среднестатистическое значение параметра  $b/H$  на основе результатов вероятностного моделирования ледовых нагрузок для каждого района эксплуатации судна;

- на основе данных о среднестатистической толщине льда  $H_{aver}$  для каждого района эксплуатации судна определяется расчетная величина параметра  $b_{aver} = (b/H)H_{aver}$  (высоты зоны распределения ледовой нагрузки);

- с использованием данных о законе распределения параметра  $b$  определяется обеспеченность значения этого параметра, которая и принимается как нормативная обеспеченность расчетной погонной нагрузки, соответствующей нормальным (безопасным) условиям для каждого района эксплуатации судна;

- в соответствии с принятой нормативной обеспеченностью определяются расчетные погонные нагрузки  $q_s$ , соответствующей **нормальным (безопасным) условиям эксплуатации** судна для каждого района эксплуатации;

- 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  $q_u/q_s \approx 1,8$ ;

• с использованием 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 судна в условиях ледовых сжатий для каждого района эксплуатации;

• для принятой нормативной обеспеченности устанавливается соответствующая величина предельной толщины льда  $H_{ult}$ . 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. 2.

Таблица 2

Предельная толщина льда для различных районов эксплуатации

Район эксплуатации	$H_{ult}$ , 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

6. В соответствии с принятой нормативной обеспеченностью определяются расчетные предельные погонные нагрузки  $q_u$  для каждого района эксплуатации судна и значения параметров  $b_u$  (высоты распределения), соответствующие предельным нагрузкам.

7. Расчетное давление на конструкции ледового пояса корпуса судна определяется по формуле  $p_u = q_u/b_u$ .

Результаты реализации предложенной методологии нормирования ледовых нагрузок на конструкции корпуса судов представлены в табл. 3.

Таблица 3 (часть 1)

Результаты расчета ледовых нагрузок на конструкции судов

Район	$b/H$	$H_{aver}$	$b_{aver}$	$\alpha_b$	$\beta_b$	$p(b_{aver})$	$q_s$	$q_u$	$q'_s$	$q'_u$
	—	см	м	—	—	%	МН/м			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Балтийское море	0,52	67	0,349	4,650	0,379	50,6	0,516	0,929	0,422	0,759
Баренцево море	0,57	79	0,449	3,066	0,492	46,9	1,042	1,876	0,972	1,750
Карское море	0,56	134	0,753	2,510	0,830	45,7	2,813	5,063	2,789	5,020
Море Лаптевых	0,58	216	1,252	2,497	1,388	46,2	5,242	9,436	5,043	9,078
Восточно-Сибирское	0,58	187	1,086	2,490	1,190	45,1	4,360	7,848	4,316	7,770
Чукотское море	0,55	200	1,098	2,380	1,220	45,9	3,862	6,952	3,958	7,124
Каспийское море	0,70	73	0,508	4,223	0,552	49,4	0,678	1,220	0,525	0,944

Таблица 3 (часть 2)

Район	$\alpha_q$	$\beta_q$	$p(q_u)$	$p(q_u)$	$\Delta P$	$\alpha_H$	$\beta_H$	$H_{ult}$	$b_{u\ sim}$	$p_{u\ sim}$
	—	—	факт	норм	—	—	—	см	м	МПа
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Балтийское море	3,83	0,57	0,2 %	5 %	0,049	67,1	12,9	88	0,480	1,712
Баренцево море	3,37	1,26	2,3 %	5 %	0,027	7,9	9,8	127	0,704	3,239
Карское море	2,32	3,13	4,7 %	5 %	0,003	5,4	25,3	244	1,285	4,050
Море Лаптевых	2,47	5,82	3,7 %	5 %	0,013	4,0	52,3	408	2,153	4,213
Восточно-Сибирское	2,29	4,81	4,7 %	5 %	0,003	184	82,6	320	1,850	4,232
Чукотское море (север)	2,20	4,33	5,9 %	5 %	0,009	2,8	63,8	385	1,193	3,871
Каспийское море	4,36	0,73	0,0 %	5 %	0,050	72,6	16,6	100	0,716	1,447

Приняты следующие обозначения итоговых результатов:  $b_{u\ sim}$  — расчетная высота зоны контакта по результатам моделирования (simulation), соответствующая предельной нагрузке;  $p_{u\ sim}$  — расчетное давление по результатам моделирования, соответствующее предельному (ultimate) состоянию.

Расчеты показывают, что нормативная обеспеченность условной предельной погонной нагрузки для арктических морей близка к 5 % (см. столбец 13 второй части табл. 3). Результаты расчетов для Балтийского и Каспийского морей выпадают из этой статистики. Это связано с отсутствием представительной статистической информации по температурным режимам и ледовым условиям для этих морей. Поэтому эти моря могут не учитываться.

Полученные оценки хорошо коррелируются с нормой допустимой повреждаемости, заложенной в основу действующих требований к ледовым усилениям Правил РС [9]. В связи с этим целесообразно откорректировать расчетную предельную нагрузку, приняв за основу нормативную обеспеченность 5 % (см. столбец 10 первой части табл. 3). Расхождение исходной предельной нагрузки (см. столбец 8 первой части табл. 3) и откорректированной (столбец 10) находится в пределах допустимых пределов.

8. Информация, приведенная, в столбцах 18 — 21 второй части табл. 3 позволяет оценить допустимые условия с точки зрения ледовых сжатий для рассматриваемого судна, для которого известны параметры строительной прочности при эксплуатации в заданном районе. По крайней мере:

- расчетное предельное давление  $p_{u\_pl}$ , которое главным образом определяет предельную прочность обшивки ледового пояса;

- расчетную погонную нагрузку  $q_{u\_fr} = p_{u\_fr} \cdot b_{u\_fr}$ , которая главным образом определяет предельную прочность основного набора ледового пояса.

Если  $p_{u\_pl} \geq p_{u\_sim}$ , то не следует ожидать проблем с наружной обшивкой при ледовых сжатиях в заданном районе эксплуатации судна.

Если  $q_{u\_fr} \geq q_{u\_sim}$ , то не следует ожидать проблем с набором ледового пояса при ледовых сжатиях в заданном районе эксплуатации судна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены методические основы для разработки Паспорта ледовой безопасности судна ледовых классов. Можно сказать, что сформулированы требования четвертого поколения (до 2008, 2008, 2012, 2023 гг.), которые позволят подготовить новые НМУ РС по проблемам безопасности эксплуатации судов во льдах.

Предлагаемые рекомендации в части нормирования ледовой прочности основаны на гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом. Современные представления о распределении нагрузок в зоне контакта не подтверждают гипотезы гидродинамической модели. В настоящее время СПбГМТУ и КГНЦ разработали новую динамическую модель определения ледовых нагрузок при ударном взаимодействии корпуса со льдом. Модель в настоящее время отрабатывается на заказах ПАО «Роснефть» — крупнотоннажном танкере дедвейтом 120 тыс. т и ледоколе ЛК-40. Прогноз внедрения нового подхода — оптимистичный. В связи с этим следующие требования Паспорта ледовой безопасности могут быть основаны на новой модели определения ударных ледовых нагрузок.

Необходимо также включить в следующую версию НМУ РС рекомендации по определению безопасных дистанций для крупнотоннажных арктических судов, ширина которых превосходит ширину канала, проложенного ледоколом. Соответствующие исследования по этой проблеме рассмотрены в [14, 15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутейников М.А., Грубов Д.А., Дидковский А.В., Тряскин В.Н. Рекомендации по структуре свидетельства о безопасности судна ледового плавания и нормативно-методических указаний РС для его разработки. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. № 32, СПб., 2009 — с. 10 — 22.
2. Каштелян В.Я., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. Л. Судостроение, 1968, 240 с.
3. Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. Л. Судостроение, 1967, 224 с.
4. Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах, СПб, Российский морской регистр судоходства, 2012, 24 с.
5. Тряскин В.Н., Платонов В.В. Архитектурно-конструктивные особенности арктических судов двойного действия. Арктика: экология и экономика. 2019, № 3 (35), с. 84 — 96.
6. 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), с. 35 — 41.
7. Каштелян В.И. К вопросу о моделировании движения судна в сплошных льдах // Проектирование, теория и прочность судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1990, с. 22 — 26.
8. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980, 207 с.

9. Апполонов Е.М. Решение проблем обеспечения прочности судов ледового плавания и ледоколов в условиях круглогодичной эксплуатации в Арктике. — Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — СПб., 2003. — 380 с.
10. Курдюмов В.А., Тряскин В.Н., Хейсин Д.Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов. Труды ЛКИ. Ледопроездимость и ледовая прочность морских судов. ЛКИ, 1979, с. 3 — 12.
11. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Определение ледовой нагрузки при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля. Регистр СССР. Научно-технический сборник, вып. 14, Л., Транспорт, 1984, с. 3 — 10.
12. Тряскин В.Н., Мороз В.С. Методика и алгоритм определения допустимых скоростей при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. № 74. Санкт-Петербург, 2024, с. 48 — 55.
13. Kulesh V., Kuteynikov M., Zhitnikov I. Solutions for Ice Strength of Hulls of Vessels in Service. Proceeding of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures. — TEAM-2010. Vladivostok, pp. 150 — 153.
14. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Проводка крупнотоннажных судов ледоколами с увеличенной скоростью: исследования в ледовом бассейне // Арктика: экология и экономика. — 2018 — №3 (31). — с. 76 — 83. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-76-83.
15. Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е. Несимметричное движение крупнотоннажных судов в «узком» ледовом канале. Проблемы Арктики и Антарктики. 2018; 64(2): с. 200 — 207. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-2-200-207>.

## REFERENCES

1. Kuteynikov M.A., Grubov D.A., Didkovsky D.A., Tryaskin V.N. *Rekomendatsii po strukture svidetelstva o bezopasnosti sudna ledovogo plavaniya i normativno-metodicheskikh ukazany RS dlya ego razrabotki* [Recommendations on the structure of the Ice Certificate and RS normative methodological instructions for development whereof]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 32, St. Petersburg, pp. 10 — 22.
2. Kashtelyan V.Ya., Poznyak I.I., Ryvlin A.Ya. *Soprotivlenie lda dvizheniyu sudna* [Ice resistance to ship movement]. L. Sudostroenie, 1968, 240 p.
3. Popov Yu.N., Faddeev O.V., Kheisin D.E., Yakovlev A.A. *Prochnost sudov, plavayushchikh vo ldakh* [Strength of ice navigation ships]. L. Sudostroenie, 1967, 224 p.
4. Guidance on Calculation of Permissible Ship Motions when Navigating in Ice, Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 24 p. (In Russian)
5. Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Arkhitekturno-konstruktivnye osobennosti arkticheskikh sudov dvoynogo deystviya* [Architectural and structural features of Arctic double-acting vessels]. Arctic: ecology and economy, 2019, No. 3 (35), pp. 84 — 96.
6. Svistunov I.A., Platonov V.V., Tryaskin V.N. *Metodika opredeleniya raschetnykh ledovykh nagruzok na konstruktivnykh krupnotonnazhnykh stoechnykh sudov* [Calculation procedure for design structural loads on large berth-connected ships]. Works of Krylov State Research Center, 2021. No. 1 (395), pp. 35 — 41.
7. Kashtelyan V.I. *K voprosu o modelirovani dvizheniya sudna v sploshnykh ldakh* [On modelling ship movement in solid ice] // Design, theory and strength of ice navigation ships. Coll. art, Gorky, GPI Publ., 1990, pp. 22 — 26.
8. Ryvlin A.Ya., Kheisin D.E. *Ispytaniya sudov vo ldakh* [Testing of ships in ice]. L.: Sudostroenie, 1980, 207 p.
9. Appolonov E.M. *Reshenie problem obespecheniya prochnosti sudov ledovogo plavaniya i ledokolov v usloviyakh kruglogodichnoy ekspluatatsii v Arktike* [Solution of problems of strength of ice navigation ships and icebreakers in all-year Arctic service]. — DSc thesis, St. Petersburg, 2003, 380 p.
10. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Kheisin D.E. *Opredelenie ledovoy nagruzki i otsenka ledovoy prochnosti korpusov transportnykh sudov* [Determination of ice loads and estimation of strength of transport ship hulls]. LKI Works. Ice passage and ice strength of sea-going ships, LKI, 1979, pp. 3 — 12.
11. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Kheisin D.E. *Opredelenie ledovoy nagruzki pri udare sudna vertikalnym bortom o kromku ledyanogo polya* [Determination of ice loads at ship vertical board crash against ice field edge]. USSR Register Research Bulletin, No. 14, L., Transport, 1984, pp. 3 — 10.
12. Tryaskin V.N., Moroz V.S. *Metodika i algoritm opredeleniya dopustimyykh skorostey pri udare sudna vertikalnym bortom o kromku ledyanogo polya* [Methodology and algorithm for determination of permissible speeds at a ship's vertical side crash against ice field edge] Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping No. 74, St. Petersburg, pp. 48 — 55.
13. Kulesh V., Kuteynikov M., Zhitnikov I. Solutions for Ice Strength of Hulls of Vessels in Service. Proceeding of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures. — TEAM-2010. Vladivostok, pp. 150 — 153.
14. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. *Provodka krupnotonnazhnykh sudov ledokolami s uvelichennoy skorostyu: issledovaniya v ledovom bassejne* [Fast-speed escorting of heavy tonnage vessels by icebreakers: researching in ice model tank] // Arctic: ecology and economy. — 2018 — No. (31), — pp. 76 — 83. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-76-83.
15. Dobrodeev A.A., Klementyeva N.Yu., Sazonov K.E. *Nesimmetrichnoe dvizhenie krupnotonnazhnykh sudov v "uzkom" ledovom kanale* [A skewed movement of large-size ships in "narrow" ice channel]. Problems of Arctic and Antarctic, 2018; No. 64(2): pp. 200 — 207. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-2-200-207>.



## МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 531.391.1:532.5.011

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАТАМАРАНА НА МЕЛКОВОДЬЕ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

**Е.Ю. Чебан**, д-р техн. наук, Волжский государственный университет водного транспорта (ВГУВТ), Нижний Новгород, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

**Д.В. Никущенко**, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: dmitry@nikushchenko.ru

**Т.В. Старкова**, ВГУВТ, Нижний Новгород, e-mail: starkovatanya99@mail.ru

**Д.О. Жигалов**, ВГУВТ, Нижний Новгород, e-mail: den4uk.86@yandex.ru

В статье рассматриваются особенности гидродинамики речных большегрузных катамаранов в условиях мелководья внутренних водных путей. С помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine™ выполнено численное моделирование для корпусов катамаранов длиной 152, 132 и 112 м соответственно с относительными клиренсами 0,30 — 0,56 в диапазоне чисел Фруда 0,18 — 0,35, соответствующем докритическим скоростям. Моделирование выполнялось для глубины воды под днищем 1,2 м. Для численного моделирования обоснованы и подобраны параметры расчетной сетки, размеры расчетной области и модель турбулентности. На основании результатов моделирования определены коэффициенты полного сопротивления и выполнено сравнение с результатами расчетов по методике М.Я. Алферьева. Полученные результаты будут использованы для дальнейшего совершенствования методики оценки сопротивления речных катамаранов на мелководье.

**Ключевые слова:** внутренние водные пути, большегрузный катамаран, мелководье, NUMECA/FineMarine™, корабельные волны, вычислительная гидродинамика, критическая скорость

### PRELIMINARY ESTIMATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF A LARGE CARGO CATAMARAN IN SHALLOW WATER USING NUMERICAL METHODS

**E.Yu. Cheban**, DSc, Volga State University of Water Transport (VGUWT), Nizhny Novgorod, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

**D.V. Nikushchenko**, DSc, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: dmitry@nikushchenko.ru

**T.V. Starkova**, VGUWT, Nizhny Novgorod, e-mail: starkovatanya99@mail.ru

**D.O. Zhigalov**, VGUWT, Nizhny Novgorod, e-mail: den4uk.86@yandex.ru

The article discusses a numerical study of the shallow water effects of large cargo catamarans for inland waterways is presented. Numerical simulation has been performed using NUMECA/FineMarine™ software. The choice of the turbulence model, numerical domain size and computational mesh parameters, including the resolution of the boundary layer, have been discussed. Hydrodynamic for inland catamarans with lengths 112, 132 and 152 m respectively, width of one hull was 9 and 10 m has been studied, relative clearance being in the range of 0,3 — 0,56. Numerical simulations have been performed for water depth of 1,2 m under the keel. Based on the simulation results, the full resistance coefficients have been determined. The results of this study will be used to improve the method of estimation the resistance for large river catamarans in shallow water.

**Keywords:** inland waterways, large cargo catamaran, shallow water, NUMECA/FineMarine™, computer fluid dynamics, ship's generated waves, critical velocity

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение большегрузных катамаранных судов на внутренних водных путях (ВВП) позволит повысить скорость движения флота за счет уменьшения волнообразования на свободной поверхности воды [1 — 3], однако большая протяженность мелководных участков требует исследования не только сопротивления, но и волнообразования таких судов на различных глубинах и при различных скоростях хода. Малый запас воды под днищем представляет навигационную опасность, а также влечет ухудшение управляемости, увеличение тормозного пути, дополнительное проседание с изменением посадки и падение скорости при тех же энергетических затратах, что еще сильнее проявляется на мелководье с ограниченной акваторией из-за влияния берегов и других судов.

В гидродинамическом отношении речные катамаранные суда относятся к водоизмещающим судам, режимы плавания которых находятся в зонах докритических и закритических скоростей на глубокой воде и на мелководье.

Систематические исследования по экспериментальному определению мореходных качеств морских катамаранных судов выполнялись ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, в Николаевском кораблестроительном институте О.И. Соломенцевым, в Ленинградском кораблестроительном институте. Поведение катамаранных судов в условиях волнения посвящены работы Я.М. Элиса, Е.М. Когана, Ю.Л. Воробьева. Одним из преимуществ катамаранных судов является способность поддерживать высокую скорость движения в сложных ветроволновых условиях, что подтверждается расчетами О.И. Соломенцева.

Создание водоизмещающих грузовых речных катамаранов стало возможным в том числе благодаря исследованиям М.Я. Алферьева в Горьковском институте инженеров водного транспорта. Обобщение исследований взаимодействия двух тонких корпусов было проведено М.Я. Алферьевым и Г.С. Мадорским. В дальнейшем эта тематика была развита Ю.Ф. Орловым. Свой вклад внесли работы В.А. Дубровского и других исследователей.

В работе Wei He, Frederick Stern, and Sergio Bova [4] выполнено численное моделирование эффектов интерференции между волновыми системами многокорпусного судна при движении на мелководье с помощью кода URANS CFDShip-Iowa V.4 на катамаране DELFT model 372. Относительные клиренсы составили 0,17 и 0,23 и значения глубины  $h/T=43,33$  (глубокая вода), 2,5 и 2 (мелководье), при нескольких скоростях в пределах  $Fr=0,27\pm 0,75$ . Полученные расчеты довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными INSEAN и BSHC, при этом средние ошибки составили не превышают 4,8 % и 11,3 % для глубокой и мелкой воды. Результаты показывают, что ограниченная глубина существенно увеличивает полное сопротивление судна, при этом максимальное увеличение приходится на диапазон чисел Фруда  $0,3 < Fr < 0,4$ . Предполагается, что эффекты интерференции, имеют одинаковую величину на мелководье и на большой глубине, хотя на мелководье максимальные значения сопротивления, по-видимому, возникают при более низких значениях скорости, соответствующих пикам высот волн.

Результаты ходовых испытаний опытного грузового катамарана КТ-619, проведенных в 1960 году [8] в балласте при неполной загрузке (осадка кормой  $T_k=1,9$  м, угол дифферента около  $1,5^\circ$ ), показали, что катамаранный теплоход хорошо проходит мелководные участки пути без существенного снижения скорости движения. Разница между технической скоростью 25,8 км/ч и скоростью на мерной линии 27,35 км/ч составила 1,55 км/ч [8]. Это позволяет предположить, что катамараны могут обладать преимуществом перед однокорпусными судами на мелководных участках.

Большая часть проанализированных исследований в области гидродинамики многокорпусных судов посвящены либо морским катамаранам, движущимся при  $Fr > 0,5$ , либо катамаранам длиной до 100 м [5 — 7], поэтому учет влияния условий мелководья на гидродинамику катамаранных судов представляет собой сложную задачу в области судостроения и судоходства, решение которой еще далеко от завершения.

На основе ранее выполненных исследований [9 — 10], ВГУВТом совместно с АО КБ «Вымпел» было предложено создать крупнотоннажный паром катамаранного типа со скоростью движения около 30 км/ч «Транзит» (см. рис. 1), использование которого позволит увеличить скорость перемещения грузов и уменьшить нагрузку на автомобильные дороги при эксплуатации в Волжско-Камском бассейне.



Рис. 1 Большегрузный паром катамаранного типа «Транзит»

На ВВП России с гарантированной глубиной 4 м, практически все крупнотоннажные суда будут большую часть времени находиться в условиях мелководья, поэтому необходимость учета гидродинамических характеристик и волнообразования при движении катамаранных судов на мелководье очень велика. Соответственно целью настоящей работы является оценка гидродинамических характеристик и волнообразования большегрузного катамарана на мелководье.

Понятие «мелководье» относительно, поскольку его влияние на гидродинамику судна зависит от соотношения габаритов судна и судового хода, а также скорости судна.

Глубина, определяющая влияние мелководья на гидродинамику судна, может быть определена, например, по формуле А.И. Щетининой

$$H_{\phi} < 4T + (3v_c^2)/g,$$

где  $H_{\phi}$  — глубина фарватера, м;  
 $T$  — средняя осадка;  
 $v_c$  — скорость судна, м/с;  
 $g = 9,81$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Критическая скорость при движении на мелководье определяется по формуле

$$v_{кр} = \sqrt{gH_{\phi}},$$

где  $v_{кр}$  — критическая скорость на мелководье, м/с.

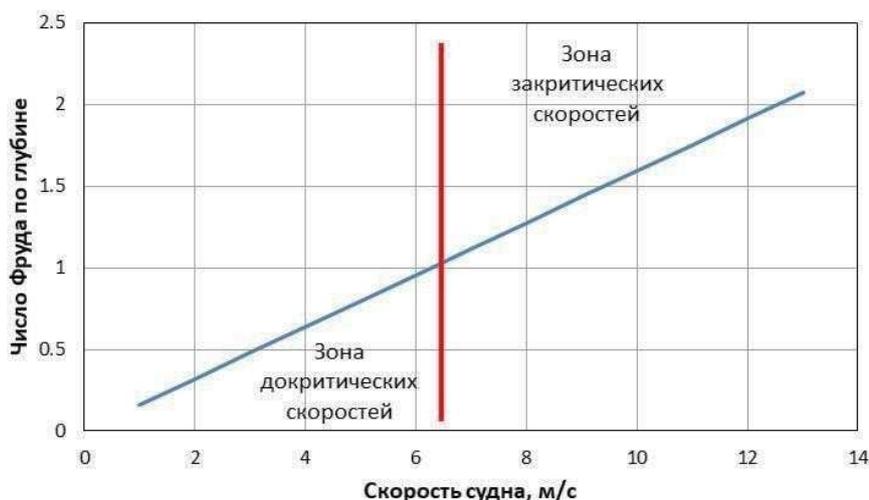
Для катамарана движущегося при глубине фарватера  $H_{\phi} = 4$  м (см. рис. 2) критическая скорость составит

$$v_{кр} = \sqrt{9,81 \cdot 4} = 6,26 \text{ м/с} = 22,5 \text{ км/ч}.$$

Гидродинамические характеристики катамарана на мелководье определяются относительной глубиной под корпусом судна  $H_{\phi}/T$  и числом Фруда по глубине фарватера

$$Fr_H = v/\sqrt{gH_{\phi}}.$$

Как известно, при движении судна на мелководье существенно изменяется характер волн, генерируемых корпусом судна, что приводит не только к повышению волнового сопротивления, но и изменяет форму волновой поверхности в целом.

Рис. 2 Зависимость числа Фруда по глубине от скорости движения судна для  $H_{\phi} = 4$ 

## 1. АНАЛИЗ МЕТОДИКИ М.Я. АЛЕФЕРЬЕВА ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТАМАРАННЫХ СУДОВ НА МЕЛКОВОДЬЕ

Для определения сопротивления речных катамаранов представляет интерес методика М.Я. Алферьева [11], основанная на большом числе модельных экспериментов в опытовом бассейне при различных относительных горизонтах  $H/T$  в широком диапазоне докритических и закритических скоростей. По данной методике была выполнена оценка сопротивления большегрузного катамарана типа «Транзит». Расчетные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные для расчета сопротивления катамарана «Транзит» на мелководье по методике М.Я. Алферьева

Наименование	Обозначение	Величина	Ед. изм.
Длина по КВЛ	$L$	148,095	м
Длина по палубе	$L_{\text{пал}}$	152,50	м
Ширина корпуса по КВЛ	$B_{\text{квл}}$	10,00	м
Ширина корпуса	$B$	10,00	м
Осадка	$T$	2,80	м
Клиренс	$C$	6,00	м
Высота борта	$H_{\text{б}}$	6,00	м
Смоченная поверхность одного корпуса	$S$	1648,740	$\text{м}^2$
Общая смоченная поверхность	$S_{\text{общ}}$	3297,480	$\text{м}^2$
Общая ширина	$B_{\text{общ}}$	26,00	м
Водоизмещение одного корпуса	$V$	2693,172	$\text{м}^3$
Общее водоизмещение	$V_{\text{общ}}$	5386,344	$\text{м}^3$
Глубина фарватера	$H_{\phi}$	4,000	м
Относительный горизонт	$H/T$	1,429	—
Коэффициент полноты водоизмещения одного корпуса	$\delta_{\text{корп}}$	0,6495	—
Коэффициент полноты водоизмещения общий	$\delta$	0,4996	—
Относительная ширина 1 корпуса	$(B/T)_{\text{корп}}$	3,571	—
Относительная ширина общая	$B/T$	9,286	—
Относительная длина 1 корпуса	$(L/B)_{\text{корп}}$	14,810	—
Относительная длина общая	$L/B$	5,696	—
Относительный клиренс	$\bar{c}$	0,300	—

Расчет был проведен для диапазона скоростей 7,0 — 11,7 м/с, что соответствует закртической области при числах Фруда от 0,181 до 0,353 (см. рис. 3) для последующего сравнения с результатами численного моделирования. Нисходящий характер графика, по всей видимости, связан с особенностями сопротивления катамаранов в данном узком диапазоне закртических скоростей. Это не противоречит теоретическим и экспериментальным исследованиям [12], где, например, график коэффициента полного сопротивления для многокорпусных судов, построенный для более широкого диапазона чисел Фруда, имеет несколько «горбов» сопротивления, а также восходящие и нисходящие ветви.

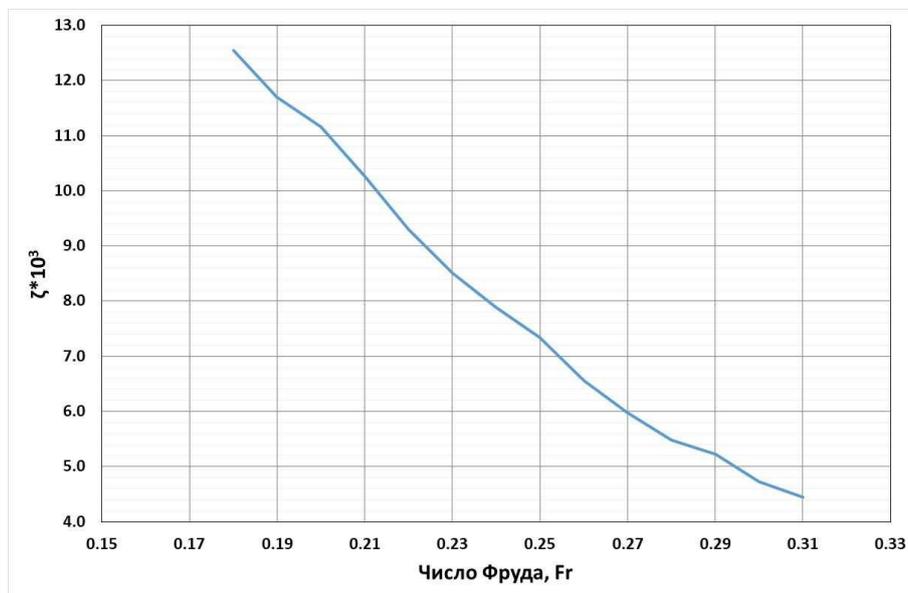


Рис. 3 Зависимость коэффициента сопротивления катамарана типа «Транзит» от числа Фруда по методике М.Я. Алферьева

В методике М.Я. Алферьева влияние относительного клиренса на коэффициент сопротивления учтено в виде поправки 5 % в большую сторону при  $\bar{c}=0,3$  и в меньшую при  $\bar{c}=0,9$ . Значения коэффициента остаточного сопротивления по диаграммам в методике М.Я. Алферьева распространяется на катамаранные суда с  $\bar{c}=0,5 \dots 0,7$ . В целом же методика никак не учитывает влияние относительного клиренса на сопротивление.

Кроме того, методика Алферьева ограничена размерениями и формами корпусов моделей катамаранов, испытания которых лежат в ее основе, что требует развития этой методики для речных большегрузных катамаранов с другими формами корпусов. Для этого можно использовать численное моделирование движения катамарана на мелководье в натурную величину [15], что позволяет избежать масштабного эффекта, а также определить параметры волнообразования с целью оценки возможности разрушения дна и берегов водоема [1, 2].

## 2. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАТАМАРАНА НА МЕЛКОВОДЬЕ

Методы вычислительной гидродинамики (CFD) на основе коммерческих программных продуктов широко используются для исследования гидродинамики судов различных типов и размерений в различных режимах движения. Они позволяют не только определять сопротивление движению, но и получать дополнительную информацию, например, распределение давлений по поверхности корпуса, данные об изменении посадки судна при его движении. Для исследования гидродинамики большегрузного катамарана на мелководье использовался программный комплекс RANS NUMECA/FineMarine™, который позволяет решать широкий спектр задач корабельной гидродинамики [13, 14], результаты решения которых хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Твердотельная геометрия корпуса катамарана, разработанная на основе обводов М.Я. Алферьева, показана на рис. 4. Варьируемые в ходе моделирования параметры катамаранов приведены в табл. 2. Осадка судна во всех случаях была одинакова — 2,8 м.

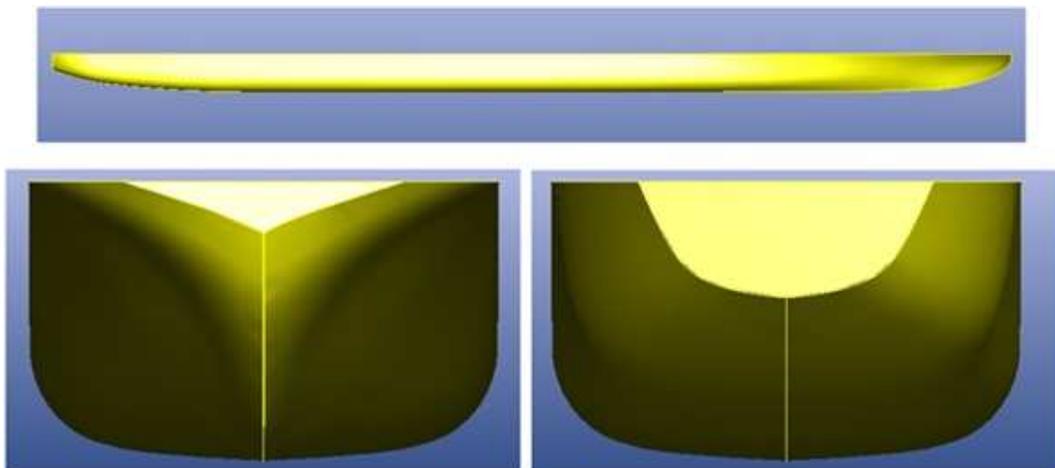


Рис. 4 Твердотельная геометрия корпуса катамарана типа «Транзит»

Таблица 2

Моделируемые параметры вариантов катамарана «Транзит»

Длина судна, м	Ширина корпуса $b$ , м	Величина клиренса $c$ , м	Относительный клиренс, $\bar{c}$
112	10	6	0,30
132	10	7	0,35
152	10	8	0,40
112	9	8	0,44
132	9	9	0,50
152	9	10	0,56

Решение задачи моделирования гидродинамики катамарана на мелководье численными методами отличается от глубокой воды, в первую очередь необходимостью учета взаимодействия корпуса судна и дна водоема. Для этого на дне расчетной области использовалось граничное условие Wall function («твердая стенка»), что позволяет рассчитывать пристеночные функции, в том числе пограничный слой и сопротивление трения. Кроме того, дно расчетного домена должно находиться на соответствующем глубине фарватера расстоянии. Поскольку гарантированные глубины для Единой глубоководной системы (ЕГС) в Европейской части России составляют 4 м, то данное расстояние и было выбрано в качестве глубины воды в расчетном домене. Запас под днищем равнялся 1,2 м.

Особенности волнообразования на мелководье, в частности образование поперечных волн перед носом судна, а также характер их распространения, требуют изменения размеров расчетного домена для предотвращения трансформации волн на его границах. Рекомендации NUMECA предполагают ширину расчетной области в пределах  $1 - 1,5 L_{OA}$ , где  $L_{OA}$  — длина судна, однако выполненное исследование влияния ширины расчетной области показало, что она должна быть существенно увеличена до  $2,4 L_{OA}$ , т.е. для катамарана длиной 152 м составило 370 м.

Ввиду симметрии моделировалась только половина катамарана по диаметральной плоскости с граничным условием «симметрия». Расстановка граничных условий на гранях расчетной области и их описание приведены в табл. 3 и на рис. 5.

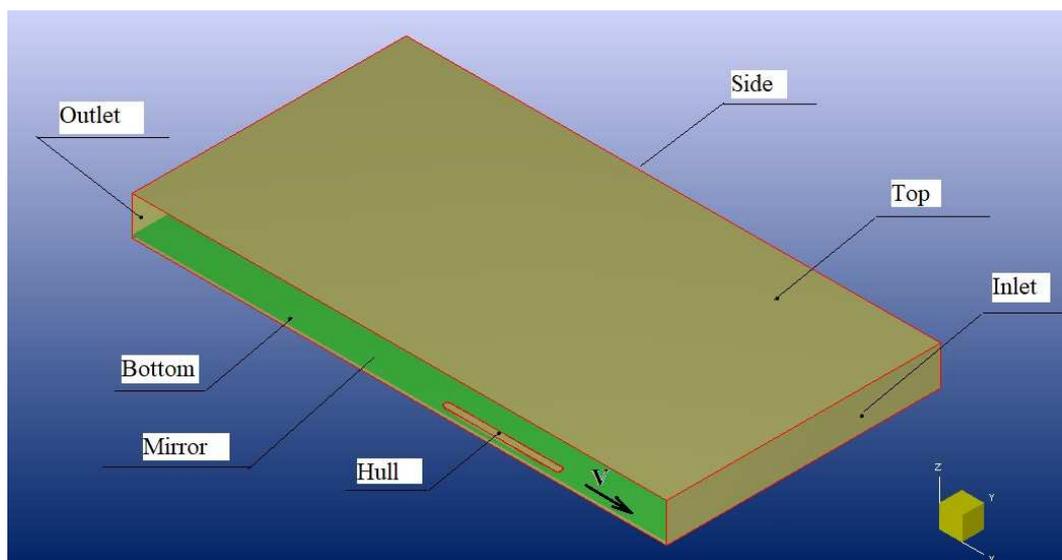


Рис. 5 Общий вид расчетной области и расстановка граничных условий

Таблица 3

Граничные условия на гранях расчетного домена

Грани	Тип граничного условия
Верх (Top)	"Prescribed pressure" > "Updated hydrostatic pressure"
Выход-вход-боковая грань (Outlet, Side, Inlet)	"Far field" (velocity components equal to zero)
Плоскость симметрии (Mirror)	"Mirror" (symmetry — равенство нулю нормальных и касательных составляющих скорости)
Корпус и дно (bottom)	"Wall function" — пристеночные функции
Палуба	"Slip" (zero shear stress)

При моделировании использовалась неструктурированная сетка высокой плотности, параметры которой приведены в табл. 4. Общий вид сетки показан на рис. 6. Параметры сетки определялись по результатам исследования сеточной сходимости. Для повышения точности расчета потока в области между корпусом катамарана и дном было выполнено измельчение сетки по дну расчетной области — 8 циклов разбиения (см. рис. 6а). Кроме того, на дне расчетной области были построены призматические слои сетки для точного разрешения пограничного слоя — не менее 15. В области изменения волновой поверхности было выполнено дополнительное измельчение сетки для бокса размерами 450 × 300 × 3 м (см. рис. 6б), а также в форме сектора радиусом до 210 м и высотой 1,525 м вблизи корпуса судна. Общее число ячеек сетки составило от 9,7 млн ячеек до 11,2 млн ячеек в зависимости от размеров катамарана.

Таблица 4

Параметры расчетной сетки

	Параметры сетки	
	Основная сетка	Пограничный слой
Начальная сетка	56 × 32 × 4 (7168)	—
Адаптация геометрии корпуса катамарана:	—	—
днище и борта	6	21
транец	8	17
свободная поверхность	8	—
Дно расчетной области	8	15
Дополнительное измельчение сетки:	—	—
бокс	4	—
сектор	8	—

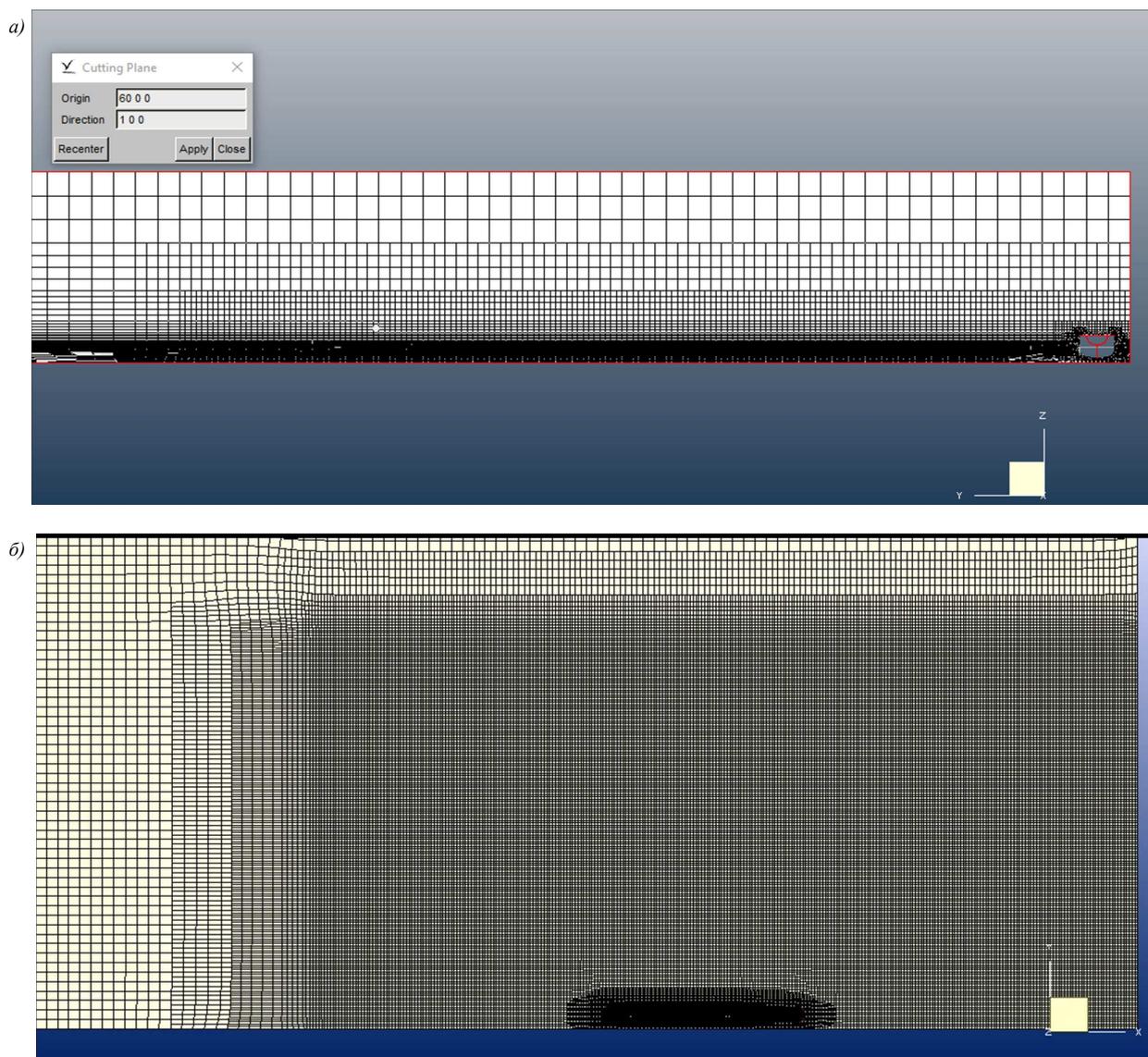


Рис. 6 Расчетная сетка при моделировании гидродинамики на мелководье

Моделировалась движение судна в неподвижной жидкости с одной степенью (движение вперед). Разгонный участок определялся законом  $1/2$  синусоиды с изменением времени выхода судна на установившееся движение. Остальные параметры расчета устанавливались в соответствии с [1 — 3].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнения коэффициентов сопротивления, полученных по методике М.Я. Алферьева, с результатами численного моделирования в NUMECA/FineMarine™ показывают удовлетворительную сходимость (см. рис. 7). Расхождения в результатах могут быть вызваны причинами, описанными в разд. 2 настоящей статьи, что опять же подтверждает необходимость уточнения методики М.Я. Алферьева. Моделирование выполнялось на «ровный киль», поэтому отсутствовала возможность для изменения посадки судна, что оказывает сильное влияние на гидродинамику судна на мелководье [11, 12] и будет дополнительно исследовано в дальнейшем.

Анализ графиков коэффициентов сопротивления для катамаранов различной длины (см. рис. 8) показывает, что в пределах одной ширины корпуса катамарана величина коэффициента сопротивления от относительного клиренса не зависит. При  $F > 0,3$  разница в коэффициентах сопротивления для обеих ширин корпусов уменьшается. В то же время катамаран с более узким корпусом и большим горизонтальным клиренсом имеет меньшие значения коэффициентов сопротивления для всех длин.

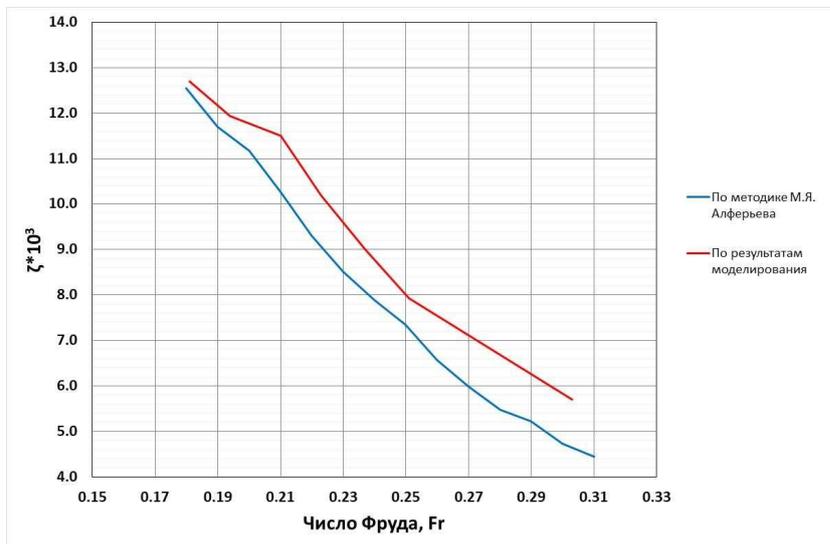
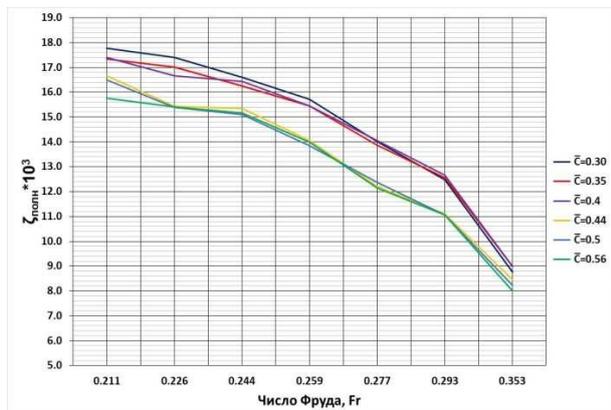
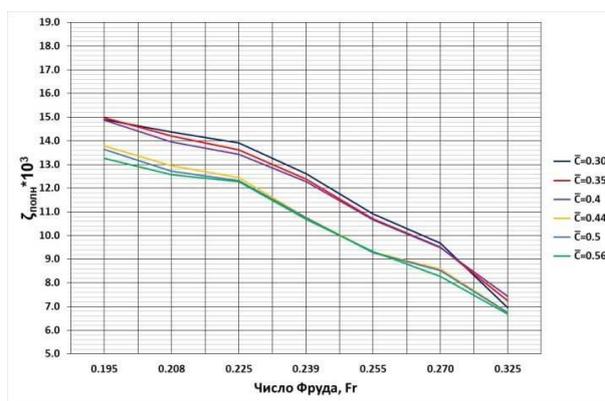


Рис. 7 Сравнение численного моделирования и расчетов по методике М.Я. Алферьева



а)



б)

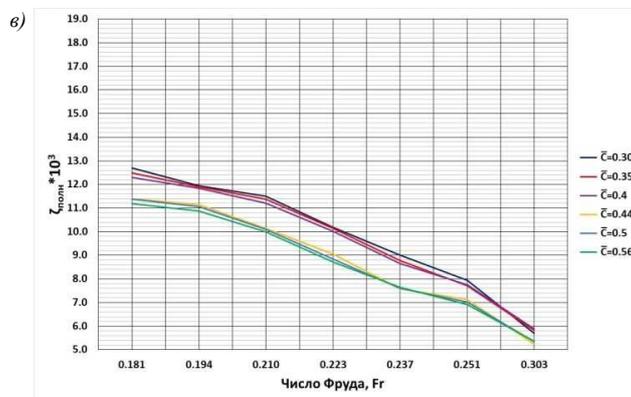
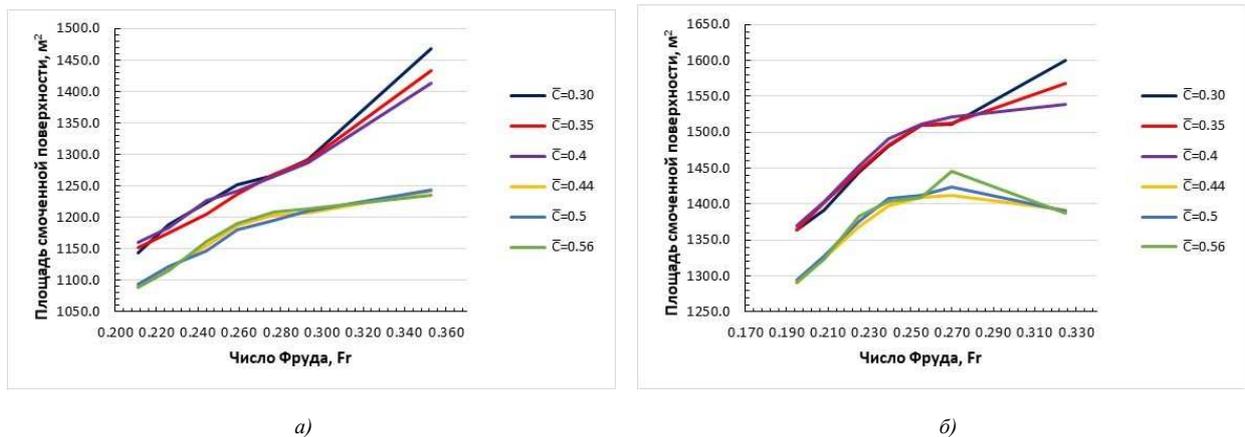


Рис. 8 Коэффициенты сопротивления для большегрузного катамарана различной длины:  
а) — 152 м; б) — 132 м; в) — 112 м



Графики изменения смоченной поверхности (см. рис. 9) также группируются для двух ширинок корпусов катамаранов. Для меньших клиренсов при всех длинах с увеличением скорости движения и числе Фруда наблюдается существенный разброс площадей, что может свидетельствовать об изменении характера волнообразования, причем как в пространстве между корпусами, так и во внешнем потоке. Необходимо отметить, что для относительных клиренсов от 0,3 до 0,4, т.е. при ширине одного корпуса при  $Fr > 0,3$  происходит существенный разброс площадей смоченных поверхностей для всех длин катамарана, в то время для клиренсов 0,44 — 0,56 такой картины не наблюдается, за исключением  $L = 132$  м, когда при  $Fr = 0,270$  у кривых наблюдается максимум. По всей видимости данное явление опять же связано с изменением формы волновой поверхности (напр. на рис. 10).

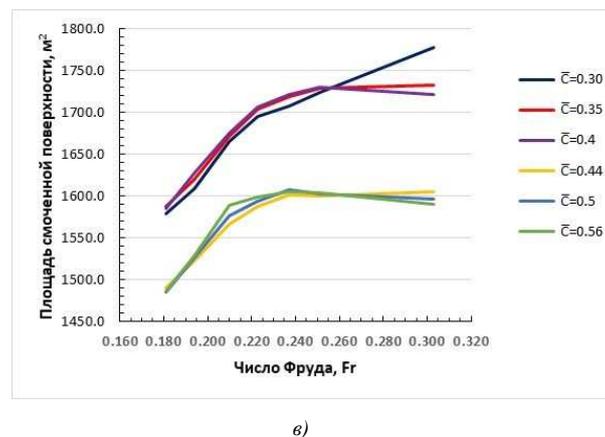


Рис. 9 Площади смоченной поверхности для большегрузного катамарана различной длины (один корпус):  
а) — 152 м; б) — 132 м; в) — 112 м

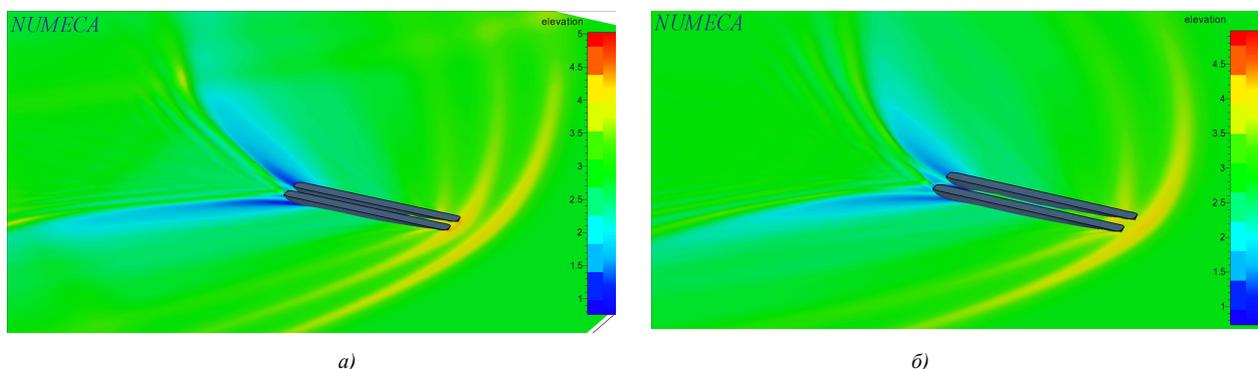


Рис. 10 Волновая поверхность для большегрузного катамарана длиной 132 м при скорости 7,0 м/с:  
а) —  $\bar{c} = 0,3$ ; б) —  $\bar{c} = 0,56$

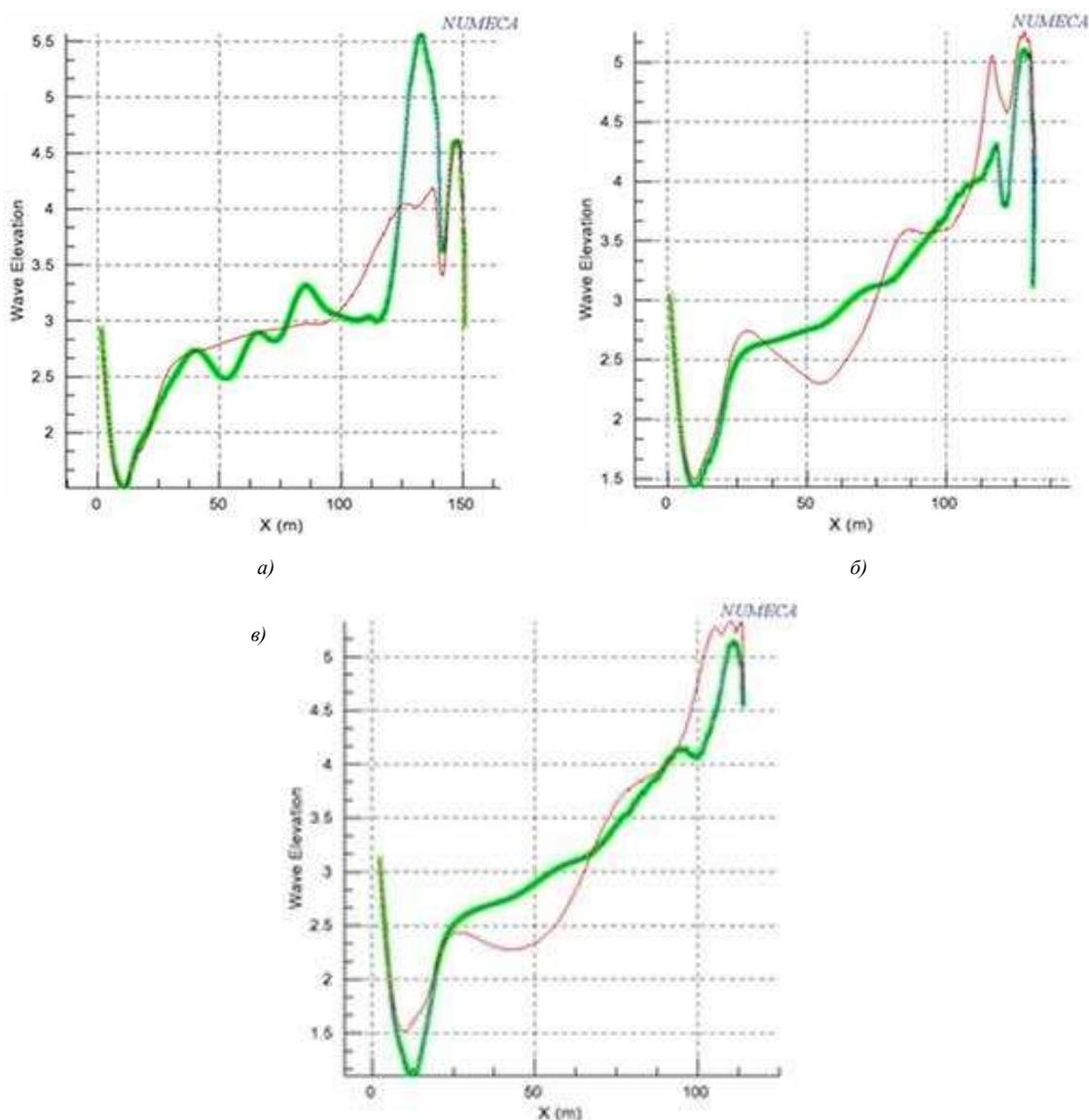


Рис. 11 Профили ординат волновой поверхности по бортам большегрузного катамарана различной длины при  $\bar{C}=0,56$ :  
 а) — 152 м; б) — 132 м; в) — 112 м

Анализ ординат волновых поверхностей (см. рис. 11) показывает, что длина катамарана существенно влияет на волнообразование между корпусами: число волн между корпусами (зеленый график) с уменьшением длины судна также уменьшается, волновая поверхность сглаживается. При  $L=152$  м максимум носовой волны в междукорпусном пространстве смещается ближе к миделю (см. рис. 11).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты численного моделирования гидродинамики большегрузного катамарана на мелководье с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine в сравнении с расчетами по методике оценки сопротивления речных катамаранов на мелководье М.Я. Алферьева. Расхождение коэффициентов сопротивления катамарана можно объяснить упрощением ряда существенных факторов в методике М.Я. Алферьева, что приводит к необходимости ее совершенствования. С этой целью было исследовано влияние длины и относительного клиренса на коэффициент сопротивления большегрузного катамарана.

Показано, что в пределах одной ширины корпуса коэффициентом полного сопротивления не зависит от относительного клиренса, а в диапазоне числе Фруда от 0,18 до 0,35 график коэффициента полного сопротивления имеет нисходящий характер.

Полученные результаты будут использованы для дальнейшего совершенствования методики оценки сопротивления речных катамаранов на мелководье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Е.Ю. Чебан, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3-1(61), — с. 210 — 219. — DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. — EDN PERDQG.
2. Оценка сопротивления большегрузного катамарана численными методами / Е.Ю. Чебан, Е.А. Лукина, О.В. Мартемьянова, М.Н. Кшталтная // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 60, — с. 122 — 132. — EDN CWUJH.
3. Оценка волнообразования большегрузного катамарана с различными формами внутреннего борта / Е.Ю. Чебан, О.В. Мартемьянова, С.Г. Митрошин [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 63. — С. 109 — 120. — DOI 10.37890/jwt.vi63.82. — EDN AXBAQK.
4. Effects of Shallow Water on Catamaran Interference Teresa Castiglione, Wei He, Frederick Stern, and Sergio Bova 11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011, Honolulu, Hawaii, USA, September 2011.
5. Moraes H.B., Vasconcellos J.M., Latorre R.G. Wave resistance for high-speed catamarans. Ocean Engineering 31 (2004), pp. 2253 — 2282
6. Hydrodynamic effects on fast monohulls or catamarans travelling through the critical speed in shallow water, Transportation FAST 2012, Honolulu, Hawaii, USA, May 2012.
7. Лукина Е.А. Анализ литературы по исследованию минимального сопротивления большегрузных катамаранов внутреннего плавания [электронный ресурс] // Труды 15 международного научно-промышленного форума «Великие реки-2013» (15 — 18 мая 2013 года). Выпуск 2013, с. 287 — 291. — Режим доступа: <http://vf-река-море.рф/2013/PDF/91.pdf>, свободный доступ.
8. Горьковский институт инженеров водного транспорта. Кафедра теории корабля № ТБ 76. Отчет об исследовательской работе по теме № 21/2315 от 1962 года. «Результаты натурных испытаний опытного грузового теплохода-катамарана КТ-619 в навигацию 1962 г.», Горький, 1962.
9. Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Битков Д.А. «Обоснование применения накатного судна для паромно-транспортных грузовых перевозок в Волжско-Камском бассейне». / Вестник ВГАВТ. Вып. 28, Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009, с. 56 — 62.
10. Костров В.Н., Телегин А.И., Митрошин С.Г. Моделирование и продвижение новых технологий в паромно-транспортной логистической системе. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2008, № 24, с. 132 — 136.
11. Алферьев, М.Я. «Отчет по научно-исследовательской работе, связанной с теоретическими и экспериментальными исследованиями гидродинамических качеств катамаранных судов — сопротивление движению на мелководье»: ГИИВТ, Горький, 1972, — 143 с.
12. Гидродинамика судов на мелководье. Басин А.М., Веленицкий И.О., Ляховицкий А.Г. Л., «Судостроение», 1976, 320 с.
13. Broglia R., Zaghi S., Di Mascio A. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254 — 269// DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.), <http://www/sciencedirect.com>, свободный доступ.
14. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.
15. Hochkirch K., Mallol B. On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2013) — Cortona (Italy) on April 15th — 17th.
16. Павловский, В. А. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. А. Павловский, Д. В. Никущенко. — 1-е изд. — СПб: Лань, 2018. — 368 с. — (Бакалавриат, Магистратура, Специалитет). — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103064>.

## REFERENCES

1. *Issledovanie volnoobrazovaniya bolshegruznogo katamarana dlya vnutrennikh vodnykh putey chislennymi metodami* [Research on wave-making of heavy cargo catamaran for inland navigation using numerical methods] / E.Yu. Cheban, E.A. Lukina, S.G. Mitroshin [et. al.] // *Morskie intellektualnye tekhnologii*, 2023. — No. 3 — 1(61), pp. 210 — 219. — DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021.
2. *Otsenka soprotivleniya bolshegruznogo katamarana chislennymi metodami* [Estimation of resistance of heavy cargo catamaran using numerical methods] / E.Yu. Cheban, E.A. Lukina, O.V. Martemyanova, M.N. Kshaltynaya // *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta*, 2019. — No. 60, — pp. 122 — 132.
3. *Otsenka volnoobrazovaniya bolshegruznogo katamarana s razlichnymi formami vnutrennego borta* [Estimation of wave-making of heavy cargo catamaran with different forms of inner board] // E.Yu. Cheban, O.V. Martemyanova, S.G. Mitroshin [et. al.] // *Nauchnye problemy vodnogo transporta*, 2020. — No. 63, pp. 109 — 120, — DOI 10.37890/jwt.vi63.82.
4. Effects of Shallow Water on Catamaran Interference Teresa Castiglione, Wei He, Frederick Stern, and Sergio Bova 11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011, Honolulu, Hawaii, USA, September 2011.
5. Moraes H.B., Vasconcellos J.M., Latorre R.G. Wave resistance for high-speed catamarans. Ocean Engineering 31 (2004) pp. 2253 — 2282.
6. Hydrodynamic effects on fast monohulls or catamarans travelling through the critical speed in shallow water, Transportation FAST 2012, Honolulu, Hawaii, USA, May 2012.

7. Lukina E.A. *Analiz literatury po issledovaniyu minimalnogo soprotivleniya bolshegruznykh katamaranov vnutrennego plavaniya* [Analysis of sources on research of minimum resistance of inland navigation catamarans] // Trudy 15-gomezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma "Velikie reki-2013" (May, 15 — 18, 2013). Issue 2013, pp. 287 — 291. <http://vf-reka-more.rf/2013/PDF/91.pdf>, free access.
8. *Otchet ob issledovatel'skoy rabote po teme No. 21/2315 ot 1962. Rezultaty naturnykh ispytaniy opytnogo gruzovogo teplokhoda-katamarana KT-619 v navigatsiyu 1962 g.* [Report on scientific research on topic No. 21/2315 of 1962. Results of full-scale testing of test cargo catamaran steamboat] Gorkovskiy institut inzhenerov vodnogo transporta. Kafedra teorii korablya No. TB-76, Gorkiy, 1962.
9. Lukina E.A., Mitroshin S.G., Bitkov D.A. *Obosnovanie primeneniya nakatnogo sudna dlya paromno-transportnykh gruzovykh perevozok v Volzhsko-Kamskom bassejne* [Substantiation of application of a ro-ro ship for ferry-transport cargo shipping in the Volga-Kama basin] // Vestnik VGAVT. Vyp. 28.— N. Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VGAVT, 2009, — pp. 56 — 62.
10. Kostrov V.N., Telegin A.I., Mitroshin S.G. *Modelirovanie i prodvizhenie novykh tekhnologiy v paromno-transportnoy logisticheskoy sisteme* [Modelling and promotion of new technologies in ferry transport logistic system] Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2008, No. 24, pp. 132 — 136.
11. Alferev M.Ya. *Otchet po nauchno-issledovatel'skoy rabote, svyazannoy s teoreticheskimi i eksperimentalnymi issledovaniyami gidrodinamicheskikh kachestv katamarannykh sudov — soprotivlenie dvizheniyu na melkovodye* [Report for the R&D on theoretical and experimental research of hydrodynamic qualities of catamaran vessels], GIIVT, Gorkiy, 1972, — 143 p.
12. Basin A.M., Velenitskiy I.O., Lyakhovitskiy A.G. *Gidrodinamika sudov na melkovodye* [Hydrodynamics of ships on shallow water]. L., Sudostroenie, 1976, 320 p.
13. Broglia R., Zaghi S., Di Mascio A. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. *J Mar Sci Technol* (2011) 16:254 — 269./ DOI 10.1007/s00773-011-0132-3.
14. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.
15. Hochkirch K., Mallol B. On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2013) — Cortona (Italy) on April 15th — 17th.
16. Pavlovsky V.A. *Vychislitel'naya gidrodinamika. Teoreticheskie osnovy* [Computational hydrodynamics. Theory] [Webpage]: textbook // V.A. Pavlovsky, D.V. Nikushhenko. — 1-e izd. — St. Peterburg: Lan, 2018. — 368 p. — (Bakalavriat, Magistratura, Specialitet). — Accessible at: <https://e.lanbook.com/book/103064>.

УДК 629.12.073.243.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЙ В ПРОИЗВОЛЬНЫХ ТОЧКАХ СУДНА НА ОСНОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ В УСЛОВИЯХ РЕГУЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ

**В.Ю. Семенова**, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: sem\_viktoria@mail.ru

**Д.А. Альбаев**, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

В статье рассматривается определение ускорений в различных точках судна от действия нелинейных сил второго порядка на основании трехмерной потенциальной теории на регулярном волнении. Для их определения используются методы интегральных уравнений и метод малого параметра. Проводится апробация расчетов ускорений по разработанным программам в сравнении с программами, основанными на использовании двумерных методов. Проводится исследование влияния на амплитуды ускорений изменения курсового угла и скорости хода. Расчеты ускорений приводятся для различных судов. Показано значительное влияние нелинейных сил на горизонтальные и вертикальные ускорения в зонах супергармонических резонансных режимов при расположении судна лагом и необходимость его учета.

**Ключевые слова:** супергармонический резонанс, ускорения, нелинейные силы, метод малого параметра, функция Грина, трехмерная потенциальная теория

## DETERMINATION OF ACCELERATIONS AT ARBITRARY POINTS OF A SHIP BASED ON NONLINEAR THEORY IN REGULAR WAVES

**V.Yu. Semenova**, DSc, professor, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: sem\_viktoria@mail.ru

**D.A. Albaev**, SMTU, St. Petersburg, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

The article discusses the determination of accelerations at various points of the ship from the action of second-order nonlinear forces on the basis of three-dimensional potential theory in regular waves. To determine them, methods of integral equations and the small parameter method have been used. Acceleration calculations using the developed programs have been tested in comparison with programs based on the use of two-dimensional methods. A study of the influence of changes in heading angle and speed on acceleration amplitudes has also been carried out. Acceleration calculations have been provided for various ship types. The significant influence of nonlinear forces on horizontal and vertical accelerations in zones of superharmonic resonant modes in the beam waves and the need to take it into account have been shown.

**Keywords:** superharmonic resonance, accelerations, nonlinear forces, small parameter method, Green's function, three-dimensional potential theory

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных практических приложений расчетов нелинейной качки является определение соответствующих ускорений в произвольных точках судна, вызываемых действием нелинейных сил. В работе Со Чжо Ту [9, 10] были определены ускорения на основании нелинейной теории, но с использованием двумерного метода. В работах авторов [3 — 8] были определены различные категории нелинейных сил на основании применения трехмерной потенциальной теории и метода малого параметра. В настоящей работе проводится определение ускорений в произвольных точках судна с учетом данных нелинейных сил на регулярном волнении.

## 1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Горизонтальные и вертикальные ускорения произвольной точки  $m$  определяются следующими выражениями [1]:

$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_m &= \ddot{\xi}_g - \ddot{\chi}y + \ddot{\psi}z + g\psi; \\ \ddot{\eta}_m &= \ddot{\eta}_g - \ddot{\theta}z + \ddot{\chi}x - g\theta; \\ \ddot{\zeta}_m &= \ddot{\zeta}_g - \ddot{\psi}x + \ddot{\theta}y,\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_g &= -\omega_k^2 \xi_g^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\xi^{(1)}) - \varepsilon_1 4\omega_k^2 \xi_g^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\xi^{(2)}); \\ \ddot{\eta}_g &= -\omega_k^2 \eta_g^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\eta^{(1)}) - \varepsilon_2 4\omega_k^2 \eta_g^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\eta^{(2)}); \\ \ddot{\zeta}_g &= -\omega_k^2 \zeta_g^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\zeta^{(1)}) - \varepsilon_3 4\omega_k^2 \zeta_g^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\zeta^{(2)}); \\ \ddot{\theta} &= -\omega_k^2 \theta^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\theta^{(1)}) - \varepsilon_4 4\omega_k^2 \theta^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\theta^{(2)}); \\ \ddot{\psi} &= -\omega_k^2 \psi^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\psi^{(1)}) - \varepsilon_5 4\omega_k^2 \psi^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\psi^{(2)}); \\ \ddot{\chi} &= -\omega_k^2 \chi^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\chi^{(1)}) - \varepsilon_6 4\omega_k^2 \chi^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\chi^{(2)}); \\ \theta &= \theta^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\theta^{(1)}) + \varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\theta^{(2)}); \\ \psi &= \psi^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\psi^{(1)}) + \varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\psi^{(2)}).\end{aligned}\tag{2}$$

В конечном итоге формулы для определения амплитуд ускорений примут вид

$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_{mA}^{(1)} &= \sqrt{\ddot{\xi}_{mA1}^{(1)2} + \ddot{\xi}_{mA2}^{(1)2}}; \\ \ddot{\xi}_{mA1}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\xi_g^{(1)} \cos \delta_\xi^{(1)} - y\chi^{(1)} \cos \delta_\chi^{(1)} + z\psi^{(1)} \cos \delta_\psi^{(1)} + g\psi^{(1)} \cos \delta_\psi^{(1)}); \\ \ddot{\xi}_{mA2}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\xi_g^{(1)} \sin \delta_\xi^{(1)} - y\chi^{(1)} \sin \delta_\chi^{(1)} + z\psi^{(1)} \sin \delta_\psi^{(1)} + g\psi^{(1)} \sin \delta_\psi^{(1)}); \\ \ddot{\xi}_{mA}^{(2)} &= \sqrt{\ddot{\xi}_{mA1}^{(2)2} + \ddot{\xi}_{mA2}^{(2)2}};\end{aligned}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_{mA1}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_1 \xi_g^{(2)} \cos \delta_\xi^{(2)} - y\varepsilon_6 \chi^{(2)} \cos \delta_\chi^{(2)} + z\varepsilon_5 \psi^{(2)} \cos \delta_\psi^{(2)} + g\varepsilon_5 \psi^{(2)} \cos \delta_\psi^{(2)}); \\ \ddot{\xi}_{mA2}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_1 \xi_g^{(2)} \sin \delta_\xi^{(2)} - y\varepsilon_6 \chi^{(2)} \sin \delta_\chi^{(2)} + z\varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin \delta_\psi^{(2)} + g\varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin \delta_\psi^{(2)}).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\ddot{\eta}_{mA}^{(1)} &= \sqrt{\ddot{\eta}_{mA1}^{(1)2} + \ddot{\eta}_{mA2}^{(1)2}}; \\ \ddot{\eta}_{mA1}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\eta_g^{(1)} \cos \delta_\eta^{(1)} - y\chi^{(1)} \cos \delta_\chi^{(1)} + z\theta^{(1)} \cos \delta_\theta^{(1)} - g\theta^{(1)} \cos \delta_\theta^{(1)}); \\ \ddot{\eta}_{mA2}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\eta_g^{(1)} \sin \delta_\eta^{(1)} - y\chi^{(1)} \sin \delta_\chi^{(1)} + z\theta^{(1)} \sin \delta_\theta^{(1)} - g\theta^{(1)} \sin \delta_\theta^{(1)}); \\ \ddot{\xi}_{mA}^{(2)} &= \sqrt{\ddot{\xi}_{mA1}^{(2)2} + \ddot{\xi}_{mA2}^{(2)2}};\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}\ddot{\eta}_{mA1}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_2 \eta_g^{(2)} \cos \delta_\eta^{(2)} + x\varepsilon_6 \chi^{(2)} \cos \delta_\chi^{(2)} - z\varepsilon_5 \theta^{(2)} \cos \delta_\theta^{(2)} - g\varepsilon_4 \theta^{(2)} \cos \delta_\theta^{(2)}); \\ \ddot{\eta}_{mA2}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_2 \eta_g^{(2)} \sin \delta_\eta^{(2)} + x\varepsilon_6 \chi^{(2)} \sin \delta_\chi^{(2)} - z\varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin \delta_\theta^{(2)} - g\varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin \delta_\theta^{(2)}).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\zeta}_{mA}^{(1)} &= \sqrt{\ddot{\zeta}_{mA1}^{(1)2} + \ddot{\zeta}_{mA2}^{(1)2}}; \\
\ddot{\zeta}_{mA1}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\zeta_g^{(1)} \cos \delta_\xi^{(1)} - x\psi^{(1)} \cos \delta_\psi^{(1)} - y\theta^{(1)} \cos \delta_\theta^{(1)}); \\
\ddot{\zeta}_{mA2}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\zeta_g^{(1)} \sin \delta_\xi^{(1)} - x\psi^{(1)} \sin \delta_\psi^{(1)} - y\theta^{(1)} \sin \delta_\theta^{(1)}); \\
\ddot{\zeta}_{mA}^{(2)} &= \sqrt{\ddot{\zeta}_{mA1}^{(2)2} + \ddot{\zeta}_{mA2}^{(2)2}}; \\
\ddot{\zeta}_{mA1}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_3 \zeta_g^{(2)} \cos \delta_\xi^{(2)} - x\varepsilon_5 \psi^{(2)} \cos \delta_\psi^{(2)} - y\varepsilon_4 \theta^{(2)} \cos \delta_\theta^{(2)}); \\
\ddot{\zeta}_{mA2}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_3 \zeta_g^{(2)} \sin \delta_\xi^{(2)} - x\varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin \delta_\psi^{(2)} - y\varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin \delta_\theta^{(2)}).
\end{aligned} \tag{5}$$

Здесь  $\varepsilon_1 = \frac{\xi_g}{B/2}$ ;  $\varepsilon_2 = \frac{\eta_g}{B/2}$ ;  $\varepsilon_3 = \frac{\zeta_g}{B/2}$ ;  $\varepsilon_4 = \frac{\theta}{1 \text{ rad}}$ ;  $\varepsilon_5 = \frac{\psi}{1 \text{ rad}}$ ;  $\varepsilon_6 = \frac{\chi}{1 \text{ rad}}$ ;

Амплитуды второго порядка различных видов качки определяются на основании решения системы дифференциальных уравнений (6).

$$\begin{cases}
(M + \lambda_{11}^{(2)}) \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{13}^{(2)} \ddot{\psi}^{(2)} + \lambda_{13}^{(2)} \ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{11}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{13}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{15}^{(2)} \dot{\psi}^{(2)} = F_X^{(2)} e^{-2j\omega_k t}, \\
(M + \lambda_{22}^{(2)}) \ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{24}^{(2)} \ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{26}^{(2)} \ddot{\chi}^{(2)} + \mu_{22}^{(2)} \dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{24}^{(2)} \dot{\theta}^{(2)} + \mu_{26}^{(2)} \dot{\chi}^{(2)} = F_Y^{(2)} e^{-2j\omega_k t}, \\
(M + \lambda_{33}^{(2)}) \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{31}^{(2)} \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{35}^{(2)} \ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{33}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{31}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{35}^{(2)} \dot{\psi}^{(2)} + \rho g S \zeta_g^{(2)} - \rho g S X \psi^{(2)} = F_Z^{(2)} e^{-2j\omega_k t}, \\
(J_{xx} + \lambda_{44}^{(2)}) \ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{42}^{(2)} \ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{46}^{(2)} \ddot{\chi}^{(2)} + \mu_{44}^{(2)} \dot{\theta}^{(2)} + \mu_{42}^{(2)} \dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{46}^{(2)} \dot{\chi}^{(2)} + D h_0 \theta^{(2)} = M_X^{(2)} e^{-2j\omega_k t}, \\
(J_{yy} + \lambda_{55}^{(2)}) \ddot{\psi}^{(2)} + \lambda_{51}^{(2)} \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{53}^{(2)} \ddot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{55}^{(2)} \dot{\psi}^{(2)} + \mu_{51}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{53}^{(2)} \dot{\zeta}_g^{(2)} + D h_0 \psi^{(2)} - \rho g S X \zeta_g^{(2)} = M_Y^{(2)} e^{-2j\omega_k t}, \\
(J_{zz} + \lambda_{66}^{(2)}) \ddot{\chi}^{(2)} + \lambda_{62}^{(2)} \ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{64}^{(2)} \ddot{\theta}^{(2)} + \mu_{66}^{(2)} \dot{\chi}^{(2)} + \mu_{62}^{(2)} \dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{64}^{(2)} \dot{\theta}^{(2)} = M_Z^{(2)} e^{-2j\omega_k t}.
\end{cases} \tag{6}$$

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основании изложенного метода была разработана программа, реализующая определение ускорений на регулярном волнении.

Все расчеты нелинейных сил проводились для четырех судов, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики судов

Тип/Название судна	$L$	$B$	$T$	$\delta$	$\alpha$	$h_0$	$Q^*$
Лихтеровоз «Алексей Косыгин»	232	32	10,6	0,57	0,82	3,99	970
Балкер «Капитан Панфилов»	134	20,6	9,4	0,78	0,88	1,45	766
Лесовоз «Николай Новиков»	140	21	8,68	0,74	0,83	2,31	998
Сухогруз «Новгород»	138	20,6	9	0,68	0,79	1,00	952

\* $Q$  — количество панелей разбиения судна.

### 3.1. Апробация расчетного метода

В качестве апробации разработанного метода расчета, расчеты амплитуд первых, вторых гармоник поперечных видов качки, а также их суммарных амплитуд, при расположении судна лагом и без хода были сопоставлены с аналогичными расчетами, выполненными по двумерной теории [2]. Сопоставления приведены для балкера «Капитан Панфилов» на рис. 1 — 9. Из приведенных результатов видно, практически полное согласование амплитуд первых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки (см. рис. 1 — 3). Амплитуды вторых гармоник вертикальной и бортовой качки убедительно совпадают в зонах супергармонических резонансных режимов. Безразмерные суммарные амплитуды, также хорошо совпадают между собой.

Также были сопоставлены расчеты поперечных и вертикальных кинематических составляющих ускорения по линейной и нелинейной теориям по разработанному методу с аналогичными расчетами по двумерной теории [10] для сухогруза Новгород при качке лагом в точке на правом борту (см. рис. 10 и 11). Из приведенных на графиках сопоставлений видно их хорошее согласование.

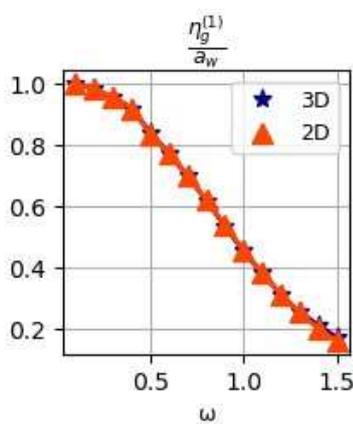


Рис. 1 АЧХ первого порядка поперечно-горизонтальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ, u_s=0$ )

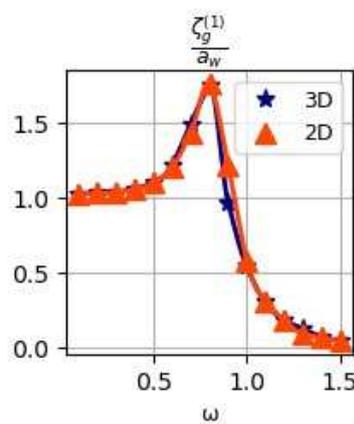


Рис. 2 АЧХ первого порядка вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ, u_s=0$ )

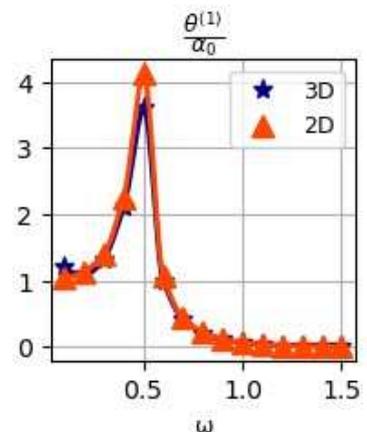


Рис. 3 АЧХ первого порядка бортовой качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ, u_s=0$ )

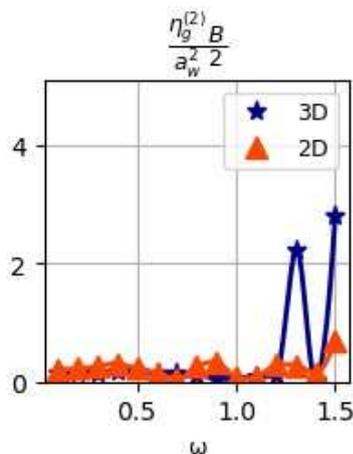


Рис. 4 АЧХ второго порядка поперечно-горизонтальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ, u_s=0$ )

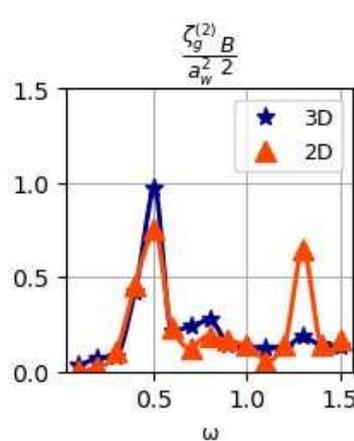


Рис. 5 АЧХ второго порядка вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ, u_s=0$ )

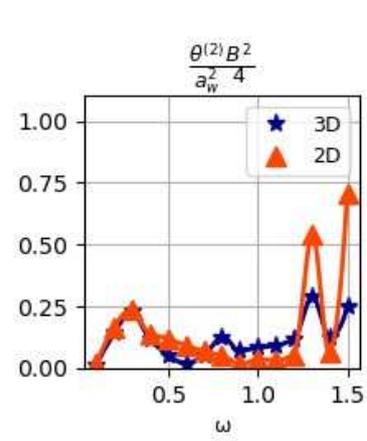


Рис. 6 АЧХ второго порядка бортовой качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ, u_s=0$ )

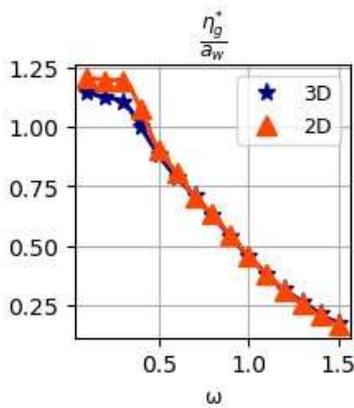


Рис. 7 Суммарная АЧХ поперечно горизонтальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ$ ,  $u_s=0$ )

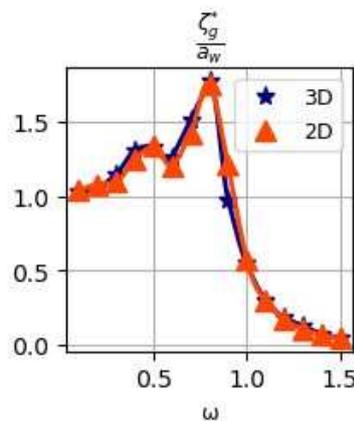


Рис. 8 Суммарная АЧХ вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ$ ,  $u_s=0$ )

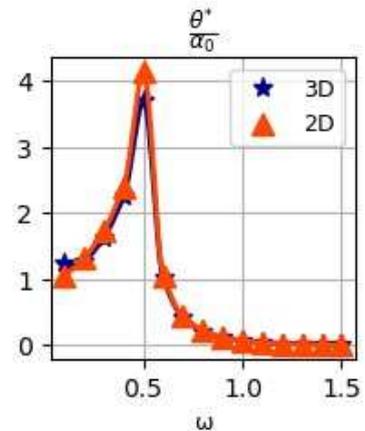


Рис. 9 Суммарная АЧХ бортовой качки для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta=90^\circ$ ,  $u_s=0$ )

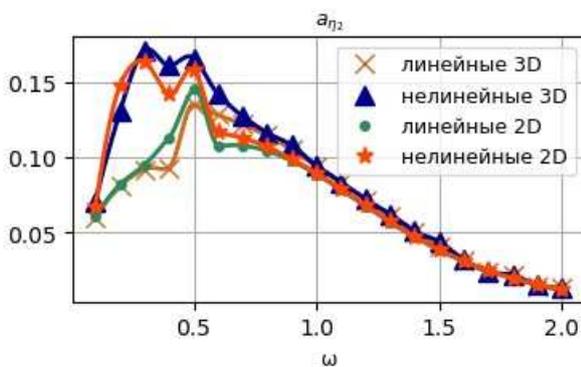


Рис. 10 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» по различным теориям ( $\beta=90^\circ$ ,  $u_s=0$ )

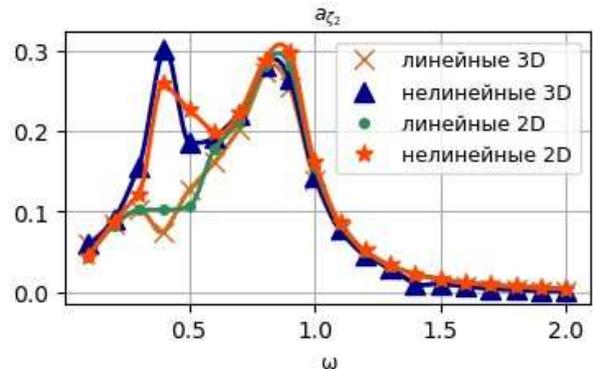


Рис. 11 Вертикальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» по различным теориям ( $\beta=90^\circ$ ,  $u_s=0$ )

### 3.2 Анализ результатов расчета ускорений на регулярном волнении

Расчеты ускорений на регулярном волнении выполнялись для трех точек каждого судна: на носовом перпендикуляре ( $L/2$ ; 0; Н-Т), на правом борту (0;  $B/2$ ; Н-Т) и в точке предполагаемого расположения рубки ( $L/4$ ;  $B/4$ ; Н-Т). Расчеты для каждого судна выполнялись для четырех курсовых углов:  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  и двух скоростей: нулевой и расчетной. На рис. 12 — 44 приведены результаты расчетов трех составляющих ускорений в долях от ускорения  $g$  в зависимости от частоты волнения.

При качке судов на косом попутном угле  $60^\circ$  и отсутствии скорости хода максимальные значения продольных составляющих ускорений не превышают  $0,125g$ . При этом для всех судов наблюдается совпадение расчетов по линейной и нелинейной теориям. Максимальные значения данных ускорений практически одинаковы для всех трех точек, что связано с влиянием составляющей  $g\psi$ , не зависящей от координат точки.

Поперечные составляющие ускорения составляют от  $0,4g$  до  $0,6g$ . Их максимумы находятся в зоне частот  $\omega < 0,7$  и обусловлены резонансом бортовой качки. Для всех трех точек значения данных ускорений не сильно отличаются из-за влияния гравитационной составляющей  $g\theta$ . Отмечается влияние нелинейных факторов на поперечные ускорения в зоне низких частот, которое не превышает 10 %.

Вертикальные составляющие ускорения составляют от  $0,15g$  до  $0,5g$ . Максимальные значения данных составляющих зависят от расчетной точки. Наибольшие значения вертикальных ускорений для курсового угла  $60^\circ$  для всех 4 судов отмечены в точке на носовом перпендикуляре. Наибольшее влияние нелинейных сил отмечается именно на вертикальные составляющие ускорений. Для всех судов оно имеет место в зоне частот  $\omega < 0,5$ . Наибольшее влияние нелинейных сил имеет место в точке на правом борту. Здесь оно может составлять от 50 до 100 % от линейной составляющей и обусловлено влиянием амплитуд вторых гармоник

бортовой качки. Наименьшее влияние нелинейных сил имеет место в точке на носовом перпендикуляре и составляет от 10 до 40 %.

Результаты расчетов ускорений для случая курсового угла  $\beta = 90^\circ$  и  $u_s = 0$  приведены на рис. 12 — 20. Для всех судов отмечаются ничтожно малые значения продольных составляющих ускорений. Поперечные составляющие ускорений составляют от 0,5g до 0,6g в различных точках. Увеличивается влияние нелинейных факторов, которое может достигать 60 — 100 % и имеет место в зонах супергармонических резонансов бортовой качки (см. рис. 13, 16 и 19). При этом данное влияние одинаково для всех точек, что обусловлено гравитационной составляющей, не зависящей от координат точки.

Вертикальные составляющие ускорения составляют от 0,2g до 0,4g. При расположении судна лагом и без скорости имеет место наибольшее влияние нелинейных факторов, которое в ряде случаев может быть больше 100 % (см. рис. 14, 17 и 20). Данное влияние имеет место в зонах супергармонических резонансов. Так, для сухогруза Новгород графики зависимости вертикальной составляющей ускорения от частоты имеют по два «горба». Первый «горб» имеет место в зоне низких частот и обусловлен исключительно нелинейными факторами. Значения ускорений в этих максимумах сопоставимы со значениями вторых максимумов.

При качке на косом встречном курсовом угле  $\beta = 135^\circ$  и отсутствии скорости хода продольные составляющие ускорений составляют от 0,15g до 0,18g. Расчеты данных ускорений в различных точках по линейной и нелинейной теориям совпадают. Поперечные составляющие ускорений составляют от 0,15g до 0,3g. Влияние нелинейных сил не превосходит 10 %. При этом наибольшее их влияние отмечено для балкера «Капитан Панфилов». Вертикальные составляющие ускорений составляют от 0,15g до 0,4g для различных типов судов. Максимальное влияние нелинейных сил отмечается в точках на правом борту и в точке расположения рубки и может достигать в ряде случаев 60 — 70 % от значений, полученных по линейной теории (см. рис. 26 и 29).

Результаты расчетов для случая встречного волнения  $\beta = 180^\circ$  и отсутствия скорости хода показали, что продольные составляющие ускорения составляют от 0,2g до 0,25g для всех судов. Как и для всех других курсовых углов, расчеты по нелинейной теории совпадают с расчетами по линейной. Поперечные составляющие ускорений на встречном волнении отсутствуют из-за симметрии судна относительно диаметральной плоскости.

Вертикальные составляющие ускорения составляют от 0,1g до 0,3g. Наибольшие вертикальные ускорения имеют место в точках на носовых перпендикулярах всех судов. Влияние нелинейных сил не превышает 25 % и отличается в точках на правом борту и в месте расположения рубки. На носовом перпендикуляре влияние нелинейности незначительно.

На рис. 27 — 44 приведены результаты расчетов ускорений на различных курсовых углах при движении каждого судна с его заданной расчетной скоростью.

При курсовом угле  $60^\circ$  максимальные значения продольных составляющих ускорения не превышают 0,125g. При этом расчеты, выполненные по нелинейной теории, практически полностью совпадают с расчетами по линейной теории.

Поперечные составляющие ускорения уменьшаются при наличии скорости хода и не превышают 0,3g. При этом значительно проявляется влияние нелинейных сил в зоне низких частот и может достигать 30 % (см. рис. 29 и 30). Вертикальные составляющие ускорения также значительно уменьшаются по сравнению с отсутствием скорости и не превышают 0,1g. Влияние нелинейных сил имеет место в зоне низких частот и достигает до 20 % практически для всех рассмотренных судов.

Результаты расчетов при расположении судов лагом показали, что в этом случае наблюдается пренебрежимо малые значения продольных составляющих ускорения, не превышающих 0,04g. Поперечные составляющие ускорения меньше, чем при отсутствии скорости хода, что связано с уменьшением влияния бортовой качки. Максимальные значения имеют место в зоне частот  $\omega < 0,6$  и не превосходят 0,5g. Отмечается значительное влияние нелинейных сил, которое может достигать 30 — 50 %.

Вертикальные составляющие ускорения при наличии скорости хода также меньше, чем при ее отсутствии. Их максимальные значения не превышают 0,25g. Однако, при вычислении данных составляющих отмечается наибольшее влияние нелинейных сил. Для всех судов оно имеет место в зоне частот  $\omega < 0,6$  и может достигать от 50 до 150 %.

В зоне частот  $\omega > 0,6$  расчеты поперечных и вертикальных составляющих ускорений, выполненных по нелинейной теории, совпадают с расчетами по линейной теории.

Анализ расчетов ускорений для сочетаний встречного косоугольного угла  $\beta = 135^\circ$  и различных скоростей показал увеличение продольных составляющих ускорений по сравнению с расчетами для нулевой скорости. Максимальные значения не превышают 0,25g. Расчеты по нелинейной теории совпадают с расчетами по линейной.

Поперечные составляющие ускорений уменьшаются по сравнению со случаем нулевой скорости. Их максимальные значения не превышают  $0,25g$ . Значительно уменьшается влияние нелинейных сил по сравнению со случаем расположения судна лагом и не превышает 10 %. Вертикальные составляющие ускорения значительно больше, чем при отсутствии скорости хода и могут составлять  $1g$ . Наибольшие значения имеют место в точках на носовых перпендикулярах всех судов, что обусловлено увеличением амплитуд килевой качки при наличии скорости. Влияние нелинейных сил проявляется в точках на правом борту и в точке расположения рубки и может достигать 20 — 25 %.

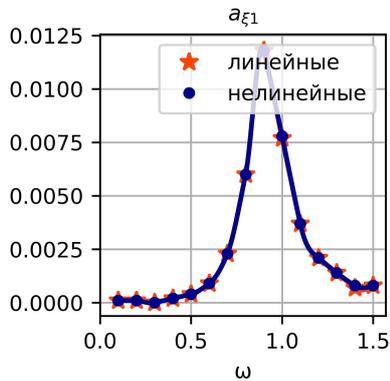


Рис. 12 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

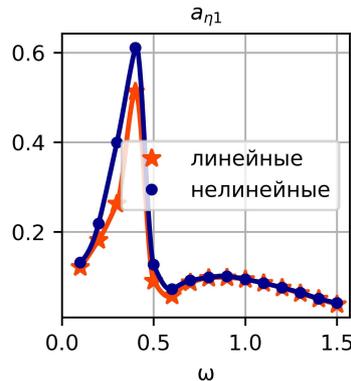


Рис. 13 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

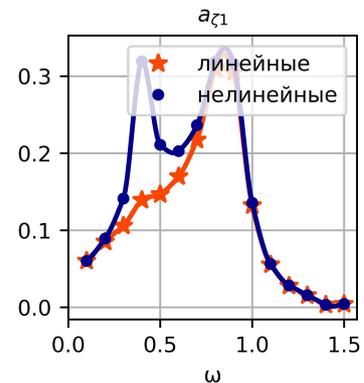


Рис. 14 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

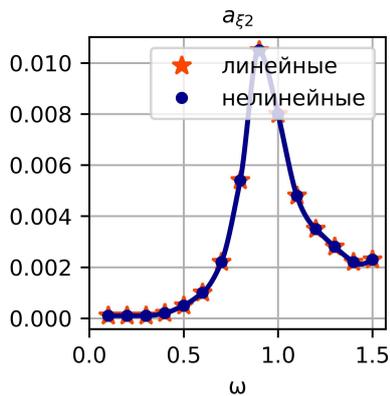


Рис. 15 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

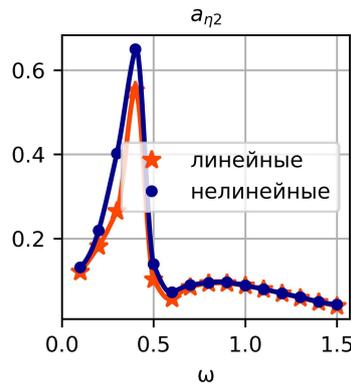


Рис. 16 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

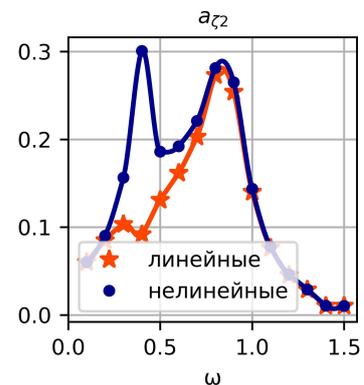


Рис. 17 Вертикальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

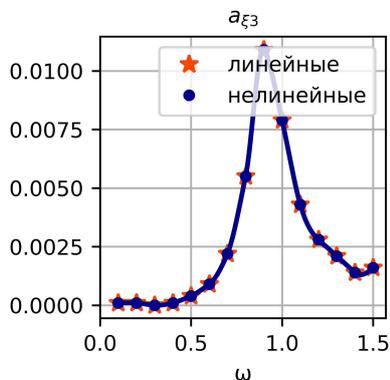


Рис. 18 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

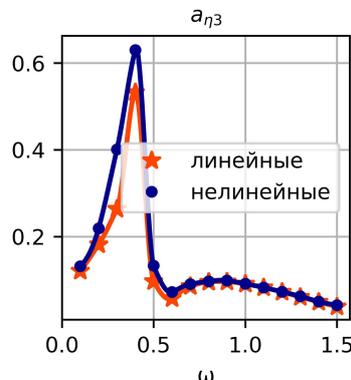


Рис. 19 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

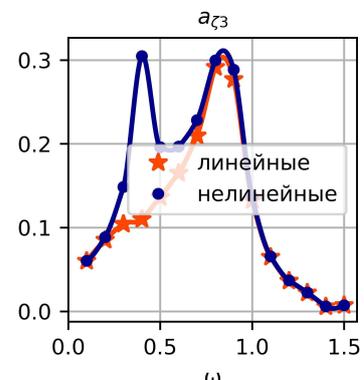


Рис. 20 Вертикальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ( $\beta = 90^\circ$ ,  $u_s = 0$ )

При качке на встречном регулярном волнении и наличии скорости хода отмечаются наибольшие продольные составляющие ускорений. Их максимальные значения могут составлять 0,4g. Вертикальные составляющие также имеют наибольшие значения и могут составлять 1,5g, особенно в точке на носовом перпендикуляре. Влияние нелинейных сил в ряде случаев может достигать 20 %, особенно в точке на правом борту.

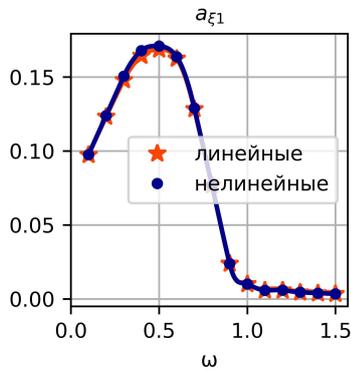


Рис. 21 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

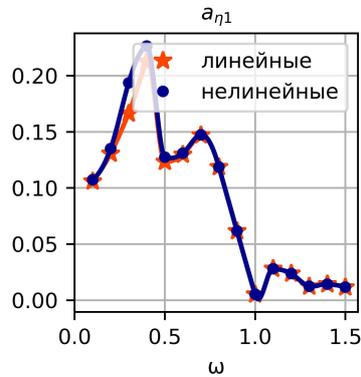


Рис. 22 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

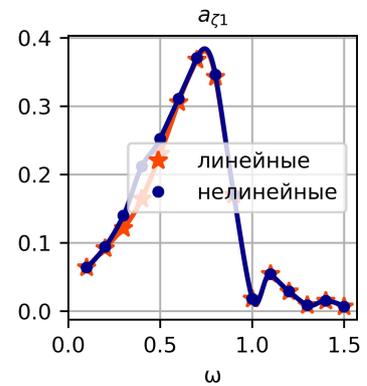


Рис. 23 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

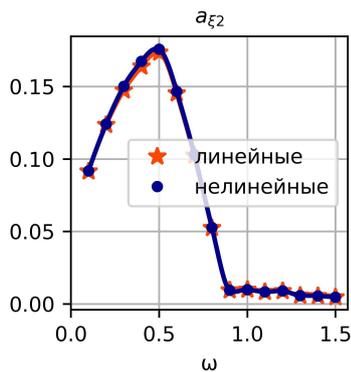


Рис. 24 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

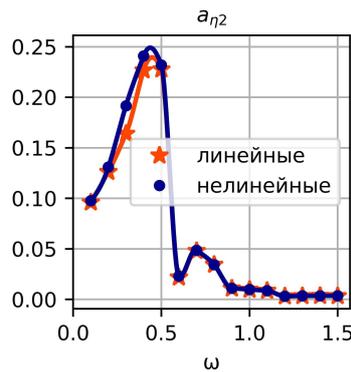


Рис. 25 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

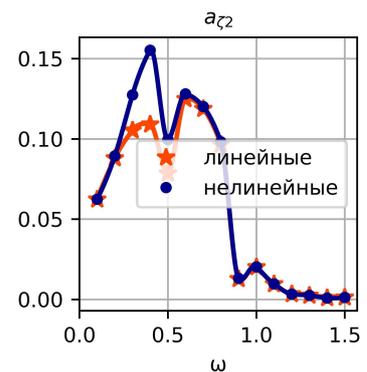


Рис. 26 Вертикальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

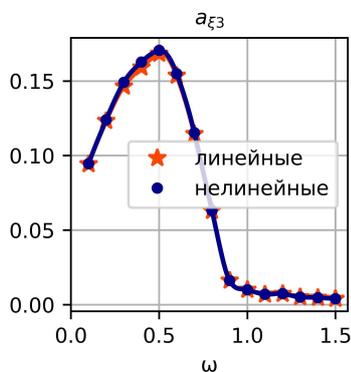


Рис. 27 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

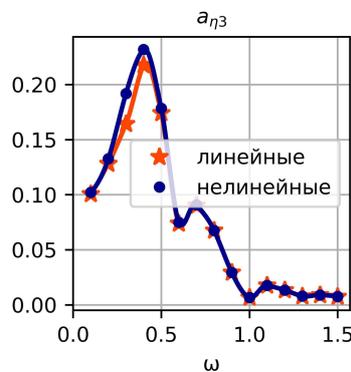


Рис. 28 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

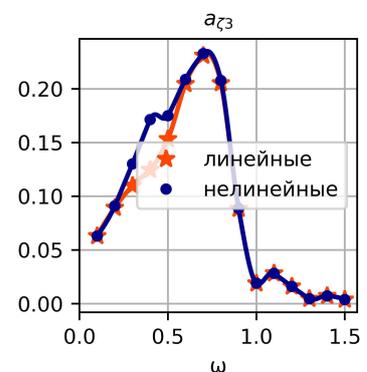


Рис. 29 Вертикальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ( $\beta = 135^\circ, u_s = 0$ )

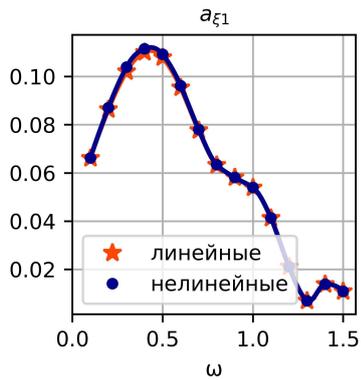


Рис. 30 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

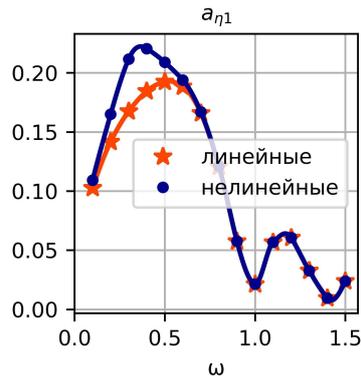


Рис. 31 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

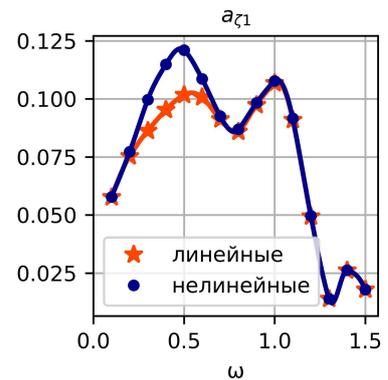


Рис. 32 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

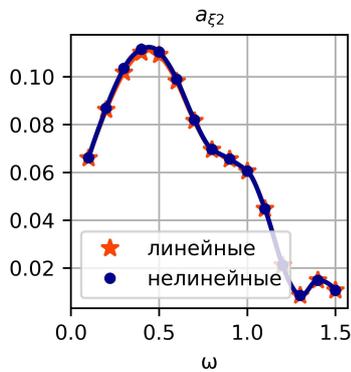


Рис. 33 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

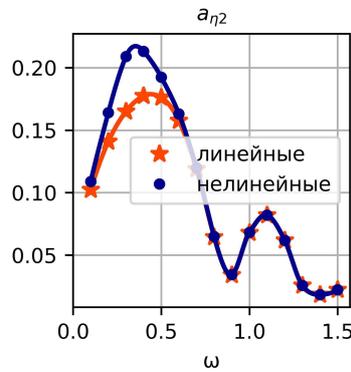


Рис. 34 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

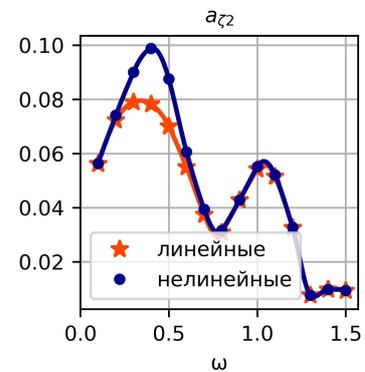


Рис. 35 Вертикальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

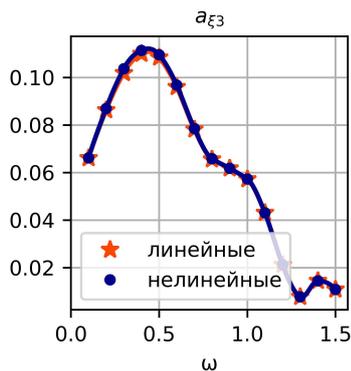


Рис. 36 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

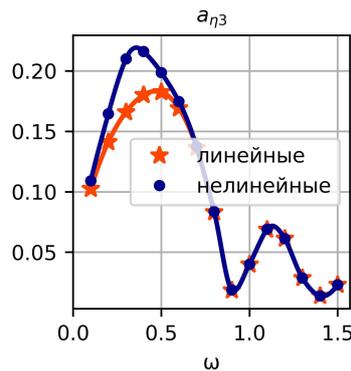


Рис. 37 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

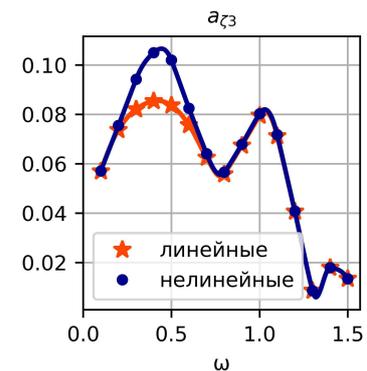


Рис. 38 Вертикальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ( $\beta = 60^\circ$ ,  $u_s = 15,5^\circ$ )

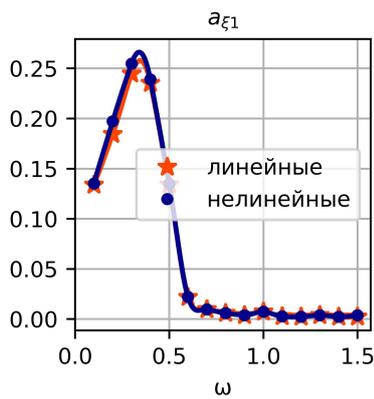


Рис. 39 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ( $\beta = 180^\circ, u_s = 20,3$ )

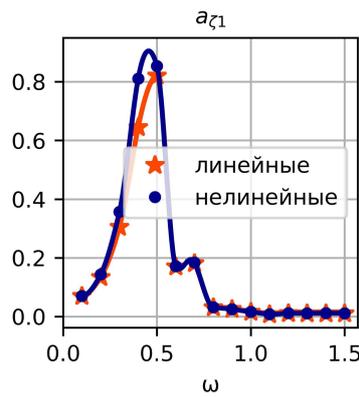


Рис. 40 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ( $\beta = 180^\circ, u_s = 20,3$ )

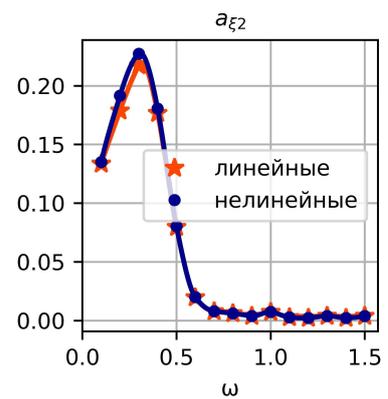


Рис. 41 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ( $\beta = 180^\circ, u_s = 20,3$ )

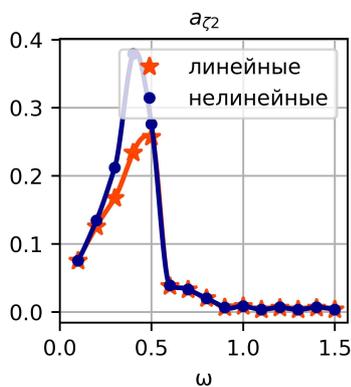


Рис. 42 Вертикальные ускорения на правом борту для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ( $\beta = 180^\circ, u_s = 20,3$ )

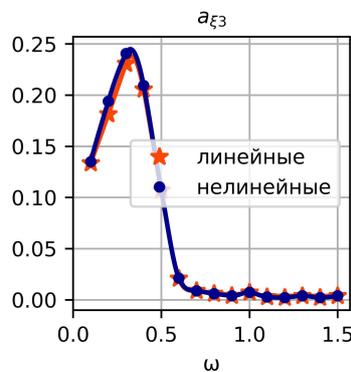


Рис. 43 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ( $\beta = 180^\circ, u_s = 20,3$ )

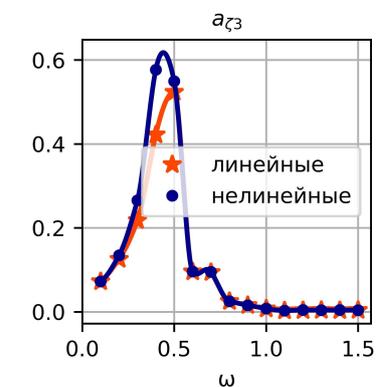


Рис. 44 Вертикальные ускорения на рубке для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ( $\beta = 180^\circ, u_s = 20,3$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

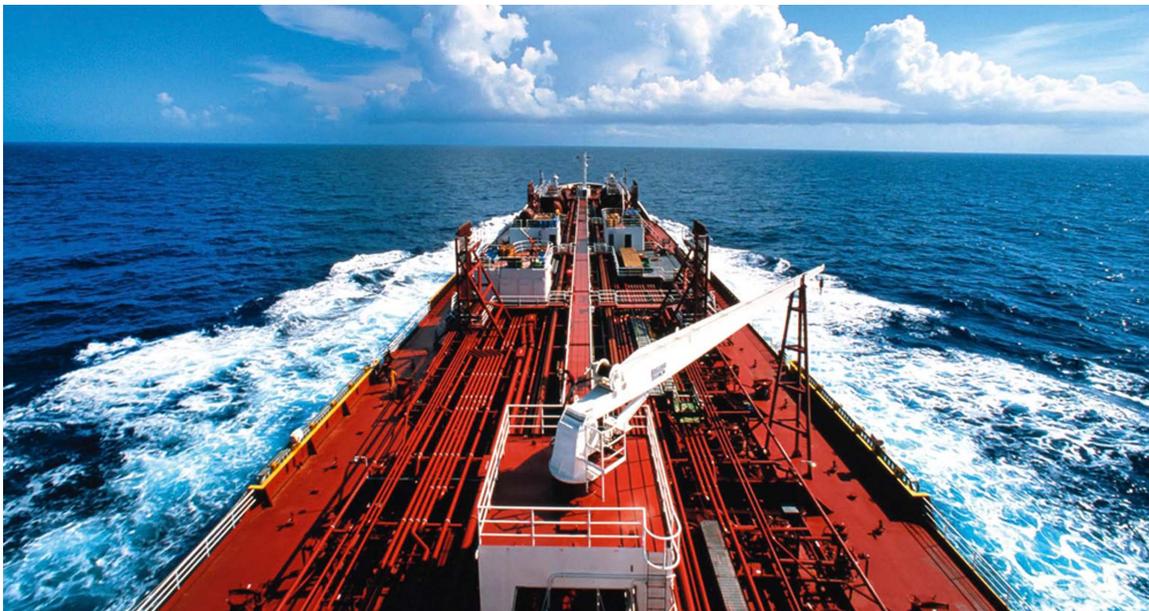
1. Применение трехмерных методов позволяет проводить расчеты ускорений при любых значениях курсовых углов и скоростей.
2. Наибольшие амплитуды поперечных и вертикальных составляющих ускорения имеют место при расположении судна лагом без скорости хода в точках на борту и в зоне расположения рубки.
3. Наибольшие продольные составляющие ускорения имеют место на встречном волнении при наличии скорости хода в точках на носовом и кормовом перпендикулярах.
4. Наибольшее влияние нелинейных сил проявляется на поперечные и вертикальные составляющие ускорений и имеет место в зонах супергармонических резонансных режимов бортовой качки и может в ряде случаев достигать 100 %. Наименьшее влияние нелинейных сил имеет место на продольные составляющие ускорений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля Л., Судостроение, 1966.
2. Семенова В. Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов // Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ, 2005.
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение инерционно-демпфирующих сил второго порядка малости, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории // Морские интеллектуальные технологии, № 2(44), т. 1, с. 36 — 44, 2019.
4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 4-1 (40), с. 63 — 69, 2019.
5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 2-2 (48), 2020.
6. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии, № 2, т. 3, с. 20 — 28, 2021.
7. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна. Морские интеллектуальные технологии. № 4, т. 2, с. 21 — 31, 2021.
8. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. № 2, ч. 2, с. 125 — 133, 2022.
9. Со Чжо Ту Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье // Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Библиотека СПбГМТУ, 2014.
10. Со Чжо Ту, Семенова В.Ю. Расчет ускорений, возникающих при поперечной качке судна на мелководье с учетом нелинейных сил второго порядка // Морской Вестник, 2014, № 2 (50), 2014, с. 99 — 101.

## REFERENCES

1. Lugovskiy V.V. *Nelineynye zadachi morekhodnosti korablya* [Non-linear tasks of ship's seaworthiness], L., Sudostroenie, 1966.
2. Semenova V.Yu. *Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov sudov* [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] // DSc thesis, Biblioteka SPBGMTU, 2005.
3. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye inertsionno-dempfiruyushchikh sil vtorogo poryadka malosti, voznikayushchikh pri kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of the second order inertial-damping forces arising during the oscillations of the ship based on the three-dimensional potential theory] // Marine Intellectual Technologies, No. 2(44), vol. 1, pp. 36 — 44, 2019.
4. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vertikalnoy kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of nonlinear forces of the second order arising during the heaving of a ship, based on three-dimensional potential theory]. Marine intellectual technologies, No. 4-1 (40). pp. 63 — 69, 2019.
5. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri poperechno-gorizontalnykh i bortovykh kolebaniyakh sudov na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of nonlinear second-order forces arising from horizontal and rolling motions of ships based on three-dimensional potential theory]. Marine intellectual technologies, No. 2-2 (48), pp. 11 — 18, 2020.
6. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystviyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoy teorii* [The determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory]. Marine intellectual technologies, No. 2, vol. 3, pp. 20 — 28, 2021.
7. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdelnykh vidov kachki sudna* [Determination of nonlinear forces of the second order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions]. Marine intellectual technologies No. 4, vol. 2, pp. 21 — 31, 2021.
8. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Chislennoye opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii otdelnykh vidov kachki sudna na regulyarnom volnenii* [Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves] Marine intellectual technologies, No. 2, Pt. 2, pp. 125 — 133, 2022.
9. So Chzho Tu *Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovodye* [Development of the method for calculating second-order nonlinear forces due to ship's motions in shallow water] // PhD thesis, Biblioteka SPBGMTU, 2014.
10. So Chzho Tu, Semenova V.Yu. *Raschet uskoreny, voznikayushchikh pri poperechnoy kachke sudna na melkovodye s uchetom nelineynykh sil vtorogo poryadka* [The calculation of the accelerations occurring during cross rolling of the ship in shallow waters with non-linear forces of the second order]. Morskoy Vestnik No. 2 (50), pp. 99 — 101, 2014.



## ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.123:532.583.4

### МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ СКОРОСТЕЙ ПРИ УДАРЕ СУДНА ВЕРТИКАЛЬНЫМ БОРТОМ О КРОМКУ ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ

**В.Н. Тряскин**, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

**В.С. Мороз**, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: vera.moroz@smtu.ru

В настоящей статье рассмотрены основные положения методики и алгоритм определения допустимых скоростей при ударе вертикальным бортом о кромку льда с учетом возможного разрушения ледяного покрова небольшой толщины от потери устойчивости. Выделены случаи взаимодействия корпуса судна со льдом, которые требуют решения задачи определения допустимых скоростей в такой постановке. Представлены основные расчетные зависимости, позволяющие определить максимальные контактные давления и погонную нагрузку, а также наибольшее суммарное контактное усилие. Предложена практическая процедура перехода от строительной к ледовой прочности, которая может быть реализована средствами MS Excel, т.е. без привлечения специализированного программного обеспечения. Решение задачи показано применительно к транспортным судам, имеющим низкий ледовый класс, бульбовые обводы и вертикальные борта в районе носового заострения при поперечной и продольной системах набора бортовых конструкций. Предполагается, что допустимые скорости регламентируются только строительной прочностью основного бортового набора — основных и промежуточных шпангоутов при поперечной системе набора и продольных бортовых балок при продольной системе набора. Результаты исследований, представленные в статье, предназначены для включения в новые методические рекомендации Российского морского регистра судоходства (РС) по разработке сертификатов безопасности судов ледовых классов.

**Ключевые слова:** судно ледового класса, допустимые скорости движения во льдах, строительная прочность, ледовая прочность

## METHODOLOGY AND ALGORITHM FOR DETERMINATION OF PERMISSIBLE SPEEDS AT A SHIP'S VERTICAL SIDE CRASH AGAINST THE ICE FIELD EDGE

V.N. Tryaskin, DSc, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg,  
e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru.

V.S. Moroz, SMTU, St. Petersburg, e-mail: vera.moroz@smtu.ru

The article discusses the main provisions of the methodology and the algorithm for determining the permissible speeds when a vertical ship's hull side impacts the edge of the ice cover, taking into account the possible breakage of the ice cover of small thickness from the buckling. The cases of ship hull interaction with ice that require solving the problem of determining permissible speeds in this formulation have been identified. The principal calculation dependencies allowing to determine the maximum contact pressure and linear load, as well as the maximum contact force, have been presented. A procedure of transition from structural strength to ice strength, which can be implemented by means of MS Excel, i.e. without involving specialized software, has also been proposed. The solution of this problem is shown as applied to merchant ships having low ice class, bulbous bow and vertical sides in the area of the waterline entrance for transverse and longitudinal framing of sides. It is assumed that the permissible speeds are determined only by the structural strength of the side stiffeners — main and intermediate frames in case of transverse framing and longitudinals in case of longitudinal framing. The results of investigation presented in the article are intended for inclusion in the new methodological recommendations of the Russian Maritime Register of Shipping (RS) for the development of safety certificates for ice-going ships.

**Keywords:** ice going ship, permissible speeds in ice, structural strength, ice strength

### ВВЕДЕНИЕ

Задача об определении допустимых скоростей движений судна во льдах на основе гидродинамической модели взаимодействия судна со льдом была рассмотрена в работе [1] — для судов, имеющих в зоне контакта со льдом наклонные борта и частично в [2] — для случая, когда в районе контакта со льдом борт вертикальный. Применительно к судам первой группы существуют обстоятельная методика и программное обеспечение, которые используются для разработки ледовых паспортов [3]. Методика определения допустимых скоростей при ударе вертикальным бортом о кромку льда до конца не разработана и не апробирована.

В настоящей статье рассмотрены основные положения методики и алгоритм определения допустимых скоростей при ударе вертикальным бортом о кромку льда с учетом возможного разрушения ледяного покрова небольшой толщины от потери устойчивости. Выделены случаи взаимодействия корпуса судна со льдом, которые требуют решения задачи определения допустимых скоростей в такой постановке. Представлены основные расчетные зависимости, позволяющие определить максимальные контактные давления и погонную нагрузку, а также наибольшее суммарное контактное усилие. Предложена практическая процедура перехода от строительной к ледовой прочности, которая может быть реализована средствами MS Excel, т.е. без привлечения специализированного программного обеспечения. Решение задачи показано применительно к транспортным судам, имеющим низкий ледовый класс, бульбовые обводы и вертикальные борта в районе носового заострения при поперечной и продольной системах набора бортовых конструкций. Предполагается, что допустимые скорости регламентируются только строительной прочностью основного бортового набора — основных и промежуточных шпангоутов при поперечной системе набора и продольных бортовых балок при продольной системе набора.

### 1. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

К удару вертикальным бортом о кромку ледяного поля могут быть сведены три случая взаимодействия корпуса судна со льдом.

1. В районе переменных ватерлиний есть вертикальные участки судовой поверхности, развернутые навстречу направлению движения судна, когда возможно следующее сочетание значений углов наклона ватерлинии  $\alpha$  и борта  $\beta$  к диаметральной плоскости:  $\beta \approx 0$  при  $\alpha > 0$ . Наличие таких участков конструкций является характерным для корпусов судов с бульбовыми обводами, имеющих низкую категорию ледовых усилений корпуса, или вообще без ледовых усилений. Аналогичная проблема может возникать и в случае нерационального выбора формы корпуса судна ледового класса, прежде всего, в районах перехода в

цилиндрическую вставку, когда углы наклона ватерлинии еще существенно отличаются от нуля  $\alpha \neq 0$ , а углы наклона борта уже незначительные —  $\beta \leq 3 \div 5^\circ$  или нулевые  $\beta = 0^\circ$ .

2. При ударе происходит смятие льда на всю толщину, соответствующее условию  $b_s \cos \beta \geq H$  ( $b_s$  — высота зоны контакта;  $H$  — толщина льда). Это практически означает, что нарушается допущение гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом об одномерности вытеснения промежуточного слоя в зоне контакта, вполне обоснованно принятое применительно к удару наклонным бортом. Такая ситуация обычно возникает при углах наклона борта  $\beta \leq 3 \div 5^\circ$ , когда с некоторой ошибкой в безопасную сторону борт можно считать вертикальным.

3. Взаимодействие со льдом при вторичном (отраженном) ударе с вертикальным бортом в среднем районе ледовых усилений.

При ударе вертикальным бортом о кромку ледяного покрова смятие кромки льда происходит по всей толщине ледяного покрова, и зона контакта имеет форму прямоугольника практически при любой представляющей интерес геометрии формы кромки льда (см. рис. 1).

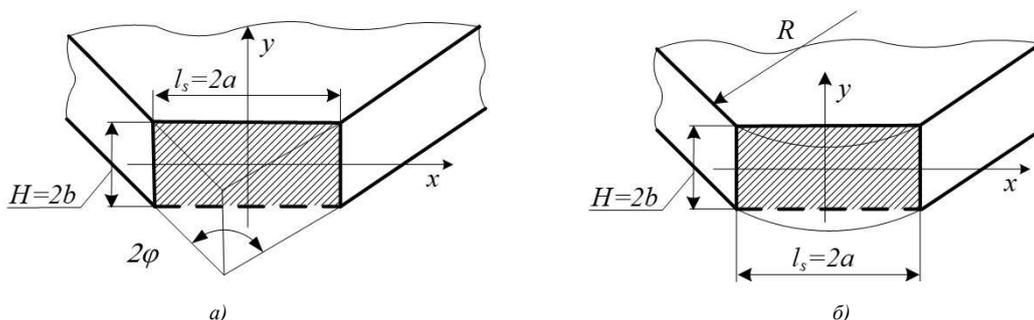


Рис. 1 Смятие кромки льдины вертикальным бортом:  
 а) — угловая кромка ( $2\varphi$  — угол раствора клина); б) — скругленная кромка ( $R$  — радиус скругления кромки)

Каждому заданному моменту взаимодействия соответствует определенное соотношение сторон зоны контакта, при этом в процессе удара высота зоны контакта  $b_s$  остается постоянной и равной расчетной толщине ледяного покрова  $H$ , а длина зоны контакта  $l_s$  непрерывно изменяется и зависит от глубины внедрения борта в лед.

Решение задачи об ударе вертикальным бортом о кромку ледяного покрова приводит к следующей зависимости для определения контактного давления при ударе [4]:

$$p = w^{1/4} a_p^{6/5} \left( \frac{a^2 b^2}{a^2 + b^2} \right)^{1/4} (1 - \bar{x}^2)^{1/4} (1 - \bar{y}^2)^{1/4}, \tag{1}$$

где  $w$  — скорость внедрения борта в лед;  
 $a_p$  — параметр, характеризующий динамическую прочность льда при раздроблении;  
 $a$  и  $b$  — половины длины и высоты зоны контакта;  
 $\bar{x} = x/a$ ;  
 $\bar{y} = y/b$ .

Если подставить выражение (1) в дифференциальное уравнение движения в направлении удара

$$\frac{M}{C} w \frac{dw}{d\zeta} + \int_F^{\zeta} p dF = 0, \tag{2}$$

где  $M$  — масса судна;  
 $C$  — коэффициент приведения массы;  
 $w$  — скорость внедрения;  
 $\zeta$  — глубина внедрения;  
 $F$  — площадь зоны контакта,

и произвести последующее его интегрирование по площади зоны контакта путем введения вспомогательной переменной (метод подстановки), то уравнение (2) можно представить как

$$M^{red} w \frac{dw}{d\zeta} + 3,05 w^{1/4} a_p^{6/5} \left( \frac{a^6 b^6}{a^2 + b^2} \right)^{1/4} = 0, \tag{3}$$

где  $M^{red} = M/C$  — масса судна, приведенная к направлению удара (приведенная масса);  
 $b = b_s/2 = H/2 = \text{const}$ ;  
 $a = l_s/2 = a(\zeta) = \zeta \operatorname{tg} \varphi$  — для угловой кромки ледяного покрова;

$l_S/2 \equiv a = a(\zeta) = \sqrt{(2R)\zeta}$  — для скругленной кромки ледяного покрова;  
 $\varphi, R$  — параметры формы кромки (см. рис. 1);  
 $H$  — расчетная толщина ледяного покрова;  
 $\zeta$  — глубина внедрения борта в лед.

Выполняя интегрирование уравнения (3) с учетом заданного начального условия  $w_0 = v_0^{red} = v_0 l$ , определяющего приведенную к направлению удара скорость внедрения борта в лед в начальный момент его контакта с кромкой ледяного покрова ( $t=0, \zeta=0$ ), где  $v_0$  — скорости хода судна,  $l$  — направляющий косинус<sup>1</sup>, после преобразований к безразмерному виду можно получить следующую зависимость для определения скорости внедрения борта в лед:

$$w = w_0 \left[ 1 - Z \int_0^\xi \left( \frac{\xi^m}{1+\xi} \right)^{1/4} d\xi \right]^{4/7}, \quad (4)$$

где  $\xi = \xi(\zeta) = [l_S(\zeta)/H]^2$  — безразмерный параметр, представляющий собой квадрат отношения длины зоны контакта к ее высоте;  
 $m=1$  — для угловой кромки;  
 $m=3$  — для скругленной кромки ледяного покрова.

Безразмерный параметр  $Z$  определяется в зависимости от общих параметров, непосредственно характеризующих заданный режим взаимодействия корпуса судна со льдом, и от геометрических параметров конкретных точек удара (т.е. линейных координат и углов наклона) согласно следующим выражениям

$$Z = 0,236 \frac{(a_p)^{1,2} H^{7/2}}{M^{red} (v_0^{red})^{7/4} (\text{tg } \varphi)} \quad (5)$$

для угловой кромки;

$$Z = 0,236 \frac{(a_p)^{1,2} H^{9/2}}{M^{red} (v_0^{red})^{7/4} (2R)} \quad (6)$$

для скругленной кромки.

Изменение контактного давления в процессе удара (в процессе внедрения борта в лед) определяется следующей зависимостью:

$$p = p_0 \left[ 1 - \bar{\xi}^n \right]^{1/7} \left( \frac{\xi}{1+\xi} \right)^{1/4}, \quad (7)$$

где  $p_0 \approx 0,707 (v_0^{red})^{1/4} (a_p)^{1,2} H^{1/2}$ ;  
 $\bar{\xi} = \xi / \xi_{\max}$ .

Значение  $\xi_p$ , которое соответствует максимуму контактного давления, определяется из условия  $\partial p / \partial \xi = 0$ . Можно показать, что параметр  $\xi_p$  можно определить из уравнения

$$\xi_p^{n+1} + \left( 1 + \frac{7}{4n} \right) \xi_p^n - \frac{7}{4n} \xi_{\max}^n = 0. \quad (8)$$

Изменение суммарной контактной силы в процессе удара (в процессе внедрения борта в лед) происходит в соответствии со следующей зависимостью:

$$P = P_0 \left[ 1 - \bar{\xi}_n \right]^{1/7} \left( \frac{\xi^3}{1+\xi} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

где  $P_0 \approx 0,539 (v_0^{red})^{1/4} (a_p)^{1,2} H^{5/2}$ .

Безразмерный параметр  $\xi_p$ , соответствующий максимальному значению суммарной контактной силы, определяется в результате решения уравнения (10), которое вытекает из условия  $dP/d\xi_p = 0$ :

$$4n \xi_p^n (1 + \xi_p) - 7 \xi_{\max}^n (2\xi_p + 3) + 7 \xi_p^n (2\xi_p + 3) = 0. \quad (10)$$

<sup>1</sup>Косинус угла между вектором скорости  $v_0$  и направлением нормали к борту в точке удара.

В формулы (7) и (9) входит безразмерный параметр  $\bar{\xi} = \xi/\xi_{\max}$ , равный отношению текущего,  $\xi$  и максимального,  $\xi_{\max}$  значения квадрата относительной длины зоны контакта. Значение  $\xi_{\max}$  соответствует максимальному значению глубины внедрения борта в лед, определяемому в конечный момент его контакта с кромкой ледяного покрова ( $t = T, w = 0$ ):

$$\xi_{\max} = [I_S(\zeta_{\max})/H]^2, \quad (11)$$

где  $I_S(\zeta_{\max})$  — длина зоны контакта, при которой достигает максимума глубина внедрения борта в лед.

Параметр  $\xi_{\max}$  может быть найден либо непосредственно в результате решения уравнения (4) при выполнении очевидного условия  $w/w_0 = 0$ :

$$\int_0^{\xi_{\max}} \left( \frac{\xi^m}{1+\xi} \right)^{1/4} d\xi = 1/Z, \quad (12)$$

либо приближенно с использованием достаточно простых зависимостей

$$\xi_{\max} = \max \left[ \xi_1 = \left( \frac{7}{4} \cdot \frac{1}{Z} \right)^{4/7}; \xi_2 = \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{Z} \right)^{2/3} \right]. \quad (13)$$

Выражения (13), приведенные для оценки параметра  $\xi_{\max}$ , были получены из уравнения (12) при рассмотрении двух предельных случаев:

- величина  $\xi_1$  соответствует слабому удару, для которого предполагается, что зона контакта оказывается вытянутой в вертикальном направлении, а вытеснение раздробленного льда осуществляется преимущественно в продольном направлении ( $\xi_{\max} \ll 1; n = 7/4$ );
- величина  $\xi_2$  соответствует сильному удару, для которого предполагается, что зона контакта оказывается вытянутой в продольном направлении, а вытеснение раздробленного льда осуществляется преимущественно в вертикальном направлении ( $\xi_{\max} \gg 1; n = 3/2$ ).

При ударе вертикальным бортом может иметь место разрушение ледяного покрова вследствие потери устойчивости при действии горизонтальной составляющей суммарной контактной силы (действием ее вертикальной составляющей пренебрегают ввиду крайне малых или равных нулю значений угла наклона борта). Разрушение ледяного покрова в процессе удара корпуса судна о лед происходит, если выполняется следующее условие:

$$\xi_d < \xi_P \text{ или } \xi_d/\xi_P < 1, \quad (14)$$

где  $\xi_d = [I_S(\zeta_d)/H]^2$  — безразмерный параметр (квадрат характеристического отношения), соответствующий приведенной к направлению удара нагрузке, разрушающей ледяной покров  $P_d$ .

После реализации ряда подстановок и преобразований уравнение для определения параметра  $\xi_d$  принимает окончательный вид

$$f_0(\xi_d) = \int_0^{\xi_d} \left( \frac{\xi^m}{1+\xi} \right)^{1/4} d\xi = \frac{1}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot (P_d/P_0)^7 \cdot \left( \frac{1+\xi_d}{\xi_d^3} \right)^{7/4}. \quad (15)$$

В случае неразрушения ледяного покрова максимальные значения контактного давления и суммарной контактной силы следует находить с использованием расчетных зависимостей (7) и (9). В случае разрушения ледяного покрова указанные зависимости должны быть переписаны, полагая  $\xi = \xi_d$ , следующим образом:

$$p = p_0 \left( 1 - \left( \frac{\xi_d}{\xi_{\max}} \right)^n \right)^{1/7} \left( \frac{\xi_d}{1+\xi_d} \right)^{1/4}. \quad (16)$$

Значение  $\xi_d$  определяется из условия равенства суммарного контактного усилия нагрузке, разрушающей ледяной покров в результате потери устойчивости  $P_d = P_e$ :

$$P = P_d = P_0 \left[ 1 - \left( \frac{\xi_d}{\xi_{\max}} \right)^n \right]^{1/7} \left( \frac{\xi_d^3}{1+\xi_d} \right)^{1/4} \xi_d^{1/2}, \quad (17)$$

где  $P_d = P_e = 4,23 \cdot \sqrt[4]{\rho_w \cdot g \cdot D_{ice}^3}$ ;

$\rho_w$  — расчетная плотность морской воды;

$g$  — ускорение свободного падения;

$D_{ice} = E \cdot H_{ice}^3 / [12(1 - \mu^2)]$  — цилиндрическая жесткость ледяной пластины;

$E$  — модуль нормальной упругости льда;

$\mu$  — коэффициент поперечной деформации льда;

$H_{ice}$  — толщина ледяного покрова.

Между значениями величин  $\xi_p$ ,  $\xi_P$  и  $\xi_{\max}$  выполняется соотношение

$$\xi_p < \xi_P < \xi_{\max},$$

которое необходимо учитывать при численном решении уравнений (8) и (10). Если при ударе вертикальным бортом возможно разрушение льдины от потери устойчивости, то очевидно выполнение условия

$$\xi_d < \xi_P < \xi_{\max}.$$

Допустимые скорости при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля можно получить путем сопоставления строительной и ледовой прочности конструкций корпуса судна. Кривая строительной прочности может быть представлена следующей зависимостью

$$p(H, l_s) = p(H, \xi). \quad (18)$$

Приравняв правые части выражений (18) и (7) соответственно, получим следующие зависимости для определения скорости внедрения:

$$w_0 = \left\{ \left[ \frac{p(H, \xi)(1 + \xi)^{0,25}}{0,707 a_p^{1,2} H^{0,5} \xi^{0,25}} \right]^7 + \frac{0,236 H^{3,5}}{M_{red}(\text{tg } \varphi)} \right\}^{4/7} \quad (19)$$

при ударе об угловую кромку и

$$w_0 = \left\{ \left[ \frac{p(H, \xi)(1 + \xi)^{0,25}}{0,707 a_p^{1,2} H^{0,5} \xi^{0,25}} \right]^7 + \frac{0,236 H^{4,5}}{M_{red}(2R)} \right\}^{4/7} \quad (20)$$

при ударе о скругленную кромку.

Уравнения (19) и (20) определяют поверхность в осях  $w_0$ ,  $a_p$ ,  $H$ , а  $\xi$  можно рассматривать как внутренний параметр. При заданных значениях толщины льда  $H$  и измерителя динамической прочности льда на раздробление  $a_p(H)$  [5], учитывая связь между скоростью поступательного движения судна и скоростью внедрения  $v_0 = w_0/l$  можно получить кривую  $v_0(H)$  для рассматриваемого участка по длине корпуса судна, характеризуемого строительной прочностью (18). Расчетной будет минимальная скорость, полученная по кривой  $v_0(H)$ .

При построении кривой строительной прочности обшивки и набора ледового пояса необходимо учесть редуцирующий коэффициент  $k_i \leq 1,0$ , связанный с характером распределения интенсивности распределения ледовой нагрузки (давлений) по зоне контакта. В этом случае давление должно определяться по формуле  $p = k_i p_{\max}$ .

Принципы определения этого коэффициента зависят от того, по какому параметру должна достигаться эквивалентность. Если площадь, поддерживаемая связью, существенно меньше площади зоны контакта (для построения строительной прочности обшивки при поперечной системе набора), то

$$k_1 = 1.$$

В случае, когда следует сохранить погонную нагрузку, т.е. участок, поддерживаемый связью, имеет один размер, соизмеримый с толщиной льда, а другой — порядок шпации (для построения строительной прочности обшивки при продольной системе набора и балок основного набора при поперечной и продольной системах набора),

$$k_2 = \int_0^1 (1 - \bar{x}^2)^{1/4} d\bar{x} \approx 0,87.$$

Если следует обеспечить равенство суммарной нагрузки упрощенной и теоретической эпюр (для построения строительной прочности балок рамного набора — рамных шпангоутов и несущих стрингеров), то

$$k_3 = \iint_0^1 (1 - \bar{x}^2)^{1/4} (1 - \bar{y}^2)^{1/4} d\bar{x} d\bar{y} \approx 0,76.$$

## 2. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ДОПУСТИМЫХ СКОРОСТЕЙ

Предлагается следующий алгоритм построения кривых допустимых скоростей для участков корпуса с вертикальным бортом, при этом предполагается, что безопасные допустимые режимы определяются строительной прочностью балок основного набора: шпангоутов при поперечной системе набора и бортовых продольных балок — при продольной системе набора.

1. Выбираются участки борта, для которых будут определяться параметры допустимых режимов — толщина льда и скорость движения судна.

2. Формируются расчетные зависимости, определяющие кривые строительной прочности наружной обшивки, балок основного набора. Кривые строительной прочности (18) готовятся на основе анализа работы конструкций выбранных участков борта при заданном предельно допусаемом состоянии конструкций.

3. Выбирается ряд расчетных значений толщины льда,  $H$ , м, для которых будет определяться допустимая скорость, перекрывающий диапазон толщин, представляющих практический интерес для заданного района эксплуатации судна, например:  $H=0,50\ 0,75\ 1,00\ 1,25\ 1,50\ 1,75\ 2,00$ .

Массив значений одного из параметров кривой строительной прочности — высоты зоны контакта  $b_s$ , соответствует принятому массиву значений толщины льда  $b_s=H$ .

4. Согласно рекомендациям [5] определяются соответствующие значения параметра динамической прочности льда на раздробление  $a_p(H)$ .

5. Для заданной толщины льда  $H$  определяются начальная скорость движения судна  $v_0$ , соответствующее значение скорости внедрения  $w_0=v_0^{red}=v_0l$  и квадрат характеристического отношения  $\xi_p$  (соответствующий максимальному контактному давлению), при которых соблюдается равенство строительной и ледовой прочности конструкций, т.е. совместно решаются уравнения (8) и (18). Для этой цели может быть использован инструмент MS Excel «Поиск решения».

6. По формулам (10), (17) определяются значения параметров  $\xi_p$  и  $\xi_d$ . Проверяется выполнение условия влияния разрушения льда от потери устойчивости  $\xi_d < \xi_p < \xi_p$ . Для решения этих уравнений может использоваться инструмент MS Excel «Подбор параметра».

7. Если  $\xi_d < \xi_p$ , то значения  $v_0$  определяется путем совместного решения уравнений (17) и (18) с учетом условия  $\xi = \xi_d$ .

8. Указанные в пп. 4 — 7 расчеты выполняются для всех выбранных значений толщины льда  $H$  (согласно п. 3). В результате получим множество точек, по которым строится кривая допустимых скоростей  $v(H)$  для рассматриваемого участка конструкции.

9. Кривая ледовой прочности для судна в целом строится как огибающая кривых допустимых скоростей построенных для ряда характерных участков корпуса судна в районе носового заострения.

Кривые допустимых скоростей, построенные на основе предложенного алгоритма, для двух судов с поперечной и продольной системой набора в районе носового заострения представлены на рис. 2.

Строительная прочность балок основного набора при поперечной системе набора представлялась в виде аналитических зависимостей (кривых строительной прочности), которые могут быть построены на основе требований Правил Регистра 1990 года.<sup>1</sup> [6]:

$$p_w(b_s) = R_{eH} \frac{W_{act}}{10^3 k_M (b_s/l) a l} \cdot 1/b_s \quad (21)$$

$$p_A(b_s) = 0,57 R_{eH} \frac{A_w act}{10 k_M (b_s/l) a} \cdot 1/b_s \quad (22)$$

Строительная прочность продольных бортовых балок при продольной системе набора представлялась в виде зависимостей, определяющих поверхность строительной прочности, которые могут быть построены на основе решения задачи об изгибе неразрезной балки, нагруженной равномерно распределенной ледовой нагрузкой на участке высотой  $b_s$  и длиной  $l_s$  с учетом сдвига и частичного вовлечения в работу незагруженных продольных балок

$$p_{yw}(l_s, b_s) = R_{eH} \frac{W_{act}}{k_M(l_s, b_s) a_w^2} \cdot 1/b_s \cdot 10^{-3}; \quad (23)$$

<sup>1</sup> Поправки на износ элементов сечения шпангоутов не учитывались; считается, что они включены в проектные (фактические) значения момента сопротивления поперечного сечения и площади сечения стенки.

$$p_{y\_A}(l_s, b_s) = 0,57 R_{eH} \frac{A_{w\_act}}{k_N(l_s, b_s) a_w} \cdot 1/b_s \cdot 10 \quad (24)$$

В расчетных зависимостях (21) — (24)  $W_{act}$  — фактический момент сопротивления поперечного сечения балки,  $\text{см}^3$ ;  $A_{w\_act}$  — фактическая площадь сечения стенки балки,  $\text{см}^2$ ;  $R_{eH}$  — предел текучести стали, МПа;  $k_M(\dots)$ ,  $k_N(\dots)$  — коэффициенты расчетного изгибающего момента и расчетной перерезывающей силы;  $l$  — пролет шпангоута, м;  $a_w$  — пролет продольной балки, м;  $a$  — расстояние между шпангоутами/ продольными балками, м.

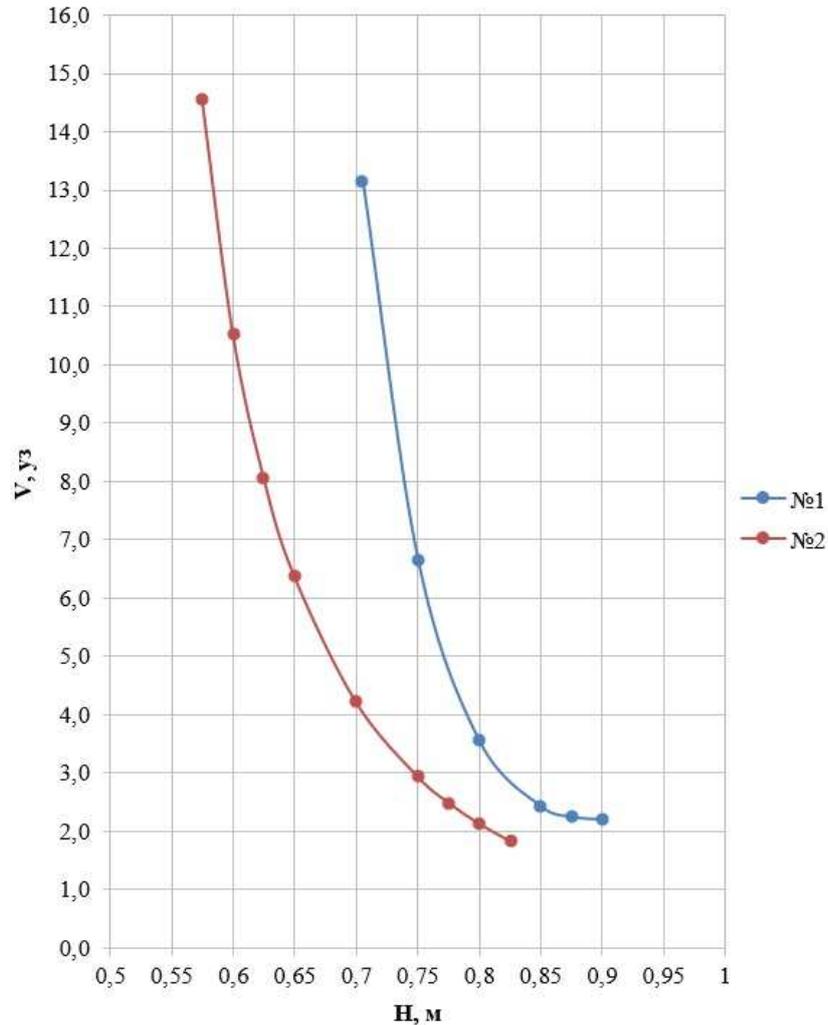


Рис. 2 Кривые допустимых скоростей:  
 1 — нефтеналивное судно с поперечной системой набора;  
 2 — танкер типа «Афрамакс» с продольной системой набора борта

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика и алгоритм построения кривых допустимых скоростей для судов, имеющих вертикальные борты в районе носового заострения, рассмотренные в статье, позволяют ликвидировать пробелы в научно-методическом обеспечении Российского морского регистра судоходства в части нормирования ледовой прочности при разработке Паспорта ледовой безопасности судна. Предлагаемые рекомендации основаны на гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом, которая длительное время является основой для проектирования конструкций ледовых усилений судов.

Результаты тестовых расчетов, представленные в статье, показывают, что предложенные методика и алгоритм позволяют получать оценки безопасных скоростей движения судна во льдах без использования сложного программного обеспечения и, в связи с этим, могут эффективно использоваться в практике Российского морского регистра судоходства при экспресс оценках допустимых условий эксплуатации судов ледовых классов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюмов В.А., Тряскин В.Н., Хейсин Д.Е. Определение ледовой прочности корпусов транспортных судов. — Труды ЛКИ // Ледопроеходимость и ледовая прочность морских судов. Л.: 1979, с. 3 — 12.
2. Курдюмов В.А. О расчете допустимых скоростей движения судов во льдах. // Труды ЛКИ / Проблемы проектирования конструкций судов. Л.: 1980, с. 25 — 32.
3. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытание судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980.
4. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Определение нагрузок при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля. // Научно-технический сборник / Регистр СССР. Л.: Транспорт. 1984. Вып. 14., с. 3 — 10.
5. Апполонов Е.М. Решение проблем обеспечения прочности судов ледового плавания и ледоколов в условиях круглогодичной эксплуатации в Арктике. — Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — СПб., 2003. — 380 с.
6. Правила классификации и постройки морских судов, 1990. т. 1. Регистр СССР. Л. «Транспорт». Ленинградское отделение, 1989.

## REFERENCES

1. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Kheisin D.E. *Opređenje ledovoy nagruzki i otsenka ledovoy prochnosti korpusov transportnykh sudov* [Determination of ice loads and estimation of strength of transport ship hulls]. LKI Works. Ice passage and ice strength of sea-going ships, LKI, 1979, pp. 3 — 12.
2. Kurdyumov V.A. *O raschete dopustimykh skorostey dvizheniya sudov vo ldakh* [On calculation of permissible speeds of ships' movement in ice] // LKI proceedings / Problems of ship structures design. L: 1980, pp. 25 — 32.
3. Ryvlin A.Ya., Kheisin D.E. *Ispytaniya sudov vo ldakh* [Testing of ships in ice]. L.: Sudostroenie, 1980, 207 p.
4. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Kheisin D.E. *Opređenje ledovoy nagruzki pri udare sudna vertikal'nym bortom o kromku ledyanogo polya* [Determination of ice loads at ship vertical board crash against ice field edge]. USSR Register Research Bulletin, No. 14, L., Transport, 1984, pp. 3 — 10.
5. Appolonov E.M. *Reshenie problem obespecheniya prochnosti sudov ledovogo plavaniya i ledokolov v usloviyakh kruglogodichnoy ekspluatatsii v Arktike* [Solution of problems of strength of ice navigation ships and icebreakers in all-year Arctic service]. — DSc thesis, St. Petersburg, 2003, 380 p.
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, 1990. Vol. 1. USSR Register, L. Transport Publ, Leningrad division, 1989.



## МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

---

УДК 620.17: 539.421

### ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ МАКО И РЕГИСТРА К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПРИ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. ЧАСТЬ 2 — СОПРОТИВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ТРЕЩИНЫ

**В.Ю. Филин**, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, e-mail: ctod@rambler.ru

**А.В. Ильин**, д-р техн. наук, доцент, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

**А.В. Ларионов**, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

**Е.Д. Назарова**, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

В статье рассмотрена применимость судостроительных сталей по критерию обеспечения торможения хрупкого разрушения на основании моделирования ее распространения в образце и конструкционном элементе. Оценена необходимость использования сталей с индексом "Arc".

**Ключевые слова:** *торможение трещины, распространяющейся по хрупкому механизму, сдаточные испытания, механика разрушения, моделирование методом конечных элементов*

### SUBSTANTIATION OF IACS AND RS REQUIREMENTS FOR THE SELECTION OF HULL MATERIALS FOR STRUCTURES OPERATED AT LOW CLIMATIC TEMPERATURES. PART 2 — RESISTANCE TO CRACK PROPAGATION

**V.Yu. Filin**, DSc, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg, e-mail: ctod@rambler.ru

**A.V. Ilyin**, DSc, associate professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg

**A.V. Larionov**, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg

**E.D. Nazarova**, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, St. Petersburg

The article considers the applicability of shipbuilding steel in respect of a crack arrest criterion based on the simulation of crack propagation in a specimen and in a structural element. The necessity to use steels with "Arc" index has also been estimated.

**Keywords:** *brittle crack arrest, acceptance tests, fracture mechanics, simulation by finite element method*

## ВВЕДЕНИЕ

В первой части статьи (опубликована в Научно-техническом сборнике Российского морского регистра судоходства (РС) №№ 72/73) рассматривались требования части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов РС [1] и унифицированного требования (УТ) МАКО S6 [2] к температурным диапазонам применимости судостроительных сталей нормальной и повышенной прочности в толщинах до 50 мм. Было показано, что расчетное обоснование этих требований, вероятнее всего, основано на условии сопротивления старту трещины по хрупкому механизму, которое контролируется испытаниями на статическую трещиностойкость. Для сдаточных испытаний считается достаточным обеспечение уровня работы удара  $KV$  [Дж] приблизительно на уровне 0,1 предела текучести  $\sigma_T$ , МПа, при температуре испытания, соответствующей температурной категории стали.

Во второй части статьи рассматривается возможность обеспечения судостроительными сталями без индекса "Arc" достаточного сопротивления распространению трещины, что в Правилах РС принято в качестве второго уровня безопасности при эксплуатации корпусов морских судов и сооружений, изготовленных из сталей с индексом "Arc" (см. 3.5 части XIII «Материалы»).

В зарубежных нормативных документах стали, способные затормозить трещину, распространяющуюся по хрупкому механизму, называются «сталями ВСА» (brittle crack arrest). Способность стали тормозить трещину может быть проконтролирована прямыми испытаниями на торможение трещины по методике ESSO, описанной в разд. 2 части XIII «Материалы» Правил РС. Однако проведение таких испытаний очень затратное, трудоемкое и требует применения уникального оборудования. Косвенное определение способности низколегированной стали тормозить трещину возможно путем определения температур вязко-хрупкого перехода  $T_{КБ}$ ,  $NDT$ , ИПГ ( $DWTT$ ) при наличии обоснованных корреляций результатов таких испытаний с минимальной температурой применимости материала  $T_D$ . Ниже анализируется способность судостроительных сталей тормозить трещину на основании результатов таких испытаний.

Однако главная задача настоящей работы — анализ с применением МКЭ (метода конечных элементов) возможности использования результатов сдаточных испытаний на ударный изгиб для оценки способности металла проката тормозить трещину, поскольку такие результаты включены в сертификаты на листовой прокат судостроительной стали.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТОРМОЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ

Для обеспечения второго уровня безопасности эксплуатации конструкции параметр трещиностойкости торможения трещины материала — критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН)  $K_{1a}$  должен быть как минимум равен нагруженности в вершине трещины, которая также определяется в терминах КИН. Численная модель, не связанная с применением МКЭ, предложена авторами в работах [3 — 5]. Она позволяет оценивать значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1a}$  материала, МПа·м<sup>0,5</sup>, обеспечивающие торможение туннелирующей трещины, распространяющейся по хрупкому механизму в элементе конструкции толщиной  $S$ , мм. Эти оценки могут быть аппроксимированы формулой

$$K_{1a} = \sqrt{(3,5 \times 10^{-5} \sigma_{ТД}^{2,42} \cdot S)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ТД}$  — эффективный предел текучести материала при ударном (динамическом) нагружении, МПа.

Инструментированные испытания на статический и ударный изгиб образцов Шарпи сталей с различными уровнями прочности, выполненные авторами, показали, что для низколегированных сталей ударное нагружение образца по сравнению с его статическим нагружением приводит к росту нагрузок, выдерживаемых образцом, в среднем на одну треть, поэтому можно принять  $\sigma_{ТД} = 1,33\sigma_T$ . Пример сравнения диаграмм нагружения приводится на рис. 1. Под  $\sigma_{ТД}$  следует понимать некое эффективное значение предела текучести, интегрально учитывающее как упрочнение вследствие повышения скорости деформирования, составляющее по данным источников 12 — 15 %, так и распространение волн упругости ("stress reflection" — «отражение напряжений»).

Подставляя в формулу (1) наибольшие прочность ( $\sigma_T = 390$  МПа) и толщину (50 мм) корпусных сталей, требования к применимости которых приведены в части II «Корпус» Правил РС, получаем  $K_{1a} = 80$  МПа·м<sup>0,5</sup>. Для такой максимальной величины  $K_{1a}$  допустимо выполнение оценок с использованием линейной механики разрушения.

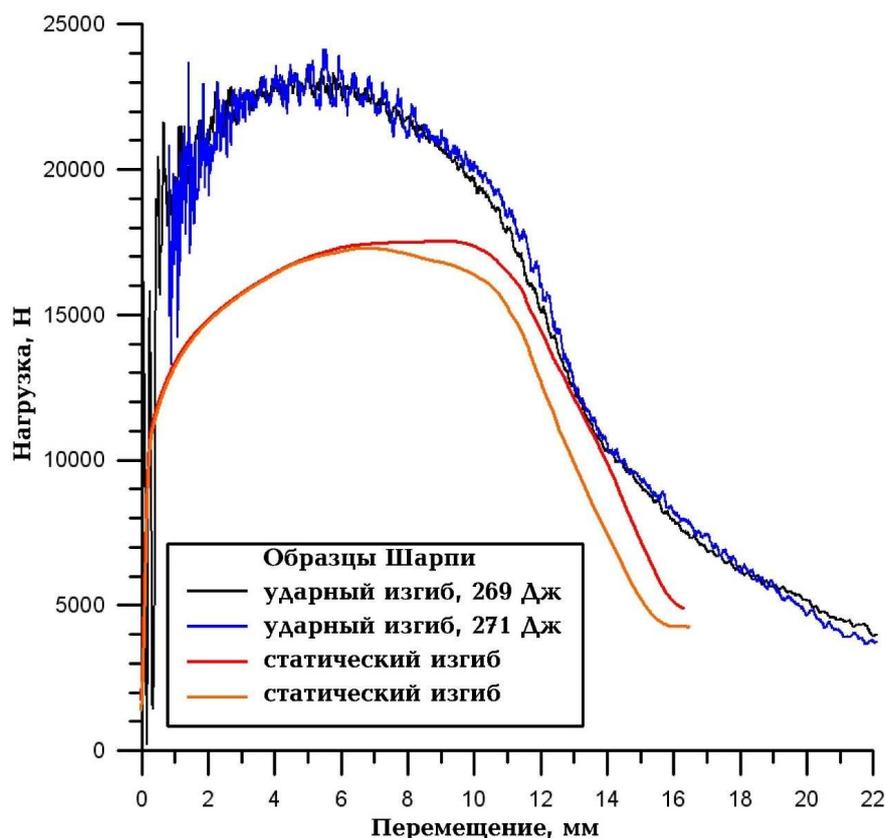


Рис. 1 Испытательные диаграммы ударного и статического нагружения образцов из стали F460

В ходе моделирования МКЭ элементов конструкций с дефектом рассчитывали величины трещиностойкости  $K_{Ia}$  для сопоставления с получаемыми по формуле (1). На основании моделирования образцов Шарпи и конструктивных элементов из того же материала сделана попытка установления корреляции величины работы удара  $KV$  с  $K_{Ia}$ , поскольку такие данные в литературе отсутствуют.

Модели образца Шарпи и элемента конструкции с дефектом строили в ANSYS Mechanical APDL в трехмерной упругопластической постановке с равномерной сеткой в плоскости надреза. Серийные задачи для двух материалов — стали нормальной прочности и стали категории прочности 40 — решали, варьируя принимаемые условия разрушения, определяющие вид излома.

Ранее авторами была разработана оригинальная процедура аппроксимации «истинной» диаграммы нагружения и ее расчетной проверки для дальнейшего использования при расчетах МКЭ [6]. В качестве исходной информации использовались экспериментальные диаграммы растяжения образцов проката марки E нормальной прочности и E40 повышенной прочности, показавших значения физического предела текучести 333 и 430 МПа, соответственно. В связи с тем, что реальные величины пределов текучести превышали минимально гарантированные значения (235 и 390 МПа), отдельно решался вопрос о переходе к последним при оценке температур применимости проката.

Для корректного определения референсных значений  $K_{Ia}$  материала решали отдельные калибровочные задачи МКЭ с равномерным сеточным разбиением, моделируя тело с трещиной в условиях плоской деформации (ПД) и маломасштабной текучести (ММТ, размер зоны пластической деформации много меньше размеров тела), используя конечные элементы тех же размеров, которые были приняты для модели образца Шарпи (0,1 мм) и конструктивного элемента (0,5 мм). Калибровочные модели нагружали до значений жесткости напряженного состояния  $\eta = \sigma_1/\sigma_i$  — отношения первых главных напряжений к интенсивности напряжений, — принятого в качестве условия хрупкого разрушения моделей образца и элемента конструкции.

## 2. УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ МОДЕЛИ ОБРАЗЦА ИЛИ КОНСТРУКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ТРЕЩИНОЙ

При решении задач использовали три конкурирующие условия разрушения.

1. Достижение критического значения жесткости напряженного состояния  $\eta = \sigma_1/\sigma_i$ , калибровка которого для равномерного разбиения сетки конечных элементов предложена в работе [5]. Условие исследуется, начиная с  $\eta = 2,0$  до максимально достижимого в модели, поскольку с ним связано соотношение волокно/кристалл в изломе и величина срыва на диаграмме нагружения при старте хрупкого разрушения.

2. Достижение критического значения интенсивности пластической деформации  $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \alpha \exp(-1,5\sigma_m/\sigma_i)$ , здесь  $\sigma_m$  — гидростатические напряжения. Данный классический критерий вязкого отрыва для тела с трещиной, предложен Хэнкомом и Маккензи [7]; параметры  $\varepsilon_0$  (условная деформация зарождения пор) и  $\alpha$  подобраны для судостроительных сталей подобраны по результатам исследований А.В. Ларионова [8]:  $\varepsilon_0$  находится в интервале 0,06 ... 0,5 и, по мнению авторов, коррелирует с работой удара на верхнем шельфе;  $\alpha$  обычно составляет от 1,3 до 2,6 и коррелирует с величиной деформационного упрочнения материала.

3. Достижение критического значения максимальной касательной деформации при вязком разрушении срезом  $\gamma_c = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ , использование такого условия предложено авторами в работе [4]. Одно из обоснований получено из работы Огата и др. [9], где предложена обобщающая модель Френкеля разрушения срезом монокристаллов и информации из монографии Полухина [10] о мультискольжении («эффекте усложнения») при деформировании поликристаллов;  $\gamma_c$  может находиться в диапазоне 0,33 ... 0,80 и обычно принимается в середине этого диапазона. Иное обоснование аналогичного уровня критических значений  $\gamma_c$  было ранее получено авторами при моделировании МКЭ испытания на загиб.

## 3. ПРИНЯТЫЕ УПРОЩЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МКЭ

1. Разрушение происходит в плоскости симметрии, что позволяет моделировать 1/4 образца Шарпи и 1/8 конструкционного элемента с центральной трещиной.

2. Используется равномерная сетка конечных элементов вблизи плоскости симметрии.

3. Модель образца Шарпи установлена на раскатные опоры, это приводит к приемлемой погрешности результатов при отсутствии необходимости решения контактной задачи.

4. Нагружение моделей выполняется статическим перемещением. Учет быстрого распространения трещины во всех расчетах производится модификацией «истинной» диаграммы деформирования с использованием величины  $\sigma_{тд} = 1,33\sigma_T$ .

5. Процессы огибания образцом оснастки с подклиниванием при полностью вязком разрушении не рассматриваются.

## 4. ТРЕХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ

Моделировали 1/4 образца Шарпи тип 11 ГОСТ 9454-78, см. рис. 2. Зона разбиения модели на мелкие элементы одинакового размера 0,1 мм составляла 4 слоя от плоскости симметрии, соответствующей плоскости разрушения образца.



Рис. 2 Модель 1/4 образца Шарпи

Также моделировали 1/8 элемента конструкции со сквозным дефектом — центральной трещиной — различного размера. Для финальных расчетов начальную длину трещины (полудлину дефекта) принимали равной  $a=0,56S$ , что по величине КИН соответствует краевой трещине глубиной  $a=0,25S$ . Данная величина получена из общей формулы для КИН

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}, \quad (2)$$

где  $Y$  — функция описывает вид и размеры концентратора, и способ нагружения. Используя справочные значения  $Y$ -функций по [11], можно найти эквивалентные по КИН размеры дефектов различной формы.

Размеры конструкционного элемента были выбраны достаточно большими, чтобы обеспечить равномерное приложение нагрузки (брутто), см. рис. 3. Толщину модели, равную  $S/2$ , принимали равной 5, 15 и 25 мм. Зона разбиения модели на мелкие элементы одинакового размера 0,5 мм составляла 4 слоя от плоскости симметрии. Нагружение осуществляли, задавая перемещение в направлении, перпендикулярном плоскости дефекта.

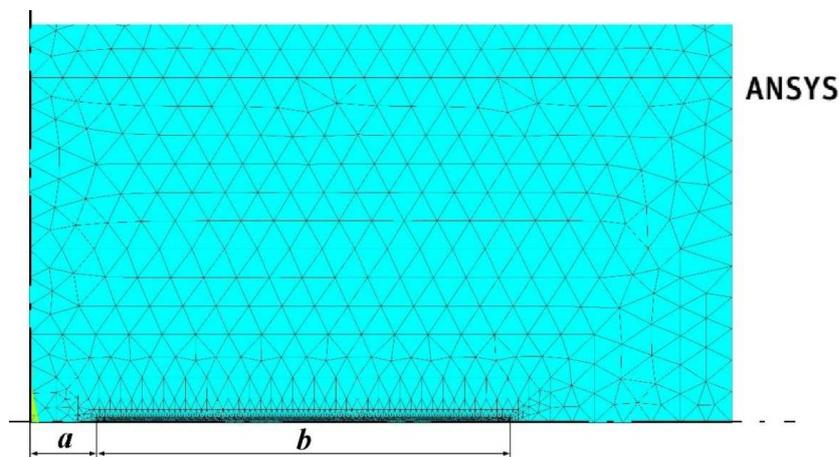


Рис. 3 Модель конструкционного элемента:  
 $a$  — начальная полудлина сквозной трещины;  $b$  — размер зоны равномерной сетки конечных элементов, в пределах которой моделировали рост трещины

## 5. КАЛИБРОВОЧНАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛА С ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОЙ В ПОСТАНОВКЕ ПД

Моделировали 1/4 тела со сквозным дефектом — центральной трещиной — достаточно большого размера, чтобы обеспечить соблюдение условия маломасштабной текучести (ММТ), то есть все размеры тела приняты много больше размера зоны пластических деформаций. Для такого тела известны аналитические зависимости КИН от приложенных напряжений. Область модели вблизи трещины также разбивали на мелкие элементы одинакового размера, соответствующего модели образца Шарпи (0,1 мм) или конструкционного элемента — пластины (0,5 мм). При нагружении такой модели получены калибровочные кривые для сеток из элементов требуемых размеров, соответствующих трехмерным моделям, пример показан на рис. 4.

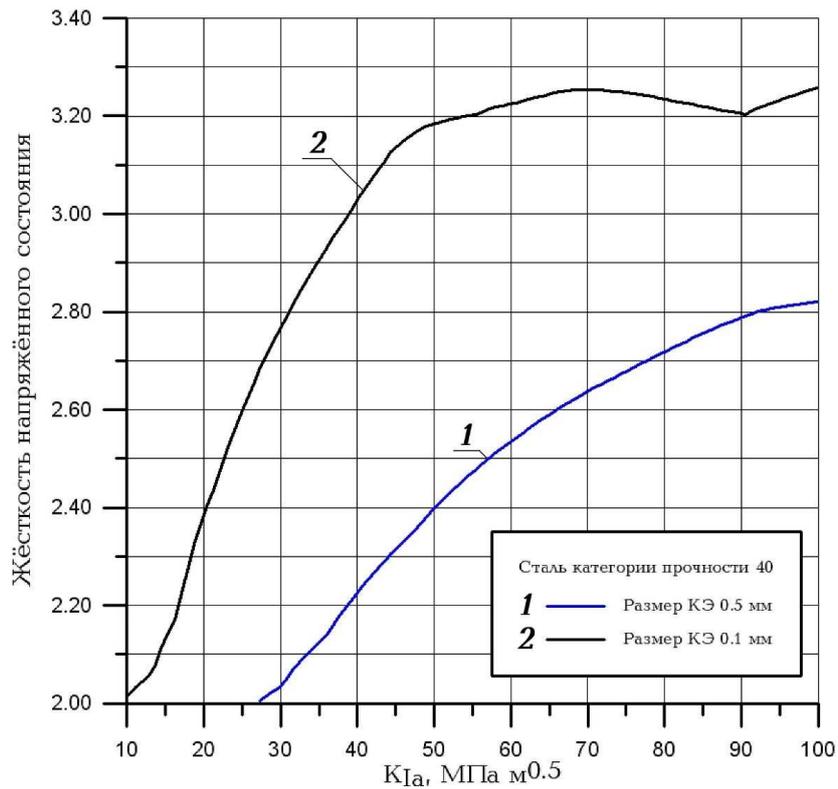


Рис. 4 Калибровочные кривые " $\eta - K_{Ia}$ ", пример для стали категории E40

## 6. РЕШЕНИЕ СЕРИИ ЗАДАЧ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ШАРПИ

Модель образца нагружали изгибом, перемещая «боек» в плоскости симметрии при упругопластической постановке задачи в условиях геометрической нелинейности. Фиксировали достижение любого из трех принятых в разд. 2 условий разрушения в любом из элементов, вышедшем на поверхность текучести по Мизесу, поскольку разрушение должно сопровождаться пластической деформацией. При выполнении хотя бы одного условия разрушения снимали условие совместности перемещений для элементов, выходящих на плоскость симметрии образца. Таким образом, формировался фронт туннелирующей трещины, для случая ее распространения по хрупкому механизму он показан на рис. 5, пластическая деформация металла при хрупком разрушении составляет около 0,03.

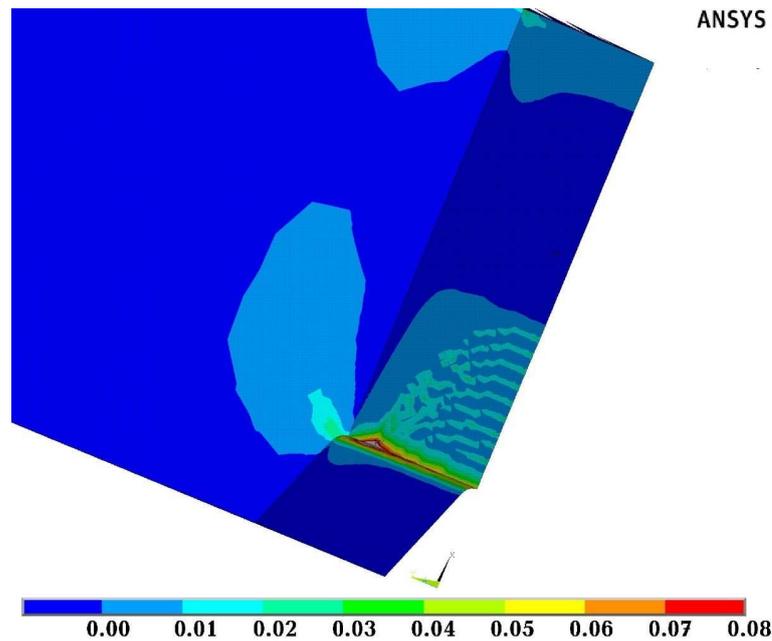


Рис. 5 Интенсивность пластических деформаций в модели образца Шарпи (виден фронт туннелирующей трещины)

Работу удара  $KV$  рассчитывалась как площадь под диаграммой «нагрузка — перемещение бойка» и соотносили со значениями КИН, полученными из калибровочной задачи при тех же значениях параметра жесткости напряженного состояния. Рассмотрены два варианта аппроксимации полученных значений (см. рис. 6) — линейная и аппроксимация функцией арктангенса (3), во втором случае обеспечивается большая достоверность на уровне  $R^2 = 0,98$ .

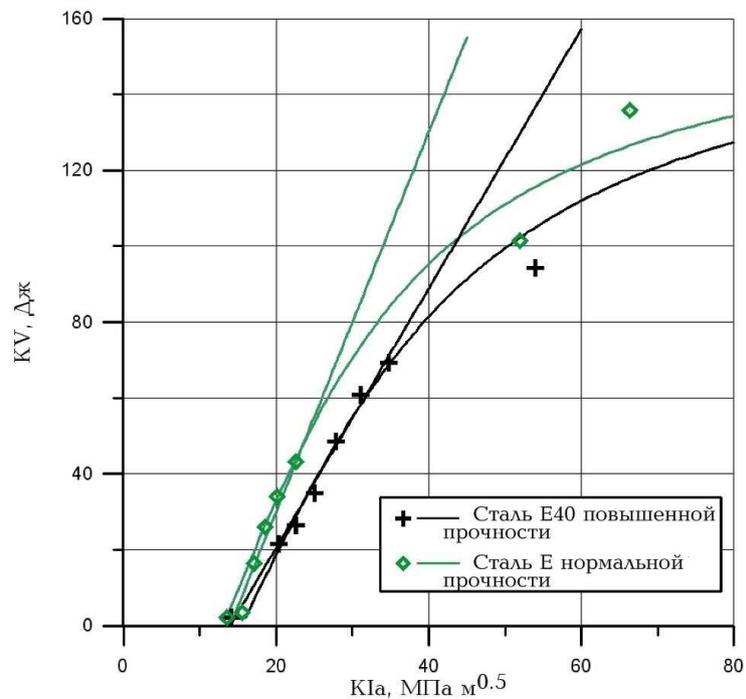


Рис. 6 Расчетные корреляции КИН с работой удара на образцах Шарпи

$$KV = 107 \arctan \left( \frac{K_{Ia}}{3,6 \sigma_{T \min}^{0,33}} - 0,6 \right), \quad (3)$$

где  $\sigma_{T \min}$  — минимальный гарантированный предел текучести стали.

## 7. РЕШЕНИЕ СЕРИИ ЗАДАЧ НАГРУЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Расчеты проводили для толщины металла  $S=10, 30$  и  $50$  мм, рассматривали два материала, сталь нормальной прочности и сталь категории прочности 40. Начальный сквозной дефект полудлиной  $0,56S$  по КИН соответствовал краевой трещине глубиной  $0,25S$ . Результаты расчетов представлены на рис. 7 в сопоставлении с аналитическими кривыми для  $\sigma_{Tд}$ , соответствующих реальным значениям  $\sigma_T$ . За остановку хрупкого разрушения принимали прекращение выполнения первого условия разрушения, связанного с достижением заданной величины жесткости напряженного состояния  $\eta$ , при сохранении приложенного перемещения, вызывающего напряжения brutto не менее  $\sigma_T$ .

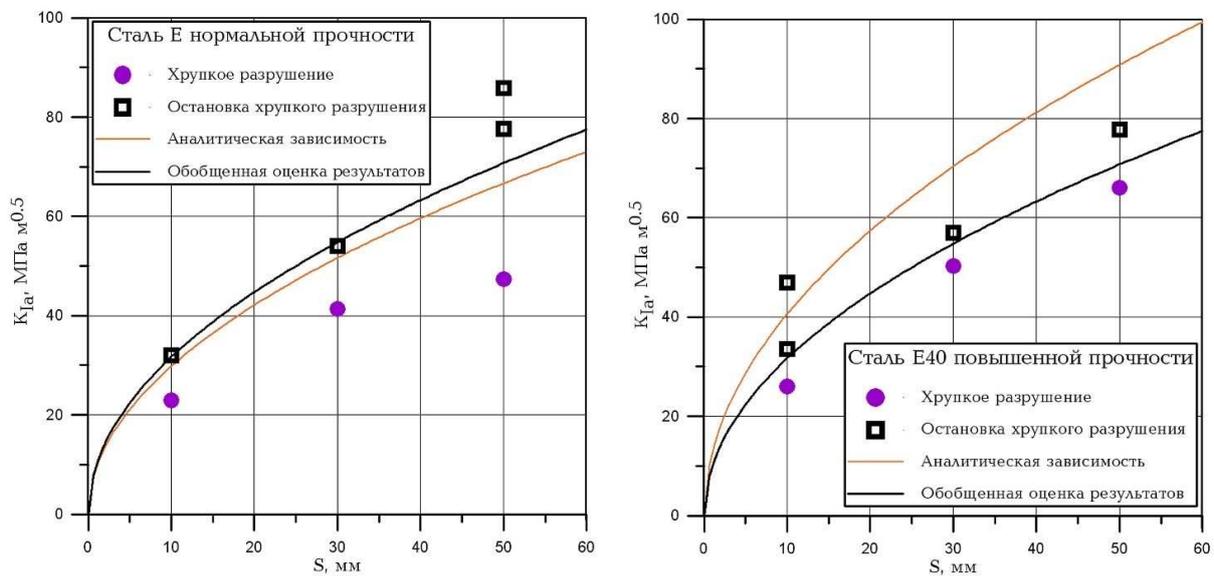


Рис. 7 Расчетные критические значения КИН материала, обеспечивающие остановку трещины в элементах конструкции с дефектом. Аналитические зависимости по формуле (1) представлены для  $\sigma_{Tд}$ , соответствующих реальным значениям предела текучести  $\sigma_T$

При моделировании получено, что для исследованных сталей нормальной и повышенной прочности допустимо говорить о существовании обобщенной оценки результатов моделирования, не зависящей от предела текучести, которая приведена на рис. 7. Возможной причиной является гораздо меньшее различие реальных пределов текучести таких сталей по сравнению с различием их нормируемых минимальных значений. Кроме того, коэффициент деформационного упрочнения стали нормальной прочности составляет около 0,20, что выше, чем у стали повышенной прочности (примерно 0,14), поэтому их «истинные» диаграммы деформирования оказываются еще ближе друг к другу.

На основании данных рис. 7, требуемые минимальные значения  $K_{Ia \min}$  материала,  $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ , обеспечивающие торможение трещины в конструкционном элементе с дефектом, по величине КИН эквивалентным краевой трещине глубиной  $0,25S$ , мм, для сталей нормальной и повышенной прочности составляют

$$K_{Ia \min} = 10\sqrt{S}, \quad (4)$$

и эта обобщенная зависимость позволяет перейти к нормированию с использованием минимально гарантированных значений предела текучести.

## 8. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из формул (3) и (4) можно выразить величину работы удара при температуре  $T_D$ , необходимую для торможения трещины в элементах конструкции, если задать отношение  $K_{Ia\ min}/K_{Ia\ ср}$ . Из многолетнего опыта испытаний на трещиностойкость судостроительных сталей, выполненных авторами, следует  $J_{\min} \approx 0,2J_{ср}$ , тогда

$$K_{Ia\ ср} \approx \sqrt{5} \cdot K_{Ia\ min};$$

$$KV_{ср} = 107 \arctan \left( \frac{6,2\sqrt{S}}{\sigma_{T\ min}^{0,33}} - 0,6 \right). \quad (5)$$

Предположим, что температурная зависимость средних значений  $K_{Ia}$  такая же, как была принята для статической трещиностойкости в первой части статьи,

$$K_{Ia|T_D} = K_{Ia|T_{II}} \cdot \exp(0,02(T_D - T_{II})), \quad (6)$$

где  $T_D$  — минимальная рабочая температура материала;  
 $T_{II}$  — температура испытания, °С.

Тогда из формулы Барсома — Рольфе, приведенной в первой части статьи, устанавливающей пропорцию КИН и средней величины удара в виде  $K_I^2 \sim KV_{ср}^{3/2}$ , и из формулы (6) следует, что  $KV_{ср} \sim 0,027\Delta T$ . Величина температурного запаса как разность минимальной рабочей температуры материала и температуры его испытания на ударный изгиб в таком случае должна составлять не менее

$$\Delta T = T_D - T_{II} = 37,5 \ln(KV_{ср|T_D} / KV_{ср|T_{II}}), \quad (7)$$

где  $KV_{ср|T_{II}} = 27$  Дж для стали нормальной прочности и 39 Дж для стали категории 40 согласно 3.2.2 части XIII «Материалы» Правил РС [1] и ГОСТ Р 52927-2015 [12]. Необходимо упомянуть, что для таких сталей сдочными являются результаты, получаемые на продольных образцах, см. п. 8.15 ГОСТ Р 52927-2105.

Итого, для стали нормальной прочности

$$\Delta T = 37,5 \ln(4,0 \arctan(\sqrt{S} - 0,6)); \quad (8)$$

для стали с минимальным пределом текучести 390 МПа

$$\Delta T = 37,5 \ln(2,7 \arctan(0,87\sqrt{S} - 0,6)). \quad (9)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования					
Минимальный предел текучести, МПа	Толщина, мм, до				
	10	20	30	40	50
Работа удара $KV_{ср}$ при $T_D$ , необходимая для торможения трещины, Дж, формула (5)					
235	129	142	147	150	152
390	121	136	143	146	150
Температурные запасы, °С, формулы (8) и (9)					
235	+59	+62	+64	+65	+65
390	+42	+46	+48	+49	+50

Таким образом, уровень работы удара, требуемый от основного металла стального проката согласно упомянутым нормативным документам, не обеспечивает торможение трещин, распространяющихся по хрупкому механизму в конструкциях при наличии дефектов критического размера.

## 9. УРОВЕНЬ РАБОТЫ УДАРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Расчетный средний уровень работы удара металла проката корпусных сталей, необходимый для остановки хрупкого разрушения, оказывается, тем не менее, фактически достижимым при серийном производстве металлопроката на ведущих металлургических заводах РФ. В табл. 2 приведена статистика сдаточных испытаний, выполненных в заводских лабораториях «Изготовителя 1» и «Изготовителя 2». Данные «Изготовителя 2» также представлены на рис. 8.

У авторов имеются аналогичные данные по статистике значений  $KV$  металла проката, испытанного в лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» по программам Регистра для получения изготовителями свидетельств о признании. Для горячекатаного проката работа удара при температурах испытания, соответствующих заявленным маркам стали, составляла не менее 141 Дж, для термообработанного проката — не менее 114 Дж, зачастую превышая 300 Дж.

Таблица 2

Данные изготовителей о сдаточных значениях работы удара

Изготовитель	Вид термообработки	Марки стали и толщины	Температура испытания, °С	$KV_{\min}$ , Дж	$KV_{\max}$ , Дж	$KV_{\text{ср.}}$ , Дж
1	С термообработкой, все виды	Е36 до 70 мм, Е40 до 50 мм	−40	57	345	258
2	С термообработкой, все виды	Е36, Е40 до 35 мм	−40	87	366	264
1	Термомеханическая обработка	F36 и F40, от 20 до 40 мм	−60	148	320	269
1	Термомеханическая обработка	F36 и F40, от 50 до 60 мм	−60	65	305	226

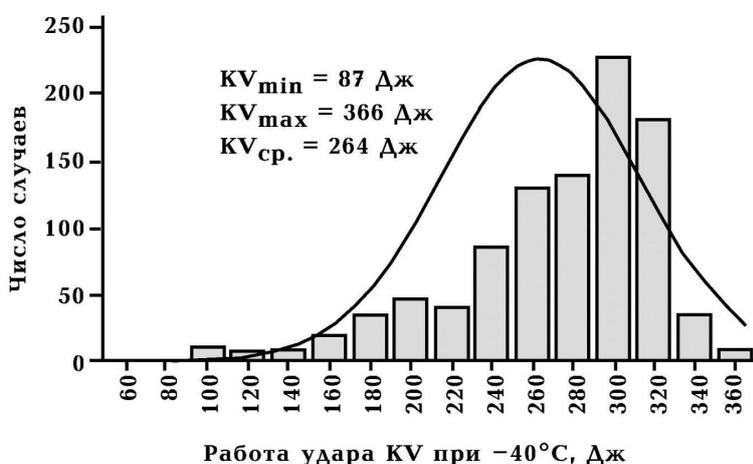


Рис. 8 Статистическое распределение работы удара листового проката стали E36 — E40, «изготовитель 2»

Средние экспериментальные значения работы удара современных судостроительных сталей, представленные в табл. 2, превышают необходимые величины по табл. 1, что обеспечивает практическое отсутствие разрушений корпусов морской техники по хрупкому механизму. Однако следует понимать, что этот благоприятный эффект обеспечивается не процедурой выбора материала в соответствии с частью II «Корпус» Правил РС, а более высокой вязкостью металла проката по отношению к требованиям.

Безусловной гарантией выполнения условий торможения трещины металлом конструкционных элементов (связей) может быть только успешное проведение специальных механических испытаний по методикам  $NDT$ ,  $T_{\text{КБ}}$  и т. п. в соответствии с 3.5 части XIII «Материалы».

## 10. О НЕОБХОДИМОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕЙ С ИНДЕКСОМ "ARC" ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В отличие от требований УТ МАКО S6, а также требований части II «Корпус» Правил классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ (ПБУ/МСП) [13] для специальных конструкционных элементов ПБУ/МСП, номограммы части II «Корпус» Правил РС [1] не предусматривают ограничений на применение стали Е нормальной прочности и сталей категории F повышенной прочности до температуры  $-60$  °С в толщинах до 50 мм. Минимальная рабочая температура для «обычных» сталей в наиболее ответственных связях группы III может быть оценена так же, как сталей с индексом "Arc" — согласно 3.5 части XIII «Материалы» Правил РС, на основании результатов испытаний по определению температур вязко-хрупкого перехода.

В распоряжении авторов имеются накопленные за 23 года результаты определения температур вязко-хрупкого перехода  $NDT$  и  $T_{KB}$  металла проката, испытанного в рамках упомянутых выше программ Регистра. Оценки минимальной рабочей температуры материала согласно 3.5 части XIII «Материалы» по критерию торможения трещины в виде  $\max(T_{D(NDT)}, T_{D(T_{KB})})$  приведены в табл. 3 и на рис. 9. Наименования марок материалов в табл. 3 даны на момент проведения испытаний.

Таблица 3

Оценки применимости основного металла проката для связей категории III по результатам первичной аттестации

Марка	Толщина, мм	Термообработка	$KV_{cp}, L/T^*$ , Дж, при $T_{И}$ , соответствующей температурной категории	$NDT, ^\circ C$	$T_{KB}, ^\circ C$	$\max(T_{D(NDT)}, T_{D(T_{KB})}), ^\circ C$ , согласно 3.5 части XIII «Материалы»
EZ35	25	TMO	—	-40	-47	-40
EZ35	40	TMO	—/288	-50	-25	-30
EZ35	40	TMO	—/263	-45	-12	-25
EZ35	50	TMO	—/256	-40	-35	-15
EZ35	50	TMO	—/248	-45	0	-20
F32CB	50	TMO	—/309	-25	-5	-5
F36SW	20	3+O	—	-65	-61	-61
F36SW	45	3+O	—/294	-65	-12	-37
F36SW	45	3+O	—/294	-60	-10	-35
F36SW	50	3+O	—/281	-65	-18	-40
F36SW	50	3+O	—/277	-55	0	-25
F36Z	60	TMO	—	-60	—	-30
F36Z	60	TMO	—	-50	—	-20
F36W	60	TMO	—/212	-60	-15	-30
F36W	60	TMO	—/228	-60	-20	-30
F40SW	30	TMO	—	-90	-55	-55
F40SW	30	TMO	—	-65	-45	-45
F40SW	40	TMO	254/263	-85	-30	-45
F40SW	40	TMO	—/225	-65	-36	-45
F40SW	50	TMO	226/173	-70	+10	-15
F40SW	50	TMO	—/232	-65	-20	-40
F40SW	30	3+O	—/260	-70	-35	-35
F40SW	40	3+O	—/286	-75	-31	-46
F40SW	50	3+O	—/233	-70	-19	-44
F40SW	50	3+O	—/271	-70	+4	-21
F40W	50	TMO	—/273	-75	0	-25
F40W	60	TMO	—/251	-75	-20	-45
F40W	60	TMO	—/203	-35	+10	-5
F40W	60	TMO	—/212	-40	-10	-10
F40W	20	3+O	—/309	-75	-55	-55
F40W	30	3+O	—/305	-65	-25	-25
F40W	40	3+O	—/271	-55	-15	-30
F40W	45	3+O	—/303	-50	-15	-25
F40W	50	3+O	—/278	-45	-26	-20
F40Z	50	3+O	—/257	-60	—	-35

\*L/T — в продольном/поперечном направлении.

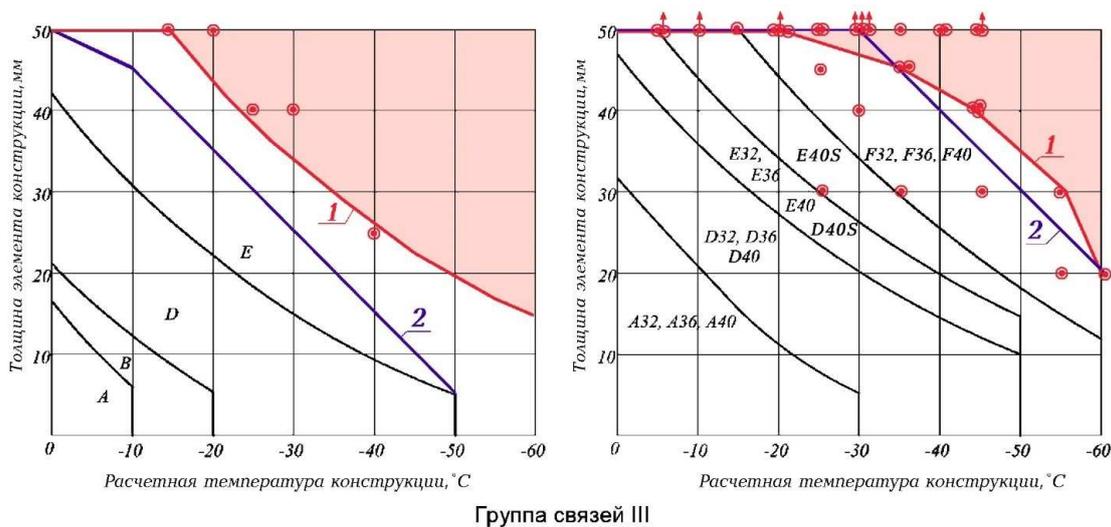


Рис. 9 Верхние границы применимости «обычных» марок судостроительных сталей для связей группы III:  
 1 — предлагаемые границы; 2 — требования Правил ПБУ/МСП для специальных конструктивных элементов.  
 В закрашенных областях необходимо применение сталей с индексом "Arc". Точками показаны данные табл. 6

Анализ полученных результатов показывает, что оценки минимальных рабочих температур стали марки E нормальной прочности и сталей F32 — F40 повышенной прочности даже для металла с уровнем работы удара более 300 Дж должны быть более осторожными по сравнению с номограммами части II «Корпус» вне зависимости от способа термообработки. На рис. 9 указаны области, в которых для наиболее ответственных связей группы III необходимо применение сталей с индексом "Arc". Ограничивающие их кривые построены таким образом, что ниже них находятся 20 % значений, представленных в табл. 6, при этом все лежащие ниже значения относятся к оценке применимости материала по ТКБ ( $T_{D(T_{кв})}$ ). В диссертации [3] были предложены менее консервативные оценки  $T_{D(T_{кв})}$ , которые, по мнению авторов, являются более обоснованными, однако они не включены в актуальную версию Правил [1].

## ВЫВОДЫ

Практическое отсутствие разрушений корпусов морской техники по хрупкому механизму объясняется высокими сдаточными значениями работы удара металла проката судостроительных сталей современного производства. Средние значения  $KV$  превышают уровень 120 ... 150 Дж, согласно результатам выполненного моделирования необходимый для останова хрупкого разрушения в конструкциях при наличии дефектов критического размера. Таким образом, в большинстве случаев основной металл проката судостроительных сталей обеспечивает не только сопротивление старту трещины по хрупкому механизму, но и торможение ее распространения. Однако сдаточные значения  $KV$  имеют большой разброс, поэтому безусловной гарантией выполнения условий торможения трещины является только успешное проведение специальных механических испытаний с определением температур вязко-хрупкого перехода.

Для наиболее ответственных связей группы III, изготавливаемых из «обычных» марок судостроительных сталей, проведена оценка минимальных рабочих температур применимости по результатам испытаний по методикам  $NDT$  и  $TKB$ , выполненных в лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей». На основании этих результатов предложены минимально необходимые границы, выше которых должны применяться стали с индексом "Arc". Выполненная оценка оказывается менее консервативной, чем принятая для металла офшорных конструкций в части II «Корпус» Правил ПБУ/МСП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Часть II. Корпус, 336 с. Часть XIII. Материалы, 270 с., СПб, 2023.
2. IACS UR S6 Use of Steel Grades for Various Hull Members — Ships of 90 m in Length and Above. Rev.9 Corr. 2 Nov 2021, 10 p.
3. Филин В.Ю. Разработка критериев трещиностойкости и хладостойкости материалов сварных конструкций морского шельфа на основе механики разрушения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб, 2019, 425 с.
4. Филин В.Ю., Мизецкий А.В., Назарова Е.Д. Определение критических температур хрупкости стали на базе численного моделирования испытаний образцов Шарпи/Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 25 марта 2022 года.) /НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ. — М.: НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, 2022. — 540 с., с. 320 — 332.
5. Ильин А.В., Артемьев Д.М., Филин В.Ю. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Том 84. № 1(1). — с. 56 — 65.
6. Назарова Е.Д., Филин В.Ю. Моделирование остановки трещины. Сборник тезисов XI Всероссийского молодежного научного форума OPEN SCIENCE 2022, Гатчина, 18 — 22 ноября 2022, 146 с.
7. Пегливанова М.М., Назарова Е.Д., Филин В.Ю. Сравнение оценок удлинения образцов на растяжение разной кратности// XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 13 — 17 февраля 2023 года. Тезисы докладов. — Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2023, — 392 с.
8. Hancock J.W., Mackenzie A.C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. J. Mech. Phys. Solids, 1976, Vol. 24, pp. 147 — 169.
9. Ларионов А.В., Филин В.Ю., Ильин А.В. Оценка связи сопротивления металла вязкому разрушению с поглощенной энергией при испытаниях падающим грузом //Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 25 марта 2022 года.) /НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ. — М.: НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, 2022. — 540 с., с. 506 — 520.
10. Ogata S., Li J., Hirotsuki N., Shibutani Y., Yip S. Phys. Rev. B 70, 104 104 (2004).
11. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. — 584 с.
12. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2х т. пер. с англ./ под ред. Ю. Мураками. — М: Мир, 1990.
13. ГОСТ Р 52927-2105 Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. М., Стандартинформ. 2017. — 64 с.
14. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Часть II. Корпус. Российский морской регистр судоходства. СПб, 2023. — 149 с.
15. Филин В.Ю. Разработка критериев трещиностойкости и хладостойкости материалов сварных конструкций морского шельфа на основе механики разрушения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб, 2019 — 425 с.

## REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Russian Maritime Register of Shipping. Part II. Hull. — 319 p. Part XIII. Materials. — 270 p. St. Petersburg, 2023. (In Russian)
2. IACS UR S6 Use of Steel Grades for Various Hull Members — Ships of 90 m in Length and Above. Rev.9 Corr.2 Nov 2021 — 10 p.
3. Filin V.Yu. *Razrabotka kriteriev treschinostoičnosti i khladostoičnosti materialov svarnykh konstruksy mosrkogo shelfa na osnove mekhaniki razrusheniya. Diss. dokt. tech. nauk* [Fracture mechanics based development of fracture toughness and cold resistance criteria for the materials of offshore structures. Dr. tech. sci thesis]. St. Petersburg, 2019. — 425 p.
4. Filin V.Yu., Mizetsky A.V., Nazarova E.D. *Opredeleeniye kriticheskikh temperatur khrupkosti stali na baze chislenogo modelirovaniya ispytany obratstov Charpy* [Evaluation of the critical temperatures of brittleness for steel based on numerical simulation of the test with Charpy specimens] Physical-mechanical tests, strength, reliability of modern structural and functional materials: Proceedings of XIV All-Russian conference on testing and investigation of material properties] Moscow, 25 March 2022. NRC Kurchatov institute — VIAM Publ., 2022. — 540 p., pp. 320 — 332.
5. Ilyin A.V., Artemiev D.M., Filin V.Yu. *Modelirovaniye MKE rasprostraneniya i tormozheniya khrupkogo razrusheniya v plastinakh s ishkodnoy treschinoy* [Simulation of the propagation and arrest of the brittle fracture in steel plates with initial crack using finite element method] Plant laboratory. Diagnostics of materials. 2018. Vol 84. No.1(1). — pp. 56 — 65.
6. Nazarova E.D., Filin V.Yu. *Modelirovaniye ostanovki treschiny* [Crack arrest simulation]: Proceedings of IX All-Russian youth scientific forum OPENSCIENCE 2022. Gatchina, 16 — 18 November 2022. — 146 p.
7. Peglivanova M.M., Nazarova E.D., Filin V.Yu. *Sravneniye otsenok udlineniya obratstov na rastyazhenie raznoy kratnosti* [Comparison of elongation estimates for tensile specimens of various proportions] XXIII Winter school on the mechanics of solids. Proceedings. Perm, 13 — 17 Feb 2023. — PFIC UrO RAN Publ. — 392 p.
8. Hancock J.W., Mackenzie A.C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. J. Mech. Phys. Solids, 1976, Vol. 24, pp. 147 — 169.
9. Larionov A.V., Filin V.Yu., Ilyin A.V. *Otsenka svyazi soprotivleniya materiala vyazkomu razrusheniyu s pogloschennoy energiyey pri ispytaniyakh padayuschim gruzom* [On the correlation of shear fracture resistance of metal with the absorbed energy at drop weight tear test] Physical-mechanical tests, strength, reliability of modern structural and functional materials: Proceedings of XIV All-Russian conference on testing and investigation of material properties] Moscow, 25 March 2022. NRC Kurchatov institute — VIAM Publ., 2022. — 540 p., pp. 506 — 520.

10. Ogata S., Li J., Hirotsaki N., Shibutani Y., Yip S. Phys. Rev. B 70, 104 104 (2004).
11. Polukhun P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. *Fizicheskie osnovy plasticheskoy deformatsii* [Physical background of plastic deformation]. Moscow. Metallurgy Publ., 1982. — 584 p.
12. Stress intensity factors handbook (in 2 vol.). Murakami Y., ed. The Society of Materials Science, Japan. Pergamon Press (Russ. ed.: *Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti naprjazhenii pod red. Y.Murakami*. Moscow, Mir Publ., 1990).
13. GOST R 52927-2105 Rolled of normal, increased — and high-strength steel for shipbuilding. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2017. — 64 p.
14. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2023. Part II. Hull. — 139 p. (In Russian)
15. Filin V.Yu. *Razrabotka kriteriev treschinostoikosti i hladostoikosti materialov svarykh konstruksii mosrkogo shelfa na osnove mehaniki razrusheniya* [Fracture mechanics based development of fracture toughness and cold resistance criteria for the materials of offshore structures. Dr. tech. sci thesis]. St. Petersburg, 2019. — 425 p.



## МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ГЕЛЕВАЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНАЯ ДОБАВКА FE-DO» ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**И.Ф. Пустовой**, ООО «РеалИнПроект», Санкт-Петербург, e-mail: RealInProekt@yandex.ru

**Д.С. Сорокин**, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»,  
ООО «РеалИнПроект», Санкт-Петербург, e-mail: sorokin.dmytry@gmail.com

В статье описывается проведение десятилетних испытаний инновационной, полностью российской разработки — ресурсо-энергосберегающей технологии — гелевой мультимодальной добавки (ГМД) FE-DO на ледоколе дизельного типа «Адмирал Макаров» при участии Российского морского регистра судоходства (РС). Приводится краткая история создания и примеры научных исследований технологии, главные отличия от существующих присадок и добавок, области ее применения на флоте, в судостроительной и судоремонтной сферах, а также решаемые актуальные проблемы. Указываются технические показатели по итогу обобщенного анализа документов о проведении испытаний, в которых показано восстановление состояния цилиндропоршневой группы, очистка дизеля от нагара и иных отложений, сокращение расхода топлива и масла на угар, увеличение ресурса масла. На основании этих данных делается вывод об эффективности и целесообразности применения данной разработки на флоте.

**Ключевые слова:** флот, судостроение, судоремонт, десятилетние испытания, безремонтное восстановление, продление ресурса, экономия топлива и масла, снижение вредных выбросов, уникальность, отличие от присадок

### APPLICATION OF "GEL MULTIMODAL ADDITIVE FE-DO TECHNOLOGY" FOR OPERATION PARAMETERS RESTORATION OF SHIPBOARD MACHINERY AND EQUIPMENT

**I.F. Pustovoy**, RealInProject LLC, St. Petersburg, e-mail: RealInProekt@yandex.ru

**D.S. Sorokin**, ITMO Research Institute, RealInProject LLC, St. Petersburg,  
e-mail: sorokin.dmytry@gmail.com

The article describes ten-year tests of the innovative, fully Russian development — a resource and energy saving technology — gel multimodal additive (GMA) FE-DO on the diesel icebreaker "Admiral Makarov" with the participation of the Russian Maritime Register of Shipping. Brief history of creation and examples of scientific research of the technology, main differences from existing additives, areas of its application in the fleet, in shipbuilding and ship repair spheres, as well as actual problems being solved have been given. Technical indicators on the result of generalized analysis of test documents have been specified showing the restoration of the condition of cylinder-piston group, cleaning of diesel engine from soot and other deposits, reduction of fuel and oil consumption for carbon monoxide, increase of oil life. On the basis of these data the conclusion about efficiency and expediency of application of this development in the fleet has been made.

**Keywords:** fleet, shipbuilding, ship repair, ten-year tests, repair-free recovery, life extension, fuel and oil saving, emission reduction, uniqueness, difference from additives

## ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация техники и оборудования неразрывно связана с процессом постоянного решения проблем его износа, продления ресурса, а также снижения различных затрат на обслуживание, запчасти и горюче-смазочные материалы. С ужесточением контроля за выбросами в атмосферу (налога на углеродный след), требований по эксплуатации судов на топливе с низким содержанием серы, а теперь еще и ограничением доступа к качественным и недорогим запчастям вопрос надежности и эффективности работы транспорта, оборудования и технологических линий приобрел особую остроту.

Вместе с тем, существуют уникальные российские инновационные технологии, помогающие успешно решать подобные проблемы и одним из примеров может служить применение геомодификатора поверхности трения — гелевой мультимодальной добавки (ГМД), имеющей аббревиатуру ММПТ (минеральный модификатор поверхности трения).

Данная технология интересна с точки зрения практичности и экономической целесообразности, поскольку является вариантом так называемого «безразборного ремонта», т.к. применяется в процессе штатной эксплуатации узлов и механизмов, не требует специально оборудованных мест и внесения изменений в технологические режимы работы. Для оценки положительных свойств новых технологий важным этапом является проведение длительных испытаний, цель которых не только подтвердить эффективность, но и показать отсутствие негативных последствий от применения при длительной эксплуатации технологического оборудования или механизмов.

Для выполнения поставленной задачи были проведены масштабные испытания под контролем и при участии экспертов Российского морского регистра судоходства (РС). Объектом испытаний выступил ледокол дизельного типа «Адмирал Макаров», срок испытаний — 10 лет. Результаты и выводы будут представлены в конце статьи.

## 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Сама идея применения минералов в качестве геомодификаторов трения берет свое начало в трудах выдающегося естествоиспытателя, основателя отечественной минералогии академика В.И. Вернадского. Его труды по изучению минералов группы серпентинитов, их свойства «входить» в поверхности и делать прецизионными грубо изготовленные или изношенные кинематические пары легли в основу методики ремонтно-восстановительной технологии ГМД. Такие материалы В.И. Вернадский назвал активными или «живыми».

Свойства самовосстановления материалов, возможность снижения механических потерь с помощью активированных нанодисперсных порошков на основе указанных минералов были глубоко изучены несколько позже группой ученых во главе с Нобелевским лауреатом 1977 года по химии — академиком И.Р. Пригожиным. Попытки практического применения ГМД технологии начались параллельно с продолжением исследований ленинградских ученых: академика В.И. Ревнивцева, группы специалистов завода «Механобр» и др. (в 1987 году работы удостоились золотой медали ВДНХ).

В конце 1980-х — начале 1990-х годов учеником В.И. Ревнивцева (сегодняшним патентодержателем технологии ГМД), технология была успешно доведена до конечного использования и нашла свое широкое применение в различных отраслях Народного хозяйства.

С развитием технологии менялись и ее названия: РВС, АРТ, ММС, BNS (в частности, на «Адмирале Макарове» применялась разработанная тогда модификация «САИС»). С 2011 года технология ММПТ имеет лицензированное название "FE-DO", защищена Патентом РФ №2567543.

## 2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И РЕШАЕМЫЕ ПРОБЛЕМЫ

### 2.1 Описание технологии

Технология FE-DO применяется для восстановления металлических пар трения различного оборудования и техники.

Основной активный компонент ММПТ состоит из дисперсной системы минералов группы серпентинитов, который в готовом виде вносится в жидкие масла (во взвешенном состоянии в виде суспензии), пластичную смазку или полимерную композицию (для открытых металлических пар трения, таких как колесо — рельс и проч.).

Принцип работы заключается в модификации структуры поверхности металлических пар трения, что позволяет частично или полностью восстановить имеющийся износ, а также придать ему улучшенные свойства, которые сохраняются длительное время.

Попадая на поверхности трения в точки контакта работающих деталей механизмов, частицы материала под воздействием повышенных давления и температуры (условий граничного трения) разрушаются, изменяются сами и изменяют структуру трущихся металлических поверхностей (формируя аморфную структуру) с толщиной слоя от нескольких десятков до нескольких сотен микрон (в зависимости от износа, оптимизируя зазор за счет процесса саморегуляции, не более номинальных размеров, так как в этом случае пропадает условие роста поверхности — граничное трение).

Процесс компенсации износа основан на фундаментальных законах из областей химии и физики. В момент разрушения материала на поверхности металла создается избыточный потенциал, благодаря которому из подложки металла поднимаются на поверхность свободно передвигающиеся в ней электроны, а затем и ионы железа, что позволяет компенсировать имеющийся износ и оптимизировать зазоры пар трения, образуя ультрагладкий — зеркальный — защитный слой, связанный с металлом одним кристаллическим каркасом (называемый также металлокерамическим защитным слоем — МКЗС или металлокерамикой) (см. рис. 1). Данное свойство отвечает за сохранение положительного эффекта даже после многократной замены масла или смазки уже без состава ГМД.

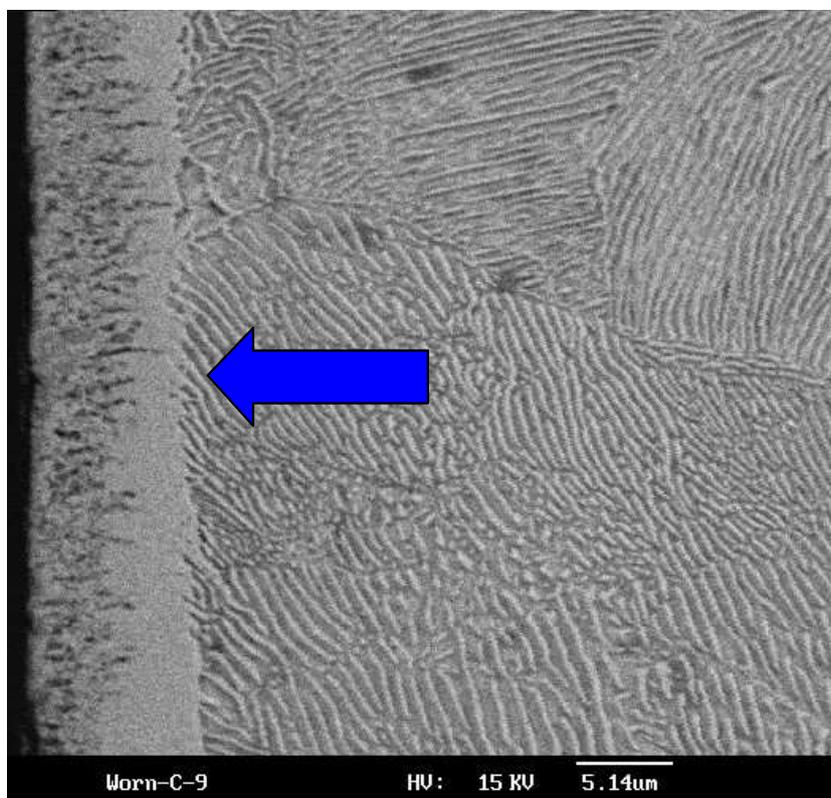


Рис. 1 Слой шлефа. Стрелкой показан образованный на поверхности металла МКЗС

Вторым важным свойством поверхностного защитного слоя является то, что он имеет пористую структуру, которая обеспечивает МКЗС адсорбционную активность (олеофильность или способность удерживать масло на поверхности пар трения, препятствуя его стеканию даже при остановке механизма) (см. рис. 2). Это препятствует износу металлических пар трения при пусках и остановках, в случае вытеснения масла с поверхности (условия «граничного трения»), а также создает условия для возникновения устойчивого «масляного клина» и обеспечивает высокие антифрикционные характеристики.

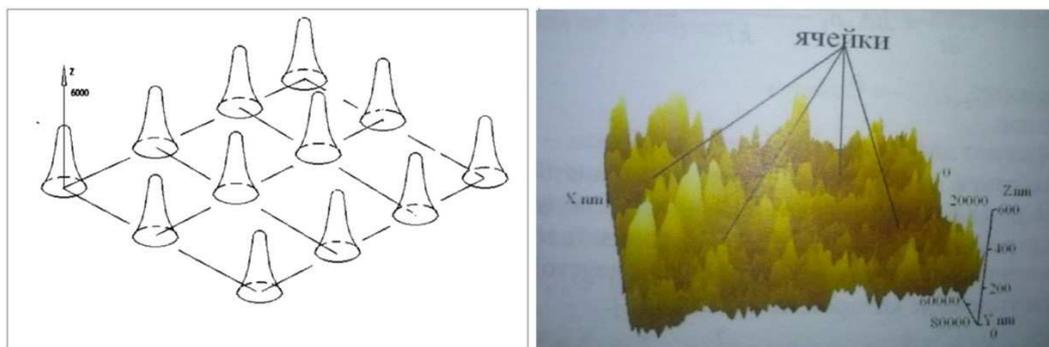


Рис. 2 Защитный слой на поверхности трения: слева — модель; справа — АСМ-изображение

ГМД применяется на любых типах металла: сталь, чугун, бронза, хром, баббит и т.д. От типа металла будут зависеть и конечные характеристики МКЗС, среднее значение процентного увеличения микротвердости составляет около 20 — 30 %.

Материал ММПТ инертен в химическом отношении, вводимая концентрация составляет 0,01 — 0,001 % от объема масла. Не оказывает влияния на физико-химические показатели масел и смазок (не влияя даже на показатель зольности — количества неорганических включений) и не является абразивом, что доказано многократными лабораторными и промышленными испытаниями.

Важно отметить, что технология ГМД не является присадкой и радикально отличается от существующих на рынке технологий по принципу своего действия. Любые присадки или добавки к маслам работают как третье тело и стараются противостоять процессам трения металла, вносятся в процентном соотношении от 5 до 20 % от объема масла в системе. Также требуется постоянное присутствие (в редких случаях допускаются небольшие перерывы) их в масле для поддержания определенного эффекта. ММПТ не становится третьим телом и никак не препятствует трению, а напротив использует его для построения новой структуры поверхности металла, вносится в существенно более низкой концентрации.

## 2.2 Области применения

Применение технологии осуществляется на новых или находящихся в эксплуатации узлах и механизмах, в которых присутствуют металлические пары трения.

Помимо флота, на сегодняшний день технология апробирована и применяется в горнодобывающей, нефтяной, автотранспортной, железнодорожной и прочих сферах на автотракторной технике, станочном, крановом и ином промышленном оборудовании.

В судостроительной и судоремонтной сферах используется для проведения ремонтно-восстановительных работ агрегатов с цилиндропоршневой группой, прямолинейных, криволинейных, цилиндрических трущихся, сопряженных поверхностей, подшипников качения, скольжения, шарниров, на зубчатых, винтовых и цепных передачах, парах трения цилиндр — кольцо, рельс — реборда колеса и др.

При эксплуатации речного и морского флота технология применяется на подшипниковых соединениях, трансмиссиях, подшипниках гребного вала, электродвигателях, насосах, иных узлах, где присутствуют металлические пары трения.

Особенно целесообразно применение на тяжело нагруженных механизмах, таких как силовые агрегаты (двигатели, компрессоры). ГМД может быть использована для форсунок (применяется при их подготовке, путем прокачки топлива с составом ММПТ для улучшения качества распыла, плотности закрытия иглы,

позволяет поднять интервал замены на максимальный рекомендуемый предел), ротокапов — механизма храповика или невозвратной поворотной головки штока клапана (продление срока эффективной эксплуатации), ТНВД (увеличение ресурса плунжерных пар, исключение их износа и появления задиров), всасывающих и выпускных клапанов (сокращение процесса притирки, увеличение износостойкости и обеспечение эффективной работы в течении всего периода до плановой замены).

## 2.3 Решаемые проблемы

*Судоходство.*

Применение технологии в судоходстве нацелено на основные проблемные места при эксплуатации:

- восстановление параметров работы силовых агрегатов (давление сжатия, давление вспышки, снижение температуры работы механизмов и т.д.);
- снижение расхода масла на угар;
- снижение расхода энергоносителей (топлива, электроэнергии);
- снижение вредных выбросов, в т.ч. углеродного следа (снижение продуктов недогара, таких как CO, CH, сажи, дымового числа);
- повышение безопасной эксплуатации агрегатов на топливе с низким содержанием серы.

## 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ FE-DO

### 3.1 Лабораторные испытания

Для оценки влияния материала ММПТ на поверхность металла, анализа структурных изменений, были проведены исследования на базе различных лабораторий и институтов, как отечественных, так и международных. Среди них исследования на базе институтов ЦНИДИ и ЦНИИМ, научного центра НАМИ, Политехнического университета им. Петра Великого, Токийского государственного университета Васеда, Германского Ллойда и пр.

### 3.2 Опытные-промышленные испытания на ледоколе «Адмирал Макаров»

Применение технологии ГМД на флоте началось еще в середине 1990-х гг. За это время были обработаны десятки различных судов, среди которых танкер «Белогорск» Приморского речного пароходства, ЛСС «Справедливый», «Сибирский», МСБ «Капитан Клюев» Владивостокского морского рыбного порта, паром «Петербург» (под наблюдением Германского Ллойда), т/х «Омолой» (испытания под наблюдением Речного Регистра РФ) и «Паром-8» (Ленское пароходство, с/к «Якутск»), «Славный», «Экарма-1», «Экарма-2», «Экарма-3» (Южно-Сахалин, по рекомендации РС Владивосток) ООО «Маринэкс-АйЭлСиЭс» и многие другие.

Пожалуй, самым ярким примером применения технологии стали испытания, проведенные на ледоколе «Адмирал Макаров» при участии Российского морского регистра судоходства (РС), которые проводились в период с апреля 2001 по май 2011 гг. по программе, согласованной с РС (АКТ № 41/5-11). Объектом испытаний выступал двигатель внутреннего сгорания вспомогательного дизель-генератора № 1 (далее ВДГ-1), модель 824TS "WARTSILA", дизель, четырехтактный. Заводской номер: 1163, год постройки 1973, 18 октября, машиностроительная корпорация в Вааса WARTSILA NSD, Финляндия. Нарботка с ввода в эксплуатацию на момент испытаний, моточасов: 54432.

Цель испытаний заключалась в сравнительной оценке технического состояния рабочих поверхностей трения, зарегистрированного в актах освидетельствования судна РС и в актах инженерно-технической комиссии за период с 24.04.2001 по 01.03.2006 гг. «До» и «после» завершения испытаний технологии — в сравнении, с их же техническим состоянием на май 2011 года.

Программа осмотра заключалась в:

1. обобщенном анализе документов, содержащих сведения по состоянию рабочих поверхностей деталей двигателя ВДГ № 1 перед началом, в ходе и после завершения испытаний;
2. обмерах деталей двигателя в разобранном виде;
3. сравнительной характеристики технического состояния рабочих поверхностей деталей двигателя, зарегистрированного в акте освидетельствования судна РС от 25.12.2004 года, с техническим состоянием рабочих поверхностей трения по состоянию на май 2011 года (см. рис. 3 — 6).

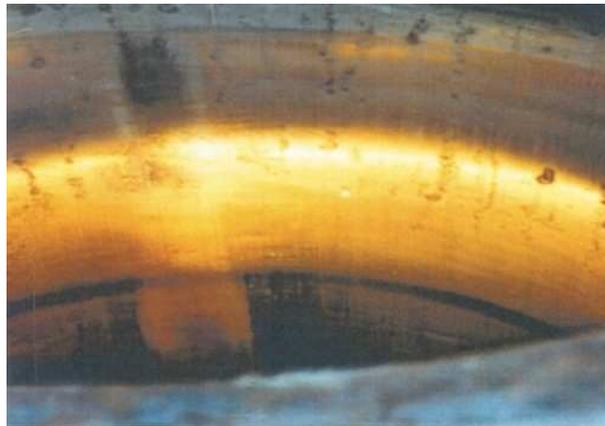


Рис. 3 Втулка до испытаний

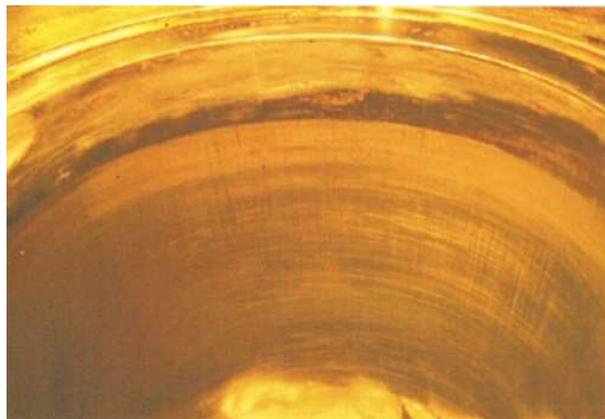


Рис. 4 Втулка через 11752 ч после начала испытаний



Рис. 5 Вкладыши до проведения испытаний

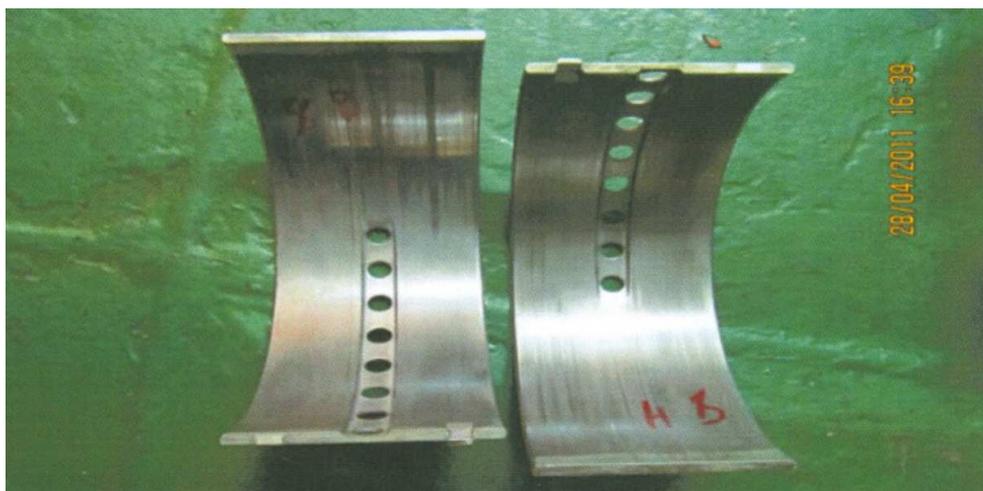


Рис. 6 Вкладыши через 35000 ч после начала испытаний

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЯ ИЗ ОБОБЩЕННОГО АНАЛИЗА ДОКУМЕНТОВ

Поскольку испытания включали в себя не только замеры рабочих параметров, но и разбор механизма с обмером и описательной оценкой всех деталей (поршней, поршневых колец, вкладышей, приводных шестерней, головных подшипников, клапанов газораспределения и проч.), общей оценки нагара дизеля, в данной статье будут приведены лишь ключевые параметры и общие выводы:

1. суммарная длительность эксплуатации ВДГ № 1 без ремонта с момента ввода состава ММПТ в масляную систему смазки, рекомендованной РС на основании положительных результатов периодических осмотров технического состояния пар трения, моточасов — 43210;

2. сокращение потребления топлива — показатель остаточной величины экономии (%) — 10. Расход топлива измерен через 6105 ч с начала испытаний для сравнения с расходом ВДГ № 5, состояние которого перед началом испытаний службой технической эксплуатации оценивалось лучшим, в сравнении с остальными дизель-генераторами. Техническое состояние ВДГ № 1 на момент начала испытаний оценивалось как самое плохое.

**П о я с н е н и е:** сокращение потребления топлива в основном произошло по причине восстановления геометрии цилиндропоршневой группы (увеличения плотности ЦПГ) и, как следствие, улучшения полноты сгорания топливно-воздушной смеси, а также снижения коэффициента трения;

3. уменьшение расхода масла М10Г2-ЦС по доливке на угар (%) — 40.

**П о я с н е н и е:** уменьшение зазоров ЦПГ препятствует попаданию масла в камеру сгорания (расходу масла на угар);

4. уменьшение расхода масла М10Г2-ЦС на замене за счет увеличения сохранности рабочих свойств более 4-х сроков наработки — по лабораторным анализам, (%) — 300.

**П о я с н е н и е:** снижение коэффициента трения и восстановление рабочих поверхностей сопряженных пар позволяет медленнее выработываться присадкам, находящимся в масле, обеспечивая более длительную и качественную работу смазывающего материала. Также снижается количество попадающего в масло топлива, нарушающего его химический состав и ухудшающего свойства;

5. срок годности масла М10Г2-ЦС до испытаний (без ММПТ) в режиме эксплуатации по анализам лабораторий горюче-смазочных материалов ОАО «ДВМП — FESCO», моточасов — 3000;

6. срок годности масла М10Г2-ЦС после испытаний (с ММПТ) в режиме эксплуатации по анализам лабораторий горюче-смазочных материалов ОАО «ДВМП — FESCO», моточасов — 18774;

7. масло смазочное М10Г2-ЦС — доливка на угар каждые 300 моточасов перед началом испытаний, л — 320;

8. масло смазочное М10Г2-ЦС — доливка на угар каждые 300 моточасов после завершения испытаний, л — 190;

9. снижение температуры работы подшипников, °С, — 2 — 6;

10. оценка нагара на элементах дизеля проводилась по состоянию до обработки и в несколько этапов в процессе испытаний. При первом осмотре данная оценка показала первичные уменьшения толщины нагара (с 1 — 5 мм до 0,2 — 1 мм), смены его структуры на рыхлую. Последующие оценки показали отсутствие нагара, мазутно-битумных отложений на клапанах газораспределения, картере, деке приводных шестерней, цилиндрических крышках, днищах поршней, газообменных трактах, было дано заключение об отсутствии необходимости в мотоочистке;

11. отмечен факт увеличения:

- диаметров шатунных шеек с размера 174,46 — 174,47 мм перед началом испытаний до размера 174,50 мм по всем сечениям, благодаря нарастанию слоя МКЗС, что отвечает максимальному диаметру шеек второго ремонтного размера;

- поршневых пальцев: при максимальном диаметре 105 мм, все поршневые пальцы по всем сечениям показали размер 104,99 мм чего не наблюдается в обычной практике; значительно уменьшились зазоры в рамках поршневых колец, в шатунных и главных подшипниках;

- диаметров цилиндров и вкладышей: отсутствие износа и небольшой процент прироста по контрольным точкам;

- вкладышей: а частности, перед началом испытаний был взят контрольный вкладыш № 8, признанный Регистром непригодным для дальнейшей эксплуатации. Рабочая поверхность найдена поврежденной питтингом, фреттингом и коррозией. Через 6105 ч рабочая поверхность контрольного нижнего вкладыша ромового подшипника № 8 восстановилось. Морским регистром восстановленный вкладыш признан годным для дальнейшей эксплуатации еще на 8000 ч;

12. в целом, анализ разницы величин основных эксплуатационных параметров до и после применения технологий ММПТ, визуально-тактильная оценка состояния сопряженных рабочих поверхностей трения, технических измерений за период с апреля 2001 по май 2005 гг. в сравнении с их же техническим состоянием на май 2011 года указывает на отсутствие износа силами трения.

## 5. ИТОГ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Проведенные испытания дают возможность в полной мере оценить и изучить воздействие материала ММПТ при длительном его применение в узлах и механизмах двигателя внутреннего сгорания. Проведение «безремонтного восстановления» на объекте испытаний позволило за 10 лет непрерывной эксплуатации избежать его ремонта и сохранить ресурс ключевых элементов ВДГ.

Основными итоговыми заключениями стали:

- восстановление состояния цилиндропоршневой группы (поршней, поршневых колец и их замков (стыков), шатунных и головных подшипников, цилиндров втулок, вкладышей, шатунных шеек);

- очистка дизеля от нагара и иных отложений (очистка поршней, огневой части, клапана газораспределения, картера, приводных шестерней, газообменные части);

- снижение расхода топлива и масла на угар;

- увеличение срока годности масла.

При имеющейся у судовладельца статистике по средней величине износа различных деталей за год эксплуатации за 10 лет испытаний данный показатель по целому ряду элементов агрегата вместо износа показал прирост, что заслуживает отдельного внимания и еще раз подтверждает восстановительные свойства технологии.

Положительный экономический эффект был отдельно посчитан судовладельцем, однако является внутренним документом не подлежит публикации, однако оценить примерное значение представляется возможным исходя из основных численных показателей акта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология ГМД является примером уникальной инновационных полностью российских разработки, которая позволяет эффективно решать поставленные перед ней задачи в области эксплуатации техники и оборудования.

Лабораторные, опытно-промышленные испытания и практика применения технологии ГМД в различных отраслях промышленности и на транспорте подтвердили заявленные, в т.ч. восстановительные, свойства и показала себя эффективным инструментом решения ряда основных вопросов, в особенности — при эксплуатации судов.

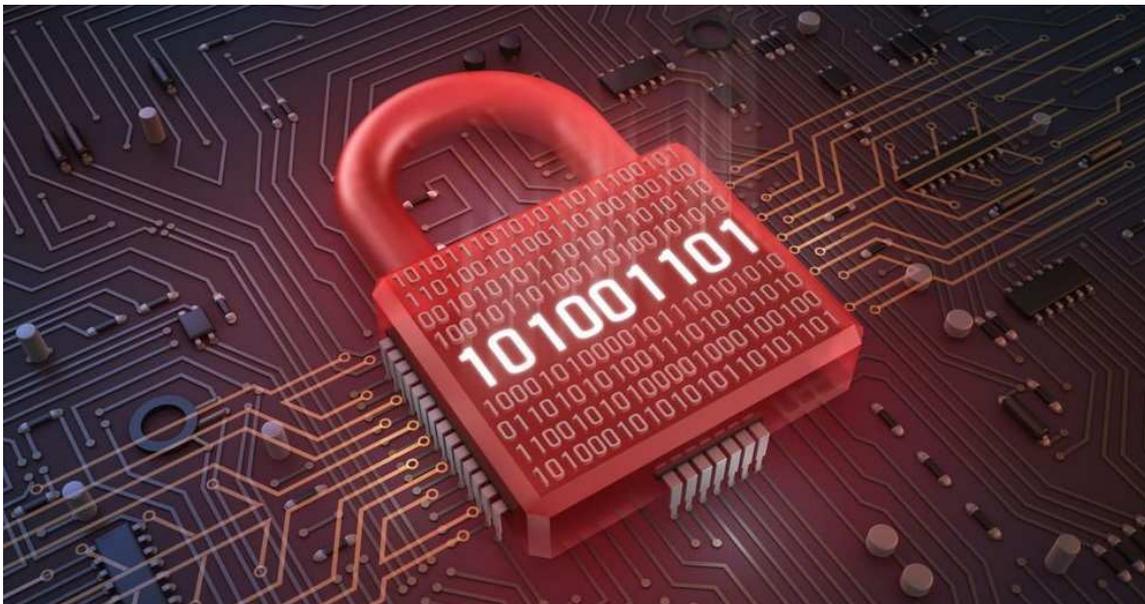
Результаты испытаний на ледоколе «Адмирал Макаров» позволили РС дать свое заключение о том, что «Проведенные испытания подтверждают, что модификация смазочного масла триботехническим составом ММПТ "Fe-do" повышает работоспособность пар трения и является безопасной для судового оборудования, поэтому может найти применение на морских судах».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трибология геомодифицированных смазочных материалов. Монография / К.Н. Долгополов и др. — Гродно: ГТАУ, 2013.
2. Трибохимические аспекты взаимодействия высокодисперсных частиц серпентинов с металлической поверхностью трения / К.Н. Долгополов и др. // Трение и износ. — 2012, № 2 (33).
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учеб. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МСХА, 2001.
4. Дроздов Ю.Н. и др. Новая противоизносная и антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция присадок к смазочным материалам. Проблемы машиностроения и надежности машин. М.: 2004. — No. 5, — с. 50 — 53.
5. ГУП РФ «Центральный научно-исследовательский дизельный институт» ООО «ЦНИДИ». Технический отчет «Моторные испытания «АРТ-технологии» на дизель-генераторе 4Ч 9,5/11 (договор № 44 от 22.02.2007)», — с. 35 — 40

## REFERENCES

1. *Tribologiya geomodifitsirovannykh smazochnykh materialov. Monografiya* [Tribology of geomodified lubricants. Monograph] / K.N. Dolgoplov et al. — Grodno: GSAU, 2013.
2. *Tribokhimicheskie aspekty vzaimodeystviya vysokodispersnykh chastits serpentinov s metallicheskoj poverkhnostyu treniya* [Tribochemical aspects of interaction of highly dispersed serpentine particles with metal friction surface] / K.N. Dolgoplov et al. // Friction and wear. — 2012, No. 2 (33).
3. Garkunov D.N. *Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost): Ucheb.* [Tribotechnics (wear and wear-free operation): Textbook] — 4th ed., revision and supplement. — M.: Publishing house MMGA, 2001.
4. Drozdov Yu.N. et al. *Novaya protivoznosnaya i antifriktsionnaya resursovsstanavlivayushchaya kompozitsiya prisadok k smazochnym materialam* [New anti-wear and antifricition resource-restoring composition of additives to lubricants] Problems of mechanical engineering and reliability of machines. M.: 2004. — No. 5, — с. 50 — 53.
5. State Unitary Enterprise of the Russian Federation "Central Research Diesel Institute" LLC "CRDI". Technical report "Motor tests "ART-technology" on diesel generator 4Ch 9,5/11 (contract No. 44 from 22.02.2007)". — pp. 35 — 40. (In Russian)



## КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ СУДОВ

---

### НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ И КИБЕРУСТОЙЧИВОСТИ МОРСКИХ СУДОВ

**В.А. Окунев**, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,  
e-mail: okunev.va@rs-class.org

В статье дано обоснование необходимости разработки и внедрения требований по повышению надежности компьютеризированных систем и обеспечению кибербезопасности и киберустойчивости морских судов. Рассмотрены существующие нормативные документы по обеспечению кибербезопасности и киберустойчивости морских судов, изданные Международной ассоциацией классификационных обществ. Приводится краткое содержание документов и область их применения. С учетом тенденции развития цифровых технологий на морском транспорте дана оценка развития существующих и разработка новых требований.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, киберустойчивость, компьютеризированные системы, нормативные документы

### REGULATORY DOCUMENTS ON CYBERSECURITY AND CYBER RESILIENCE OF SEA-GOING SHIPS

**V.A. Okunev**, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: okunev.va@rs-class.org

The article provides a justification for the need to develop and implement requirements to improve the reliability of computerized systems and ensure cybersecurity and cyber resilience of sea-going ships. The article also considers existing regulatory documents on cybersecurity and cyber resilience of ships published by the International Association of Classification Societies. Taking into account the trend of the implementation of the digital technologies in the sphere of maritime transport, an assessment of the development of existing and the development of new requirements has been given.

**Keywords:** cybersecurity, cyber resilience, computerized systems, regulatory documents

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие цифровых технологий на объектах водного транспорта способствует повышению уровня качества оказываемых услуг, эффективности управления ресурсами и повышению уровня безопасности. Вместе с тем новые технологии несут новые риски, последствия которых могут привести к аварийным ситуациям. С целью поддержания надлежащего уровня безопасности внедрение цифровых технологий в судоходной отрасли должно сопровождаться развитием и внедрением эффективных методов обеспечения надежности компьютеризированных систем, кибербезопасности и киберустойчивости судов.

Принимая во внимание, что цифровые технологии используются в судовых системах ответственного назначения, отказ последних по причине возникновения киберинцидента может привести к серьезным последствиям, влияющим на безопасность судоходства, загрязнение окружающей среды, сохранность перевозимых грузов и безопасность человеческой жизни, а с развитием автономного судоходства вопрос обеспечения кибербезопасности и киберустойчивости судов становится все более актуальным.

Источниками возникновения киберинцидентов являются как внешние нарушители, совершающие целенаправленные противоправные действия в отношении конкретного судна, так и внутренние нарушители в лице судового экипажа и персонала, обслуживающего компьютеризированные системы, непреднамеренные или преднамеренные действия которых могут привести к возникновению киберинцидентов.

В настоящее время наиболее вероятным риском является заражение компьютеризированных систем вредоносным программным обеспечением (ПО) (программы-вымогатели, трояны, вирусы и т.д.), которое может распространиться на все компьютеризированные системы, объединенные в единую информационную сеть, и привести к частичному или полному их отказу. Источниками заражения вредоносным ПО могут быть: электронная почта; переносные USB-накопители данных; переносные мобильные устройства, подключаемые к компьютеризированным системам для обслуживания; персональные мобильные устройства, которые могут подключаться экипажем к компьютеризированным системам.

С целью повышения уровня безопасности компьютеризированных судовых систем и судна в целом Международной ассоциацией классификационных обществ (МАКО) были разработаны и изданы следующие документы, содержащие унифицированные требования (УТ):

IACS UR E22 Rev.3 "On Board Use and Application of Computer based systems";

IACS UR E26 Rev.1 "Cyber resilience of ships";

IACS UR E27 Rev.1 "Cyber resilience of on-board systems and equipment".

Положения документов применяются к судам, контракт на постройку которых заключен 1 июля 2024 года или после указанной даты.

## УНИФИЦИРОВАННОЕ ТРЕБОВАНИЕ (УТ) МАКО E22

Новая версия документа УТ МАКО E22 издана в июне 2023 года. По сравнению с предыдущей версией документа в новой редакции, среди прочего, можно выделить следующие изменения:

- расширен перечень примеров систем категорий I, II и III;
- детализованы требования к системе управления качеством поставщика компьютеризированных систем;
- сформулированы требования к поставщику компьютеризированных систем;
- сформулированы требования к этапам разработки, тестированию и внесению изменений в программное обеспечение;
- сформулированы требования к системному интегратору;
- детализованы требования к обслуживанию компьютеризированных систем и управлению изменениями;
- внесены изменения в технические требования, предъявляемые к компьютеризированным системам;
- обновлен перечень документации, предоставляемой классификационному обществу, с указанием ответственного за предоставление указанной документации.

В целом, внесенные в новую редакцию изменения направлены на формализацию процессов разработки, обслуживания и внесения изменений в компьютеризированные системы с целью повышения качества и безопасности судовых систем, функционирование которых основано на использовании программируемых устройств.

## УНИФИЦИРОВАННОЕ ТРЕБОВАНИЕ (УТ) МАКО E26

Новая версия документа УТ МАКО E26 издана в ноябре 2023 года взамен первоначальной редакции, которая была аннулирована до момента вступления ее в силу. Документ содержит требования по обеспечению кибербезопасности и киберустойчивости судов и применяется в обязательном порядке к эксплуатационным технологическим системам (ОТ-системам), перечисленным в документе, следующих судов:

- пассажирских судов (включая высокоскоростные пассажирские суда), совершающих международные рейсы;
- грузовых судов валовой вместимостью 500 т и более, совершающих международные рейсы;
- высокоскоростных судов валовой вместимостью 500 т и более, совершающих международные рейсы;
- мобильных буровых установок валовой вместимостью 500 т и более;
- самоходных судов, задействованных при строительстве и обслуживании морских объектов (например, установок для технического обслуживания и ремонта ветряных турбин, плавучие краны и т.д.).

Для судов и компьютеризированных систем, требования для которых не являются обязательными, положения УТ МАКО E26 могут применяться на добровольной основе.

Документ разработан с применением целевого подхода, заключающегося в формировании целевых, функциональных и технических требований.

Первостепенной целью документа является обеспечение безопасного судоходства устойчивого к существующим киберрискам. Для достижения указанной цели сформированы следующие функциональные элементы (подцели).

**Идентификация** — разработка организационного понимания (состава, структуры, взаимодействия и т.д.) для управления киберрисками, связанным с судовыми системами, персоналом, ресурсами, данными и потенциальными возможностями.

**Защита** — разработка и внедрение соответствующих мер для защиты судна от киберинцидентов и обеспечения непрерывной эксплуатации судна.

**Обнаружение** — разработка и внедрение мер для обнаружения и идентификации возникших киберинцидентов на борту.

**Реагирование** — разработка и внедрение надлежащих мер и мероприятий для принятия ответных действий при обнаружении киберинцидентов.

**Восстановление** — разработка и внедрение необходимых мер и мероприятий для восстановления функциональности или сервисов необходимых для выполнения судовых операций, которые были нарушены в результате киберинцидента.

Для достижения вышеописанных подцелей разработаны технические требования. В дополнение к техническим требованиям документ содержит обоснования требований, а также указания по проверке соответствия положениям документа на этапах проектирования, строительства и эксплуатации судна.

Положения документа предусматривают возможность отступления от требований для компьютеризированных систем, попадающих в область применения УТ МАКО E26, при условии выполнения оценки рисков, подтверждающей допустимый уровень риска, связанного с отступлением от требований.

В приложении к документу содержится перечень документации, которая должна быть разработана на различных этапах с указанием ответственного за разработку.

Стоит отметить, что положения УТ МАКО E26, в дополнение к требованиям, изложенным в УТ МАКО E22, возлагают на системного интегратора дополнительные обязательства, связанные с обеспечением кибербезопасности и киберустойчивости судов. По умолчанию роль системного интегратора возлагается на судостроительный завод, при этом завод вправе передать полномочия системного интегратора сторонней организации путем заключения соответствующего договора.

## УНИФИЦИРОВАННОЕ ТРЕБОВАНИЕ (УТ) МАКО E27

Новая версия документа УТ МАКО E27 издана в сентябре 2023 г. взамен первоначальной редакции, которая была аннулирована до момента вступления ее в силу. Документ дополняет УТ МАКО E26 и содержит требования для обеспечения кибеустойчивости компьютеризированных систем и оборудования, попадающих под действие положений УТ МАКО E26.

Технические требования, предъявляемые к компьютеризированным системам и оборудованию, соответствуют требованиям международного стандарта МЭК 62443-3-3. В отдельный раздел выделены требования к безопасному жизненному циклу разработки систем.

Для компьютеризированных систем может быть применено отступление от выполнения требований при условии предоставления оценки рисков в соответствии с положениями УТ МАКО E26.

Для серийных и стандартно изготавливаемых компьютеризированных систем может применяться схема типового ободрения, что позволяет сократить объем предоставляемой на рассмотрение документации.

В документе представлен перечень документации, которая должна быть представлена на рассмотрение классификационному обществу, с описание информации, которая должна содержаться в документации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С развитием цифровых технологий и, как следствие, возникновением новых рисков, связанных с цифровыми технологиями, в дальнейшем можно ожидать появление новых требований и расширение области применения существующих требований. Разработка новых требований прежде всего должна основываться на результатах анализа кибеинцидентов, возникающих на судах, что позволит сохранить баланс между эффективностью защитных мер и затратами на их внедрение.

Внедрение мер, изложенных в рассмотренных в статье документах, не может гарантировать стопроцентной защиты судна от киберугроз, однако позволяет в значительной степени снизить вероятность возникновения и последствия киберинцидентов, что в конечном счете содействует поддержанию надлежащего уровня безопасности судоходства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IACS. UR E22. Computer-based systems, Rev.3 June 2023.
2. IACS. UR E26. Cyber resilience of ships, Rev.1 November 2023.
3. IACS. UR E27. Cyber resilience of on-board systems and equipment, Rev.1 September 2023.

## REFERENCES

1. IACS. UR E22. Computer-based systems, Rev.3 June 2023.
2. IACS. UR E26. Cyber resilience of ships, Rev.1 November 2023.
3. IACS. UR E27. Cyber resilience of on-board systems and equipment, Rev.1 September 2023.



## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 656.61.052

### ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО СУДОВОЖДЕНИЯ

**С.Д. Айзинов**, канд. техн. наук, Государственный университет морского и речного флота (ГУМРФ) имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: AjzinovSD@gumrf.ru

**А.А. Буцанец**, канд. техн. наук, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

**С.В. Смоленцев**, д-р техн. наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: smolencevsv@gumrf.ru

**В.Г. Сенченко**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», Новороссийск, e-mail: victor.senchenko@mail.ru

**М.С. Лопатин**, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова», Новороссийск, e-mail: bx04@mail.ru

В статье рассматривается проблема оценки качества работы систем автономного судовождения (САС). Эти системы являются одним из ключевых компонентов автономного судоходства и обеспечивают управление движением морских автономных надводных судов (МАНС). От качества их работы зависит не только эффективность работы МАНС, но и безопасность мореплавания. Очевидно, что подобные системы, разрабатываемые различными производителями, должны быть сертифицированы Администрациями на основе результатов их тестирования аккредитованными организациями. Для этого необходимы одобренные Администрацией инструменты, в частности Методика оценки качества работы САС. В работе представлена концепция оценки качества работы САС, которое предлагается оценивать по результатам решения этой САС набора навигационных задач, возникающих в процессе эксплуатации морского надводного судна. В процессе тестирования от САС получают множество навигационных решений, для анализа которых строится решетка оценивания. Для этого: проводится декомпозиция навигационного решения на компоненты; формулируются требования к данным компонентам; для каждого компонента и каждого требования к нему определяется индикатор — измеримая характеристика, показывающая степень выполнения данного требования; для каждого индикатора формируется метрика, определяющая численную оценку реализации индикатора; определяется функция свертки оценок индикаторов для получения оценки выполнения компонента навигационного решения; определяется функция свертки оценок компонентов навигационного решения для получения численной оценки этого навигационного решения. В результате свертки оценок навигационных решений получают комплексную оценку качества работы САС. Предложенная концепция реализована в Методике, разработанной по заданию Минтранса России. Краткая информация об этой Методике так же приведена в работе.

**Ключевые слова:** МАНС, система автономного судовождения, оценка качества

## PRINCIPLES FOR ASSESSING THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF SYSTEMS FOR AUTONOMOUS SHIPPING

**S.D. Aysinov**, PhD, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: AjzinovSD@gumrf.ru

**A.A. Butsanets**, PhD, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping St. Petersburg, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

**S.V. Smolentsev**, DSc, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: SmolencevSV@gumrf.ru

**V.G. Senchenko**, PhD, associate professor, Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, e-mail: victor.senchenko@mail.ru

**M.S. Lopatin**, PhD, associate professor, Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, e-mail: bx04@mail.ru

The article discusses the problem of assessing the operation quality of systems for autonomous shipping (SAS). These systems are one of the key components of autonomous shipping and provide traffic control for maritime autonomous surface ships (MASS). Not only the efficiency of the MASS operation, but also the safety of navigation depends on the quality of their work. Thus, it is obvious that such systems developed by various manufacturers must be certified by Administrations based on the results of their testing by accredited organizations. This requires tools approved by the Administration, in particular the Methodology for assessing the quality of SAS operation. The concept of assessing the quality of SAS operation has been herein presented based on the results of this SAS solution to a set of navigation problems that arise during the operation of a maritime surface vessel. During the testing process, many navigation solutions have been obtained from the SAS, for the analysis of which an evaluation grid has been built. To do this, the navigation solution has been decomposed into components; requirements for these components have been formulated; for each component and each requirement for it, an indicator, which is a measurable characteristic showing the degree of fulfillment of this requirement has been determined; for each indicator, a metric that determines the numerical assessment of the indicator implementation has been generated; a function for convolving indicators assessments to obtain an assessment of the navigation solution component implementation has been determined, as well as the function of convolving the navigation solution components assessments to obtain a numerical estimate of this navigation solution. As a result of navigation solutions assessments convolution, a comprehensive assessment of the SAS operation quality has been obtained. The proposed concept is implemented in a Methodology developed under the contract with the Russian Ministry of Transport. Brief information about this methodology has also been provided.

**Keywords:** prediction of the movement of the vessel, route of the vessel, navigation graph, assessment of the navigation situation

## ВВЕДЕНИЕ

Морской транспорт является важным элементом мировой экономики, что, в свою очередь, является одним из основополагающих элементов обеспечения качества жизни человечества. Наблюдаемый «логистический коллапс» на водном транспорте связан с человеческим фактором, что является глобальным вызовом для отрасли. Человеческий фактор является причиной свыше 80 % инцидентов на море, он является причиной убытков, оцениваемых в сумму более \$ 1 млрд ежегодно. Другой проблемой является растущий дефицит плавсостава.<sup>1</sup>

Автономное судовождение является одним из возможных ответов на глобальные вызовы экономики, логистики и безопасности. Система автономного судовождения (САС) может быть определена как комплекс элементов, находящийся во взаимодействии, в котором осуществляется целенаправленное управление движением судна от причала до причала и которая может изменять свое состояние или поведение в результате управляющих воздействий человека и/или алгоритма на основе требований безопасности мореплавания, модели судна и окружающей среды, информации о состоянии судна и окружающей среды, включая информацию о навигационной и гидрометеорологической обстановке в районе плавания.

В зависимости от реализации САС конкретным производителем оснащение и функциональные возможности отдельного сегмента могут быть более или менее выражены. Система автономного судовождения в зависимости от реализации может быть предназначена для управления МАНС любой категории автономности, либо только для управления МАНС отдельных категорий автономности в соответствии с классификацией РС и Международной морской организацией (ИМО). Соответствие категорий автономности Регистра (РС) и ИМО приведено в работе [1, 2].

<sup>1</sup>Кадровые парадоксы гражданского флота. Режим доступа: <https://portnews.ru/projects/project56/>

В настоящее время остро встает вопрос не только внедрения САС в оперативную работу портов и судоходных компаний, администраций морских портов, лоцманские службы, системы управления движением судов, центров дистанционного управления движением МАНС, но также и об оценке качества работы таких систем с точки зрения обеспечения безопасности мореплавания. Это обусловлено повышением интенсивности судоходства, необходимостью обеспечения технологической готовности участия в международных перевозках морским автономным транспортом, в том числе в соответствии с документами, разработанными ИМО в отношении концепции автономного судовождения.

Как следствие возникает вопрос о доверии к таким системам со стороны государства флага, а также государства, в чьих территориальных водах движется судно с САС. Комитет по безопасности мореплавания (КБМ) ИМО в ходе своей 107-й сессии одобрил обновленную «дорожную карту» по разработке целевого кодекса по МАНС, как изложено в приложении 15 к документу MSC 107/20 [3], которая предполагает доработку и принятие не имеющего обязательной силы кодекса по МАНС на 108-й сессии КБМ, а также продолжение обсуждения рекомендаций (руководств) к кодексу по МАНС.

В рамках работы по созданию Кодекса по МАНС предполагается разработка определения Системы автономного судовождения (САС), которая является неотъемлемым элементом морского автономного надводного судна, а также базовых рекомендаций (и в перспективе — требований) к такой системе для использования при различных способах эксплуатации МАНС.

Среди прочего, предполагается ввести в Кодекс по МАНС положение о том, что САС должна быть сертифицирована/одобрена Администрацией или признанной организацией с целью оценки ее функционала в целом и в части выполнения всех или выборочных задач, связанных с эксплуатацией судна. Представляется, что для выполнения этой задачи, а также для оценки качества и функционала появляющихся на рынке систем автономного судовождения и приемлемости САС для использования применительно к одному или нескольким способам эксплуатации автономного судна необходимо разработать и применять соответствующие методики, которые будут содействовать Администрации в принятии обоснованных решений, связанных с одобрением/сертификацией САС.

## 1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В данном разделе представлена концепция оценки качества работы САС.

Качество работы САС предлагается оценивать по результатам решения этой САС набора навигационных задач, возникающих в процессе эксплуатации морского надводного судна.

Порядок оценки качества каждого навигационного решения следующий (см. рис. 1):

- моделируется навигационная ситуация;
- моделируются обстоятельства плавания;
- САС предлагается навигационная задача;
- от САС получают решение этой задачи (навигационное решение);
- анализируется качество этого решения.

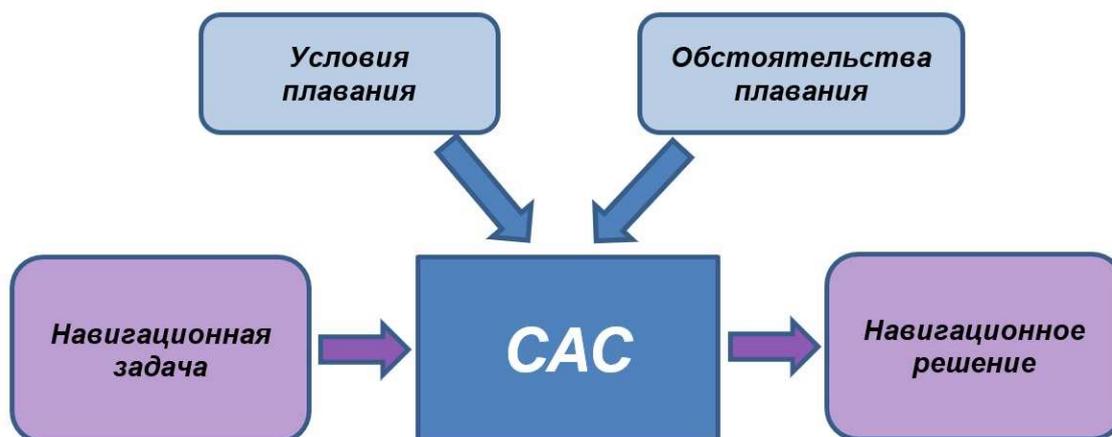


Рис. 1 Получение навигационного решения

По набору навигационных задач получают множество навигационных решений при различных условиях плавания и обстоятельствах плавания (см. рис. 2).

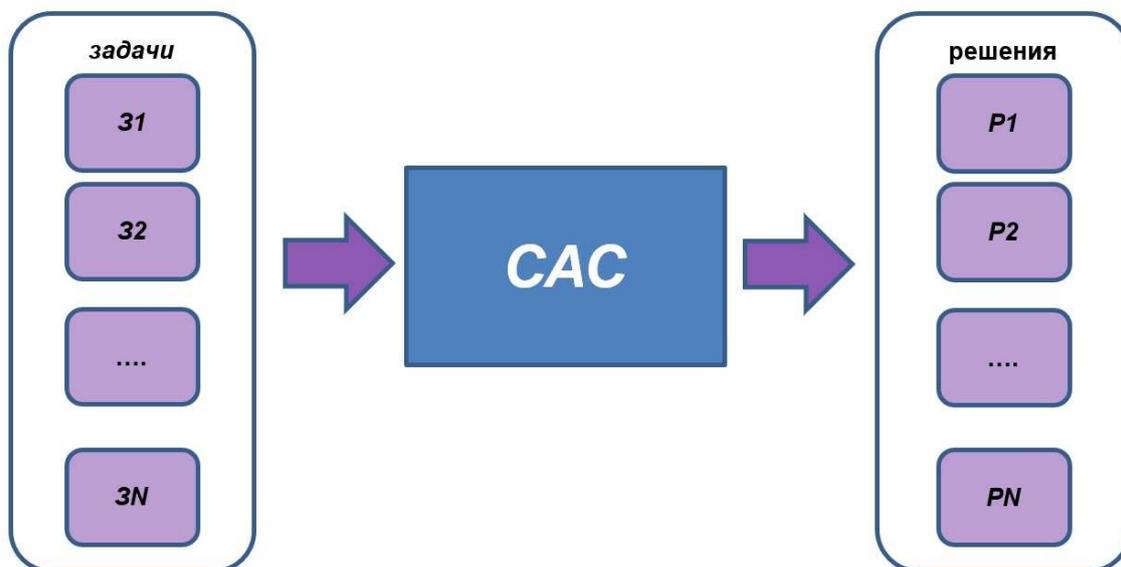


Рис. 2 Генерация набора навигационных решений

Для анализа навигационных решений САС строится решетка оценивания. Для этого:

- проводится декомпозиция навигационного решения на компоненты;
- формулируются требования к компонентам навигационных решений;
- для каждого компонента и каждого требования к нему определяется индикатор — измеримая характеристика, показывающая степень выполнения данного требования;
- для каждого индикатора формируется метрика, определяющая численную оценку реализации индикатора;
- определяется функция свертки оценок индикаторов для получения оценки выполнения компонента навигационного решения;
- определяется функция свертки оценок компонентов навигационного решения для получения комплексной численной оценки этого навигационного решения.

При получении навигационного решения от САС это решение проверяют с помощью решетки оценивания и получают численные оценки индикаторов (см. рис. 3). По этим оценкам рассчитывают оценку полученного компонента навигационного решения и в результате оценку самого навигационного решения (см. рис. 4). Оценки навигационных решений рассчитывают для всего множества навигационных решений, полученных для различных условий и обстоятельств плавания.

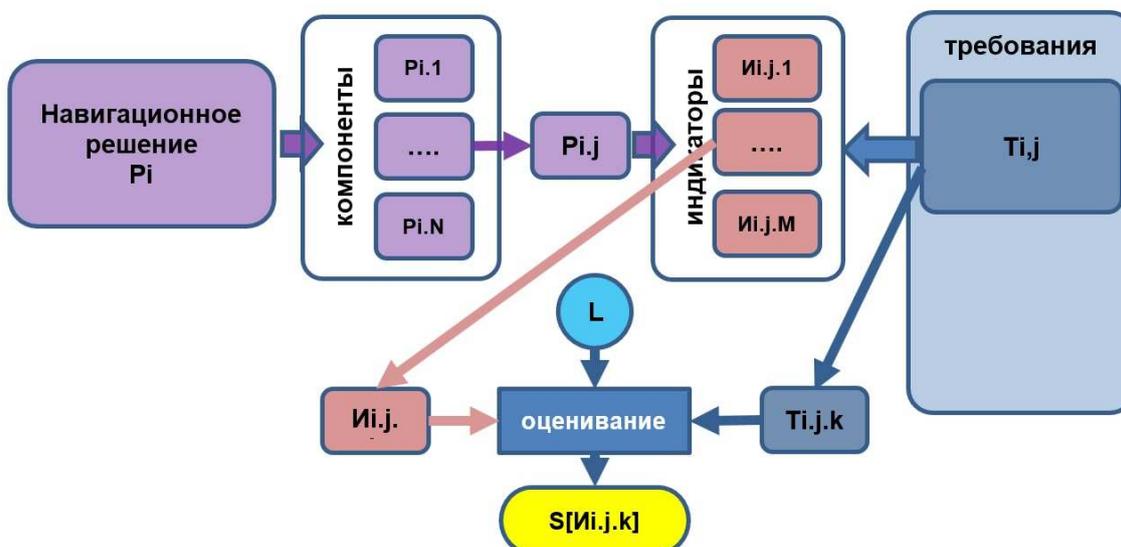


Рис. 3 Принцип оценки индикатора реализации требований к компонентам навигационных решений

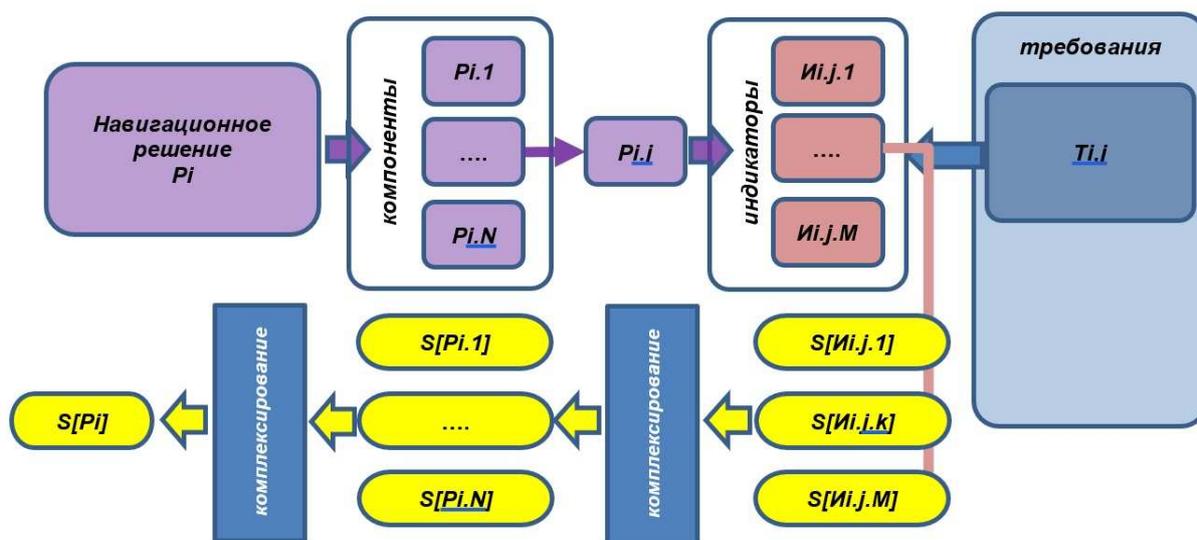


Рис. 4 Принцип оценки навигационного решения

Комплексная оценка качества работы САС определяется как средневзвешенная оценка из оценок всего множества навигационных задач (см. рис. 5). Весовая матрица строится экспертным методом.

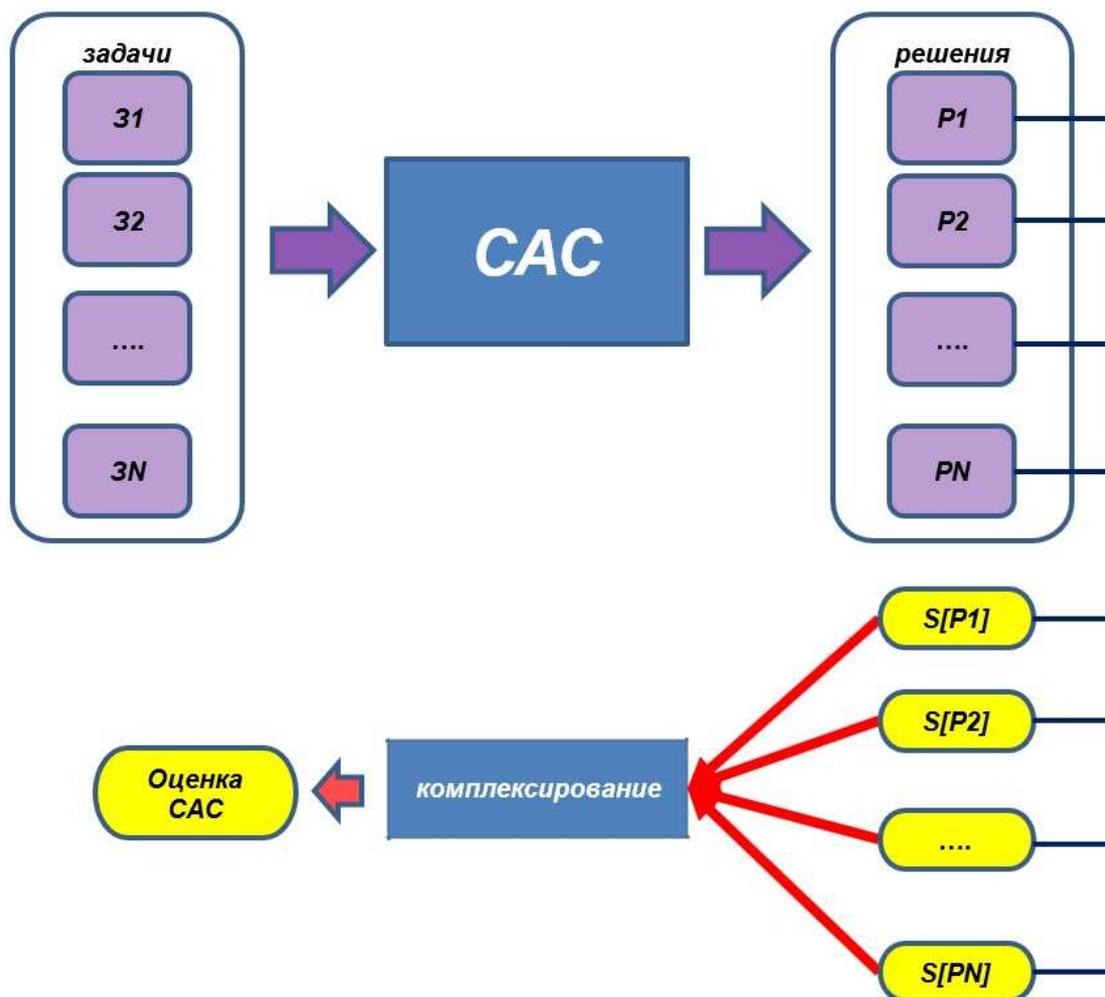


Рис. 5 Принцип получения комплексной оценки качества работы САС

В результате обработки множества решений навигационных задач, полученных от САС при различных условиях и обстоятельствах плавания, получают следующие оценки:

- комплексная оценка качества работы САС;
- оценки качества решений отдельных навигационных задач при различных условиях и обстоятельствах плавания;
- оценки реализации компонентов навигационных задач при различных условиях и обстоятельствах плавания.

Эта информация позволит Администрации объективно оценить качество работы предъявляемой САС, а Производителю определить проблемные места в своем решении.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе принципов, изложенных в предыдущем разделе, была разработана Методика оценки качества работы САС. Данная методика включена в состав одноименного Руководства.

Методика позволяет оценить функциональные качества САС через оценку качества решений навигационных задач, возникающих в процессе эксплуатации МАНС. Она включает в себя следующие компоненты:

- набор навигационных задач;
- классификация условий плавания;
- классификация обстоятельств плавания;
- классификация оценок опасности навигационных ситуаций;
- декомпозиция навигационных решений на компоненты;
- набор требований к компонентам навигационных решений;
- множество индикаторов выполнения требований к навигационным решениям;
- методика оценивания значений компонентов навигационного решения;
- методика оценивания навигационных решений;
- комплексная оценка качества работы САС.

Набор навигационных задач, используемый для оценки функциональности САС, включает в себя задачи, возникающие в различные периоды эксплуатации морского надводного судна. Этот набор содержит 13 задач (см. табл. 1).

Для каждой навигационной задачи определен результат — навигационное решение (см. табл. 2).

Классификация условий плавания построена на основе Кодекса ПДНВ [4]. Содержит 30 условий, в которых может находиться МАНС и в которых необходимо решать конкретные навигационные задачи (см. табл. 3).

Классификация обстоятельств плавания перечисляет возможные обстоятельства встречи с другими судами и строится на основе МППСС-72 [5]. Она содержит 24 варианта (с под вариантами) (см. табл. 4).

Для корректного управления судном САС должна оценивать уровень опасности текущей навигационной ситуации. Разработана классификация оценок навигационной ситуации, которая содержит 6 вариантов (см. табл. 5).

Для каждой навигационной задачи из набора (см. табл. 1) определены исходные данные и результат — навигационное решение. Проведена декомпозиция навигационных решений на компоненты. Общее количество компонентов навигационных решений — 40.

Для каждого компонента навигационного решения определен рекомендуемый состав информации и сформулированы требования. Общее количество требований — 122.

Для контроля выполнения каждого из требований определены индикаторы — измеримые параметры, оценивающие выполнение требований к каждому из компонентов навигационного решения. Каждому индикатору назначена метрика, позволяющая выразить значение индикатора в численном виде.

Используются следующие типы метрик:

- А — численное значение;
- В — бинарное значение 1/0 (ДА/НЕТ);
- С — взвешенное  $[0..,1]$ ;
- Д — оценочное  $\{0, 0,5, 1\} = \{\text{не соответствует, частично соответствует, соответствует}\}$ .

Пример индикаторов для компонентов первого навигационного решения представлен в табл. 6.

Таблица 1

## Набор навигационных задач, используемых для оценки функциональности САС

ИД	Задача	Содержание задачи
31	Получение исходной информации	Определение района плавания и — периода перехода, получение карт (с корректурой), прогнозов погоды и ледовых условий на район и период плавания, информации о гидрологической обстановке в районе плавания, местных условий и т.п.
32	Построение плана рейса	Построение безопасного оптимального подробного плана рейса с учетом маневренных характеристик и загрузки судна, прогноза погоды, гидрологических, ледовых и иных характеристик района плавания
33	Определение вектора состояния	Определение положения места судна и параметров его движения в реальном времени с оценкой их точности
34	Наблюдение	Определение состояния судна, гидрологических и метеорологических условий, условий видимости. Обнаружение и распознавание всех целей, объектов и сигналов, связанных с безопасностью
35	Определение текущей навигационной ситуации	Определение текущих: вектора состояния судна, окружающей обстановки, условий и обстоятельств плавания
36	Прогнозирование навигационной ситуации	Прогнозирование развития навигационной ситуации на заданный период
37	Оценивание навигационной ситуации	Оценка комплексной навигационной ситуации, определение уровня опасности и выделение опасных объектов
38	Управление движением по маршруту	Использование органов управления курсом и скоростью для обеспечения движения судна по заданному маршруту с учетом внешних условий с заданной точностью
39	Предотвращение столкновений	Определение маршрута движения судна с целью уклонения от опасных объектов или расхождения с опасными целями или избегания контакта с навигационными опасностями с учетом текущей навигационной ситуации
310	Маневрирование для предотвращения столкновения	Использование органов управления курсом и скоростью для обеспечения движения судна по заданному маршруту избегания опасности с заданной точностью и учетом текущей навигационной ситуации
311	Маневрирование в ситуации опасного сближения	Использование органов управления курсом и скоростью для выполнения маневра последнего момента с целью избегания столкновения или минимизации ущерба при столкновении
312	Маневрирование при контакте с навигационной опасностью	Использование органов управления курсом и скоростью для выполнения маневра позволяющего минимизировать последствия контакта с навигационной опасностью
313	Управление в аварийном состоянии	Определение аварийного маршрута

Таблица 2

## Результаты решения навигационных задач

ИД	Задача	ИД	Результаты
31	Получение исходной информации	P1	Исходная информация по рейсу
32	Построение маршрута	P2	Маршрут перехода
33	Определение вектора состояния	P3	Вектор состояния
34	Наблюдение	P4	Описание объектов; описание сигналов от объектов
35	Определение текущей навигационной ситуации	P5	Описание навигационной ситуации
36	Прогнозирование навигационной ситуации	P6	Описание прогноза навигационной ситуации
37	Оценивание навигационной ситуации	P7	Комплексная оценка
38	Управление движением по маршруту	P8	Траектория движения
39	Предотвращение столкновений	P9	Маршрут избегания опасности
310	Маневрирование для предотвращения столкновения	P10	Траектория движения
311	Маневрирование в ситуации опасного сближения	P11	Траектория движения
312	Маневрирование при контакте с навигационной опасностью	P12	Траектория движения
313	Управление в аварийном состоянии	P13	Маршрут

Таблица 3

## Классификация условий плавания

ИД	Название	Характеристика условий
У1	Камеральные	Условия, не требующие немедленной реакции на изменения навигационной ситуации
<b>Погодные условия</b>		
У2.1 У2.2 У2.3	Хорошая погода Наличие попутной волны Штормовые	Плавание в хорошую погоду Плавание с уменьшенной скоростью для избегания повреждений, причиняемых попутной волной Управление судном в штормовых условиях, включая оказание помощи терпящему бедствие судну или летательному аппарату; буксировку; средства удержания неуправляемого судна в безопасном положении относительно волны и уменьшения дрейфа
<b>Ледовые условия</b>		
У3.1 У3.2 У4	Во льдах Вблизи льда При обледенении судна	Плавание во льдах Плавание вблизи льда Плавание в условиях обледенения судна
<b>Условия видимости</b>		
У5.1 У5.2 У6.1 У6.2	Ясно Ограниченная видимость Светлое время суток Темное время суток	Плавание в условиях нормальной видимости Плавание в условиях ограниченной видимости Плавание в светлое время суток Плавание в темное время суток
<b>Морские операции</b>		
<b>Якорные операции</b>		
У7.1 У7.2 У7.3 У7.4 У7.5	Судно на якоре Якорь не держит Постановка на якорь Постановка на якорь на стесненной якорной стоянке Снятие с якоря	Судно на якоре Ситуация «якорь не держит» Постановка на один или два якоря Постановка на один или два якоря на стесненной якорной стоянке Снятие с якоря
<b>Операции с людьми</b>		
У8.1 У8.2	Посадка и высадка лоцмана Спуск шлюпок и плотов в штормовую погоду	Маневрирование при приближении к лоцманской станции и посадке или высадке лоцмана с учетом погоды, состояния прилива, выбега, тормозного пути, и других маневренных характеристик судна Маневрирование с целью спуска дежурных шлюпок или спасательных шлюпок и плотов в штормовую погоду
<b>Специальные операции, требующие сложного маневрирования</b>		
У9.1 У9.2 У9.3 У10	Взаимодействие с буксирами Швартовка Постановка в сухой док Взаимодействие между проходящими судами	Взаимодействие судна и буксиров Швартовка и отшвартовка при различных ветрах, приливах и течениях с использованием буксиров и без них Постановка в сухой док поврежденного и неповрежденного судна Взаимодействие между близко проходящими судами, а также взаимодействие собственного судна с близлежащими берегами (канальный эффект)
<b>Географические условия</b>		
У11 У12 У13 У14	Открытое море Стесненные воды Мелководье В районах с сильными приливами	Акватория вдали от навигационных опасностей Управление судном при плавании в реках, эстуариях и стесненных водах с учетом влияния течения и ветра и стесненных вод на управляемость Маневрирование на мелководье, включая уменьшение запаса воды под килем из-за эффекта проседания, бортовой и килевой качки Плавание в районах с сильными приливами
<b>Районы с особыми условиями</b>		
У15 У16 У17 У18 У19	В районе с системой разделения движения В районе служб движения судов В прибрежных водах и районах интенсивного судоходства В районах с особыми правилами С лоцманом на борту	Плавание в системах разделения движения или вблизи них Плавание в системах управления движением судов (СДС) и плавание или вблизи них Плавание в прибрежных водах и районах интенсивного судоходства Плавание в районах, в которых введены особые правила Плавание с лоцманом на борту

Таблица 4

Обстоятельства плавания		
ИД	Обстоятельство	Общая характеристика
O1	Движение судна с безопасной скоростью	[МППСС-72 Раздел I Правило 6]
O2	Обгон	[МППСС-72 Раздел II Правило 13]
O2.1	Уступает дорогу цели	[МППСС-72 Раздел II Правило 16]
O2.2	Цель уступает дорогу	[МППСС-72 Раздел II Правило 17]
O3	Сближение судов, идущих прямо друг на друга	[МППСС-72 Раздел II Правило 14]
O4	Пересечение курсов	[МППСС-72 Раздел II Правило 15]
O4.1	Цель пересекает курс справа	[МППСС-72 Раздел II Правило 15]
O4.2	Цель пересекает курс слева	[МППСС-72 Раздел II Правило 15]
O5	Встреча судна, лишённого возможности управляться	[МППСС-72 Раздел II Правило 18]
O6	Встреча судна, ограниченного в возможности маневрировать	[МППСС-72 Раздел II Правило 18]
O7	Встреча судна, занятого ловом рыбы	[МППСС-72 Раздел II Правило 18]
O8	Встреча судна, стесненного своей осадкой	[МППСС-72 Раздел II Правило 18]
O9	Судно обнаружило присутствие другого судна только с помощью радиолокатора	[МППСС-72 Раздел II Правило 19d]
O10	Судно услышало туманный сигнал другого судна	[МППСС-72 Раздел II Правило 19e]
O11	Судно занято буксировкой и толканием	[МППСС-72 Часть C Правило 24]
O12	Судно занято ловом рыбы	[МППСС-72 Часть C Правило 25]
O13	Судно лишено возможности управляться	[МППСС-72 Часть C Правило 27a]
O14	Судно ограничено в возможности маневрировать	[МППСС-72 Часть C Правило 27b]
O15	Судно с механическим двигателем, занятое такой буксировочной операцией, которая значительно ограничивает возможность буксирующего и буксируемого судов отклониться от своего курса	[МППСС-72 Часть C Правило 27c]
O16	Судно занято дноуглубительными работами или подводными операциями	[МППСС-72 Часть C Правило 27d]
O17	Судно занято водолазными работами	[МППСС-72 Часть C Правило 27e]
O18	Судно занято работами по устранению минной опасности	[МППСС-72 Часть C Правило 27f]
O19	Судно стеснено своей осадкой	[МППСС-72 Часть C Правило 28]
O20	Судно исполняет лоцманские обязанности	[МППСС-72 Часть C Правило 29]
O21	Судно на якоре	[МППСС-72 Часть C Правило 30a]
O22	Судно на мели	[МППСС-72 Часть C Правило 30b]
O23	Судно буксируется	[МППСС-72 Часть D Правило 35e]
O24	Судно терпит бедствие и требует помощи	[МППСС-72 Часть D Правило 37]

Таблица 5

Оценки опасности навигационной ситуации			
ИД	Оценка	Степень опасности	Характеристика
C1	Отсутствие опасностей	Отсутствует	Отсутствие навигационных опасностей, опасных объектов и опасных целей
C2	Наличие навигационной опасности	Низкая	Наличие навигационной опасности, с которой возможен контакт за период оценки навигационной ситуации
C3	Наличие опасных объектов	Средняя	Наличие плавучих объектов, с которыми возможно опасное сближение за период оценки навигационной ситуации
C4	Наличие опасных целей	Средняя	Наличие целей, с которыми возможно опасное сближение за период оценки навигационной ситуации
C5	Опасное сближение	Высокая	Произошло нарушение домена безопасности судна
C6	Контакт с навигационной опасностью	Крайне высокая	Сближение судна с навигационной опасностью на расстояние, которое считается недопустимым

Таблица 6

## Пример индикаторов компонентов навигационного решения

ИДК	Компоненты навигационного решения	Требования к компонентам навигационного решения	ИД	Индикатор	метрика
P1.1	Данные об остойчивости судна	1. Используются;	И1.1.1	Используются данные об остойчивости	
		2. соответствуют загрузке	И1.1.2	Данные об остойчивости судна соответствуют загрузке	
P1.2	Эксплуатационные ограничения судна	1. Используются;	И1.2.1	Используются данные об эксплуатационных ограничениях	
		2. актуализированы на период плавания	И1.2.2	Данные об эксплуатационных ограничениях судна актуализированы на период плавания	
P1.3	Маневренные характеристики судна	1. Используются;	И1.3.1	Используются маневренные характеристики	
		2. соответствуют загрузке судна	И1.3.2	Маневренные характеристики соответствуют загрузке судна	
P1.4	Картографические данные	1. Используются;	И1.4.1	Используются картографические данные	
		2. набор карт соответствует району плавания;	И1.4.2	Соответствие району	
		3. масштаб карт соответствует району плавания;	И1.4.3	Соответствие масштаба	
		4. должны иметь корректуру с учетом оперативной информации, связанной с навигационной безопасностью	И1.4.4	Актуальность корректуры	
P1.5	Прогноз гидрологической и метеорологической обстановки	1. Используется в электронной форме в машиночитаемом и человекочитаемом представлениях в виде гидрометеорологических полей приливов, ветра, волнения и течения;	И1.5.1	Используются поля приливов, ветра, волнения и течения	
		2. гидрометеорологические поля соответствуют району плавания;	И1.5.2	Соответствие району	
		3. шаг сетки гидрометеорологических полей выбран в соответствии с масштабом выбранных карт для района плавания;	И1.5.3	Соответствие масштаба	
		4. гидрометеорологические поля соответствуют периоду плавания	И1.5.4	Соответствие периоду плавания	
P1.6	Прогноз ледовой обстановки	1. Используется в электронной форме в машиночитаемом и человекочитаемом представлениях в виде ледовых полей;	И1.6.1	Используется информация о ледовой обстановке	
		2. соответствует району плавания;	И1.6.2	Информация о ледовой обстановке соответствует району плавания	
		3. соответствует периоду плавания	И1.6.3	Информация о ледовой обстановке соответствует периоду плавания	
P1.7	Информация о местных и особых условиях плавания	1. Используется;	И1.7.1	Используется информация о местных и особых условиях плавания	
		2. соответствует району плавания;	И1.7.2	Информация о местных и особых условиях плавания соответствует району плавания	
		3. актуализирована на период прохождения этих районов	И1.7.3	Информация о местных и особых условиях плавания времени прохождения этих районов	
P1.8	Навигационные ограничения района плавания	1. Учитываются все навигационные ограничения района плавания	И1.8.1	Учет навигационных ограничений	

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого навигационного решения разработана методика его оценки, которая включает в себя:  
 набор вариантов исходных данных;  
 перечень компонентов навигационного решения;  
 методики оценки каждого из компонентов навигационного решения;  
 расчет средневзвешенной оценки навигационного решения.  
 Например, оценка компонента P1.4 — Картографические данные — осуществляется по формуле

$$S[P1.4] = (S[P1.4]_1 + \dots + S[P1.4]_N)/N,$$

где  $S[P1.4]_i$  — оценка по  $i$ -варианту исходных данных.

$$S[P1.4]_i = S[И1.4.1]_i \cdot S[И1.4.2]_i \cdot (S[И1.4.3]_i + S[И1.4.4]_i)/2,$$

где оценки индикаторов определяются для каждого варианта согласно табл. 7:

Таблица 7

Оценки индикаторов для компонента P1.4

Оценка	Значение	Способ определения
S[И1.4.1]	1	В представленных САС исходных данных присутствует компонент P1.4 – картографические данные в составе: <ul style="list-style-type: none"> <li>● набор навигационных карт;</li> <li>● корректура навигационных карт</li> </ul>
	0	В представленных САС исходных данных отсутствует компонент P1.4 — Картографические данные
S[И1.4.2]	1	Набор навигационных карт покрывает район плавания
	0	Набор навигационных карт не покрывает район плавания
S[И1.4.3]	1	Для каждого участка плавания в наборе навигационных карт присутствует карта максимального масштаба
	0,5	Для не менее 50 % участков плавания в наборе навигационных карт присутствует карта максимального масштаба
	0	Для менее 50 % участков плавания в наборе навигационных карт присутствует карта максимального масштаба
S[И1.4.4]	1	Корректура навигационных карт актуальна на дату начала плавания
	0	Корректура навигационных карт не актуальна на дату начала плавания

Оценка навигационного решения P1 — исходная информация по рейсу определяется по формуле

$$S[P1] = (k1.1 \cdot S[P1.1] + \dots + k1.8 \cdot S[P1.8]) / (k1.1 + \dots + k1.8), \quad (1)$$

где  $k1.i$  — весовые коэффициенты, определяющие значимость  $i$ -компонента в решении в соответствии с табл. 8:

Таблица 8

Весовые коэффициенты компонентов навигационного решения P1

ИДК	Компонент решения	$k1.i$
P1.1	Данные об остойчивости судна	1,0
P1.2	Эксплуатационные ограничения судна	1,0
P1.3	Маневренные характеристики	0,8
P1.4	Картографические данные	1,0
P1.5	Прогноз гидрологической и метеорологической обстановки	0,6
P1.6	Прогноз ледовой обстановки	0,6
P1.7	Информация о местных и особых условиях плавания	0,6
P1.8	навигационные ограничения района плавания	1,0

Результирующая комплексная оценка качества работы САС определяется как средневзвешенная оценка всех навигационных решений

$$S(CAC) = (\sum_{i=1}^{13} ki \cdot S[Pi]) / (\sum_{i=1}^{13} ki), \quad (2)$$

где  $ki$  — весовые коэффициенты, определяющие значимость решения  $i$ -задачи в результирующей оценке согласно табл. 9.

Таблица 9

Весовые коэффициенты навигационных задач

ИД	Задача	ИД	$ki$
31	Получение исходной информации	P1	0,8
32	Построение плана рейса	P2	0,8
33	Определение вектора состояния	P3	1,0
34	Наблюдение	P4	1,0
35	Определение текущей навигационной ситуации	P5	1,0
36	Прогнозирование навигационной ситуации	P6	0,8
37	Оценивание навигационной ситуации	P7	0,8
38	Управление движением по маршруту	P8	1,0
39	Предотвращение столкновений	P9	1,0
310	Маневрирование для предотвращения столкновения	P10	1,0
311	Маневрирование в ситуации опасного сближения	P11	0,8
312	Маневрирование при контакте с навигационной опасностью	P12	0,8
313	Управление в аварийном состоянии	P13	0,6

Весовые коэффициенты определены экспертным методом путем опроса более 100 судоводителей с квалификацией уровня управления. В дальнейшем предполагается более широкое исследование данного вопроса, позволяющее провести уточнение значений этих коэффициентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из обязательных условий повышения эффективности функционирования и развития водного транспорта является необходимость создания и внедрения в хозяйственную деятельность интеллектуальных транспортных систем (ИТС), частным случаем которых является автоматизированный поиск и принятие к реализации максимально эффективных сценариев для обеспечения необходимого уровня мобильности, повышение безопасности и эффективности транспортного процесса достигаемое с помощью синтеза современных информационных и телематических технологий. Одним из видов ИТС могут стать беспилотные аппараты с системами автономного судовождения, в том числе относящиеся к техническому флоту [6 — 8].

Для беспилотных аппаратов, эксплуатируемых на внутренних водных путях других стран в настоящее время разрабатываются системы дистанционного управления, позволяющие управлять только конкретным объектом или группой однотипных объектов. Как правило, такие объекты выполняют задачи экологического, гидрографического, гидрологического мониторинга. Размер таких объектов обычно не превышает 12 м. В то же время активно рассматриваются вопросы, связанные с автономным функционированием более крупных судов, выполняющими грузовые и пассажирские перевозки речными и морскими путями. Однако строительство и работа таких судов обладает большей потенциальной опасностью и требует более тщательной проработки [9 — 11]. Это послужило одной из предпосылок выполнения работы по оценке функциональных свойств систем автономного судовождения.

В работе сформулированы принципы оценки качества работы САС и описана Методика, реализующая данные принципы. Она может быть использована Администрациями или признанными организациями для оценки качества работы и сертификации конкретных решений по системам управления МАНС.

При реализации этой методики необходимо представлять для тестируемой САС различные навигационные задачи и оценивать результаты их решения. Очевидно, что для генерации набора задач и автоматизированного оценивания их решения необходимо использовать цифровую платформу. Эта платформа должна иметь возможность моделировать навигационные ситуации (в том числе и аварийные) в различных условиях и обстоятельствах плавания. Создание такой платформы является отдельной задачей, требующей своего решения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

В данной статье представлена концепция оценки качества работы САС и приводится информация о методике оценки качества работы САС, которые были разработаны авторами при выполнении научно-исследовательской работы по теме «Разработка методики оценки функциональных свойств систем автономного судовождения». Заказчик — Министерство транспорта Российской Федерации, исполнитель — ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, государственный контракт от 14.10.2022 г. № 1770236142722000051.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев С.В. Перечень оборудования и обзор протоколов передачи данных для автономных надводных судов / С.В. Смоленцев, С.Ф. Шахнов, А.А. Буцанец // Электронные информационные системы. — 2023. — № 4(39). — с. 10 — 21. — EDN UDSLXP.
2. Смоленцев С.В. Сетевые аспекты передачи данных из морского автономного надводного судна в центр дистанционного управления и обратно // С.В. Смоленцев, С.Ф. Шахнов, А.А. Буцанец // Электронные информационные системы. — 2024. — № 1(40). — с. 5 — 17.
3. MSC 107/20. Report of the Maritime Safety Committee on its 107th session — 2023 — 121 с.
4. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ // STCW), Лондон, 07.07.1978.
5. Международные правила предупреждения столкновений судов в море, 1972 года. (МППСС-72). — М.: МОРКНИГА, 2018. — 168 с.
6. Каретников В.В. Некоторые аспекты создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов на внутренних водных путях // В.В. Каретников, А.И. Меншиков, С.В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2019. — т. 11. — № 2. — с. 222 — 229.
7. Рудых С.В. Системы мониторинга и управления судами технического и вспомогательного флота на внутренних водных путях России: дисс. д-р техн. наук: 05.13.06 // Рудых Сергей Витальевич. — СПб, 2013 — 308 с.
8. Каретников В.В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом/В.В. Каретников, С.В. Рудых, А.А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — с. 7 — 15.
9. Lynch K.M. et al. What factors may influence decision-making in the operation of Maritime autonomous surface ships? A systematic review // Theoretical Issues in Ergonomics Science. — 2024. — Т. 25. — №. 1, — с. 98 — 142.
10. Триполец О.Ю. Расчет маневра расхождения двух безэкипажных судов путем минимизации функции стоимости в компьютерной среде MATLAB // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Vol. 15. — № 5. — с. 876 — 884. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884>.
11. Li Z. et al. Risk and reliability analysis for maritime autonomous surface ship: A bibliometric review of literature from 2015 to 2022// Accident Analysis & Prevention. — 2023. — Vol. 187, — с. 107090.

## REFERENCES

1. Smolentsev S.V. *Perechen oborudovaniya i obzor protokolov peredachi dannykh dlya avtonomnykh nadvodnykh sudov* [List of equipment and review of data transmission protocols for autonomous surface ships]/S.V. Smolentsev, S.F. Shahnov, A.A. Butsanets // Electronic information systems. — 2023. — № 4(39), — pp. 10 — 21. — EDN UDSLXP.
2. Smolentsev S.V. *Setevye aspekty peredachi dannykh iz morskogo avtonomnogo nadvodnogo sudna v tsentr distantsionnogo upravleniya i obratno* [Network aspects of data transmission from a marine autonomous surface ship to the remote control center and back]// S.V. Smolentsev, S.F. Shahnov, A.A. Butsanets // Electronic information systems. — 2024. — № 1(40), — pp. 5 — 17.
3. MSC 107/20. Report of the maritime safety committee on its 107th session — 2023 — 121 p.
4. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW), London, 07.07.1978.
5. International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs-72), M.: MORKNIGA, 2018. — 168 p. (In Russian)
6. Karetnikov V.V. *Nekotorye aspekty sozdaniya telekommunikatsionnoy avtomatizirovannoy sistemy organizatsii dvizheniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh* [Some aspects of creating a telecommunication automated system for organizing vessels traffic of inland waterways] / V.V. Karetnikov, A.I. Menshikov, S.V. Rudykh//Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2019. — T. 11. — № 2, — pp. 222 — 229.
7. Rudykh, S.V. *Sistemy monitoringa i upravleniya sudami tekhnicheskogo i vspomogatelnogo flota na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossii* [Monitoring and control systems for technical and auxiliary fleet vessels on Russian inland waterways]: diss. ... d-r tekhn. nauk: 05.13.06.// Rudykh Sergey Vitalevich. — SPb, 2013 — 308 p.
8. Karetnikov V.V. *K voprosu razrabotki osnovnykh kontseptualnykh polozheniy sistemy distantsionnogo upravleniya tehnikeskim flotom* [Toward the development of the basic conceptual provisions of the system of remote control of the technical fleet] // V.V. Karetnikov, S.V. Rudykh, A.A. Butsanets//Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. — 2019. — № 2. — pp. 7 — 15.

9. Lynch K.M. et al. What factors may influence decision-making in the operation of Maritime autonomous surface ships? A systematic review //Theoretical Issues in Ergonomics Science. — 2024. — Vol. 25. — №. 1, — pp. 98 — 142.
10. Tripolets O.Ju. *Raschet manevra rashozhdeniya dvukh bezekipazhnykh sudov putem minimizatsii funktsii stoimosti v kompyuternoy srede MATLAB* [Calculating a collision avoidance maneuver for two unmanned ships by minimizing a cost function in MATLAB]// Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. — 2023. — vol. 15. — № 5, — pp. 876 — 884. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884>.
11. Li Z. et al. Risk and reliability analysis for maritime autonomous surface ship: A bibliometric review of literature from 2015 to 2022// Accident Analysis & Prevention. — 2023. — vol. 187, — p. 107090.

# 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]. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed on 22.05.2012).

**2.5.2** Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh 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 (kuteynikov.ma@rs-class.org).

**6.2** Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

**6.3** По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

**6.4** Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

**6.5** Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

**6.6** Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы  
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>  
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>  
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>  
[www.fonstola.ru/](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/>  
<https://cdo.smolgu.ru/>

Фото для обложки журнала предоставлено Мажириным Ильей Аркадьевичем,  
инженером-инспектором Дальневосточного филиала РС

Российский морской регистр судоходства  
**Журнал**  
**«Научно-технический сборник**  
**Российского морского регистра судоходства»**  
**вып. 74**

*Редакционная коллегия журнала*

Редактор *А.В. Спиленко*  
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*  
Дизайн концепции *М.В. Ведмеденко*

Подписано в печать 28.06.2024. Формат 60 × 84/8  
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства  
191181, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литера А  
[www.rs-class.org/ru/](http://www.rs-class.org/ru/)