

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

КРИТЕРИИ ОСТОЙЧИВОСТИ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ИМО
КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАЧКИ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОЕКТА СУДНА

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

АНАЛИЗ ФРАХТОВЫХ СТАВОК НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНАЯ ПЕРЕДАЧА



№ 80
сентябрь
2025

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 80, 2025

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

Учредитель-издатель: ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
Главный редактор: М.А. Кутейников. E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org
ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, No. 80, 2025

Scientific and technical periodical has been published since 1916. The Founder and the Publisher: Russian Maritime Register of Shipping (RS) Editor-in-Chief: Mikhail Kuteynikov. E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org ISSN 2223-7097

Editorial board

Alexey O. Berezin — Chairman of Editorial Board, DSc, Deputy Director General, RS
Maxim S. Boyko — Cand. Tech. Sc., Deputy Chairman, RS
Alexander S. Bolshev — DSc, Prof., Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University
Andrey V. Grigoriev — Cand. Tech. Sc., Assoc. Prof., Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (SUMIS)
Alexander A. Ivanchenko — DSc, Prof., Head of the Dep. of ICE and Automation of Marine Power Plants, SUMIS
Alexey V. Ilin — DSc, Assoc. Prof., Deputy General Director and Head of the Research and Production Center, NRC Kurchatov Institute, CRISM Prometey
Mikhail A. Kuteynikov — DSc, Asst. in Scientific and Technical Activity, RS
Valery N. Polovinkin — DSc, Prof., Research Adviser, Krylov State Research Centre
Aleksander A. Rodionov — DSc, Prof., Head of the Dep. of Ship Structural Design, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU)
Kirill V. Rozhdestvenskiy — DSc, Prof., Director of the Dep. of International Cooperation, SMTU
Anatoliy Ye. Sazonov — DSc, Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), SUMIS
Oleg Ya. Timofeev — DSc, Prof., SMTU
Vladimir N. Tryaskin — DSc, Prof., Head of the Dep. of Design and Technical Operation of Ships, SMTU
Alexander V. Kirichenko — DSc, Prof., Head of the Dep. of Ports and Cargo Terminals, SUMIS
Alexander L. Kuznetsov* — DSc, Prof., Dep. of Ports and Cargo Terminals, SUMIS
Vladimir V. Karetnikov — DSc, Prof., First Vice-Rector, Head of the Dep. of Navigation on Inland Waterways, SUMIS
Yuri M. Iskanderov — DSc, Prof., Head of the Lab. of Intelligent Systems, St. Petersburg Federal Research Center of RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS
Vladimir A. Zhukov — DSc, Prof., Head of the Dep. of Theory and Design of Ship ICE, SUMIS
Sergey V. Smolentsev — DSc, Prof., Head of the Dep. of Automation and Computer Engineering, SUMIS
Sergey N. Khrunkov — DSc, Prof., Head of the Dep. of Power Plants and Thermal Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University
Mikhail N. Pokusaev — DSc, Prof., Head of the Dep. of Operation of Water Transport, Astrakhan State Technical University
Andrey V. Anisimov — DSc, Assoc. Prof. of the A.I. Meos Dep. of Nanostructured, Fibrous and Composite Materials, NRC Kurchatov Institute, CRISM Prometey
Vladimir V. Yarisov — DSc, Prof., Dep. of Physics and General Disciplines, Admiral F.F. Ushakov Baltic Higher Naval College
Artem A. Butsanets — Cand. Tech. Sc., Assoc. Prof. Dep. of Theory and Design of Ship ICE, SUMIS

Subscription index is 80534 in Ural-press catalog.
On-line version of the journal is available at <https://sbormik.rs-class.org/jour>
The journal is included in Russian index of scientific citing www.elibrary.ru, VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Ulrich's Periodicals Directory international database.

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

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

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 80

RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 25.12.2015 ПИ № ФС 77-64086), и публикует результаты научных исследований по широкому спектру вопросов безопасности мореплавания судов и морских объектов, охраны человеческой жизни на море, сохранности грузов, экологической безопасности, обзорные материалы и информацию о существенных изменениях действующих правил и руководств Регистра. Журнал предназначен для широкого круга специалистов, связанных с вопросами безопасности человеческой жизни на море, охраны окружающей среды, проектирования и строительства судов и средств освоения шельфа. Также журнал будет интересен студентам и курсантам профильных технических образовательных учреждений.

Регистр выражает признательность авторам статей и приглашает ученых и специалистов к публикациям научных работ в журнале. Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

2.5.18 – Проектирование и конструкция судов

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

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

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

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

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

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

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

2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics

2.5.18 – Design and construction of ships

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

2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург
2025



СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Реуцкий А.С., Чугаева А.Е., Семионичев Д.С. Анализ условий, влияющих на создание и эксплуатацию оффшорных рыбоводных ферм 4
A.S. Reutskii, A.E. Chugaeva, D.S. Semionichev Analysis of conditions affecting the design of offshore fish farms

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

Бабчук Е.В., Березин А.О., Реуцкий А.С., Сперанская Я.А. Анализ фрахтовых ставок на перевозку навалочных грузов в портах Российской Федерации в период с апреля 2024 по апрель 2025 года 21
E.V. Babchuk, A.O. Berezin, A.S. Reutskii, Y.A. Speranskaya Analysis of bulk cargo freight rates in the ports of the Russian Federation in the period from April 2024 to April 2025

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ SEAWORTHINESS

Румянцев Н.Е., Морозов В.П., Калинина Н.В. Способы определения характеристик экраноплана с помощью различных видов экспериментов 32
N.E. Rumyantsev, V.P. Morozov, N.V. Kalinina Methods for determining the characteristics of an ekranoplan using various types of experiments

Бессонова В.О., Аносов А.П. Новые конструкции рулей изменяемого профиля и техническое решение, повышающее их эффективность 50
V.O. Bessonova, A.P. Anosov The new construction of the variable profile rudders and a technical solution for increasing efficiency

Кутейников М.А. О возможности интеграции критерии остойчивости второго поколения ИМО в систему комплексного нормирования мореходности 64
M.A. Kuteynikov Possibility of integrating IMO second-generation stability criteria in complex seaworthiness norms system

Альбаев Д.А., Динцер А.И. Определение коэффициентов демпфирования бортовой качки для накрененных шпангоутных контуров численными методами 75
D.A. Al'baev, A.I. Dintser Determinations of damping coefficients of roll for heeled frame sections using numerical methods

Шульц С.В., Кутейников М.А., Шульц В.Ю. Построение пространственной аппроксимации набора диаграмм статической остойчивости автономного судна 82
S.V. Shults, M.A. Kuteynikov, V.Yu. Shults Construction of a spatial approximation of a set of diagrams of static stability of an autonomous ship

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Воробьева А.А., Аносов А.П. Компенсация сварочных напряжений с учетом их концентрации путем предварительного изгиба корпуса судна 94

A.A. Vorobyeva, A.P. Anosov Compensation of welding stresses taking into account their concentration by preliminary bending of the ship's hull

Платонов В.В., Тряскин В.Н. Влияние энерговооруженности ледокола на величину расчетных ледовых нагрузок (методика учета) 108

V.V. Platonov, V.N. Tryaskin The effect of icebreaker power capacity on the calculated ice load (Methodology)

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА
MATERIALS AND WELDING

Мотовилина Г.Д., Соколов Е.С., Хлусова Е.И. Влияние типоразмера образцов на механические свойства высокопрочной судостроительной стали при одноосном растяжении 114

G.D. Motovilina, E.S. Sokolov, E.I. Khlusova Influence of specimens typesize on mechanical properties of high-strength shipbuilding steel during uniaxial tension

Мотовилина Г.Д., Садкин К.Е., Хлусова Е.И., Яковлева Е.А. Исследование упрочнения поверхностных слоев износостойкой стали и наплавок в процессе триботехнических испытаний. 125

G.D. Motovilina, K.E. Sadkin, E.I. Khlusova, E.A. Yakovleva Study of surface layers hardening of wear-resistant steel and surfacing during friction tests

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
DESIGN OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Таровик О.В., Косоротов А.В., Матаруев М.О., Бахарев А.А., Крестянцев А.Б. Концепция и программная реализация цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования 137

O.V. Tarovik, A.V. Kosorotov, M.O. Mataruev, A.A. Bakharev, A.B. Krestyantsev Concept and software implementation of a digital sibling of a ship at early design stages

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Серов А.А., Серов А.В., Цыганков А.В. Оптимизация конструктивных и режимных параметров роторного регенеративного теплообменника 156

A.A. Serov, A.V. Serov, A.V. Tsygankov Optimizing the operating and design parameters of regenerative rotary heat exchangers

Сенчурин Л.П., Черенкова С.В., Иванова М.А. Планетарно-цепочные редукторы для судовых энергетических установок большой мощности 166

L.P. Senchurin, S.V. Cherenkova, M.A. Ivanova Cycloid gearboxes for marine power plants of high capacity



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 639.3.05
EDN ADYDEB

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОФШОРНЫХ РЫБОВОДНЫХ ФЕРМ

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

А.Е. Чугаева, стажер, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: chugaeva.ae@rs-class.org

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

В работе рассматривается нормативная база классификационных обществ по созданию и эксплуатации оффшорных рыбоводных ферм, проанализированы актуальные зарубежные статьи, посвященные проблеме проектирования оффшорных рыбоводных ферм с целью формирования перечня исходных требований на проектирование морских объектов этого типа.

Ключевые слова: морские установки, аквакультура, рыбоводные фермы, садки, управление риском.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Нормативная база классификационных обществ по созданию и эксплуатации морских оффшорных рыбоводных ферм / А.С. Реуцкий, А.Е. Чугаева, Д.С. Семионичев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 4 — 20. — EDN ADYDEB.

ANALYSIS OF CONDITIONS AFFECTING THE DESIGN OF OFFSHORE FISH FARMS

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

A.E. Chugaeva, Intern, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: chugaeva.ae@rs-class.org

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

The paper examines the regulatory framework of classification societies for the creation and operation of offshore fish farms, analyzes current articles on the problem of designing offshore fish farms in order to form a list of initial requirements for the design of offshore facilities of this type.

Keywords: offshore installations, aquaculture, fish farms, risk management.

For citation: Reutskii A.S., Chugaeva A.E., Semionichev D.S. Regulatory framework of classification societies for the construction and operation of offshore fish farms. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 4 — 20. EDN ADYDEB. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Разведение рыб имеет богатую историю: первое упоминание о разведении карпов в Китае датируется 475 г. до н.э., на Руси рыбоводство появилось в X — XI вв. В настоящее время рыборазведение переживает подъем, связанный с ежегодным ростом населения в мире, который в 2024 г. достиг 1 %/год, что составляет 82 млн человек. В связи с ростом населения Земли увеличивается спрос и на продукты питания, которых со временем становится недостаточно для того, чтобы удовлетворить растущую потребность. Незаменимыми в рационе человека являются продукты с содержанием животного белка, к которым относятся продукты рыболовства и рыбоводства. Наибольший прирост населения наблюдается в странах с высоким уровнем бедности и недостаточно доступными продуктами, где добыча наполненного белком питания должна быть минимально, насколько возможно, затратной и достаточно эффективной.

В настоящий момент рыбный промысел не отвечает концепции «устойчивого развития» (в части экологичности) из-за того, что большинство видов промысловых рыб вылавливается на грани их способности к воспроизводству [1]. В настоящее время для добычи рыбы чаще используют траулеры и сейнеры — рыболовные суда, однако из-за ограниченности мест лова, конкуренции за них и ряда других проблем, нестабильности объема добычи, негативного влияния на окружающую среду и популяцию редких и исчезающих видов рыб становится экономически целесообразно выращивать необходимые разновидности рыб и морепродуктов непосредственно в море. За последнее десятилетие аквакультура стала надежным источником рыбы на мировом продовольственном рынке, закрывающим пробел между спросом и предложением со стороны рыбного промысла в соответствующем сегменте. По данным ООН, доля выращенной рыбы от общего объема долгие годы неуклонно росла, пока в 2022 г. не было зафиксировано превышение объема искусственно выращенной рыбы (94,4 млн т) над объемом вылова в дикой природе (91 млн т). В тот же период более 3 миллиардов человек полагались на рыбу и морепродукты как на основной источник белка [2]. Среднегодовой прирост добычи в реках и морях за период 1990 — 2020 гг. достиг 609 % со средним темпом роста в 6,7 % в год [3].

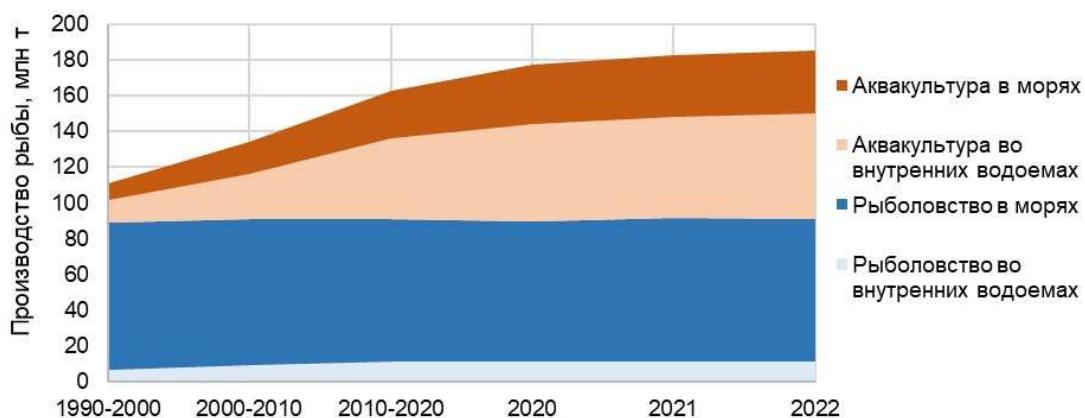


Рис. 1. Динамика роста промысла и производства рыбы за последние десятилетия [2]

В соответствии со стратегией развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. для достижения целевых показателей по годовому производству 618 т продукции товарной аквакультуры, включая посадочный материал, необходимо достичь темпов ежегодного увеличения производства, равных приблизительно 10 %. При этом необходимо отметить, что темпы и масштабы развития товарной аквакультуры в России в настоящее время отстают от уровня лидирующих в данном направлении государств. Значительная часть отечественного производства приходится на карповые и лососевые виды рыб, однако российская индустрия аквакультуры испытывает по перспективным объектам товарного рыбоводства затруднения в поставках высокопродуктивного рыбопосадочного материала, высокоэффективных комбикормов, современных средств диагностики, профилактики и лечения заболеваний объектов аквакультуры, а также специальной техники и оборудования для выращивания.

В настоящий момент специалисты DNV прогнозируют дальнейший рост производств выращиваемой рыбы [4], при этом отмечая, что он замедляется из-за уменьшения количества прибрежных акваторий, лицензированных для разведения рыбы, роста заболеваемости выращиваемой рыбы и противодействия

общественных организаций по защите окружающей среды. Для выращивания рыбы используют приспособления различной степени сложности: от садков — сетей с каркасом (рис. 2а) до плавучих оффшорных рыбоводных ферм (далее — ОРФ). В настоящий момент большинство выращиваемой рыбы производится на прибрежных рыбопарках в плавучих садках. Вблизи побережья рыбофермы садкового типа защищены от неблагоприятных погодных условий и удобны в части кормления, хранения и переработки рыбы, электроснабжения, технического обслуживания, безопасности эксплуатации, легкого доступа персонала.

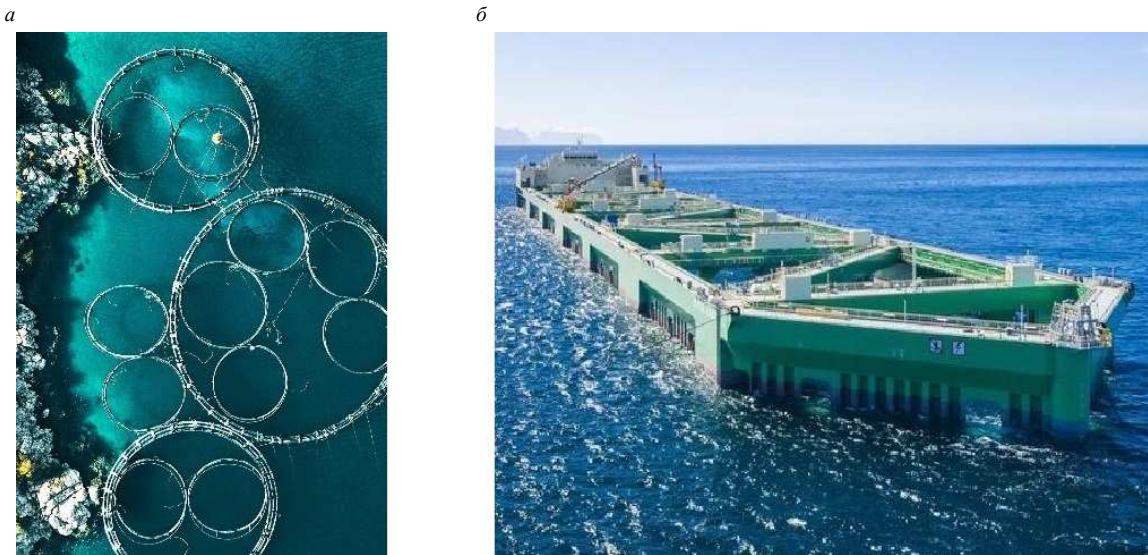


Рис. 2. Приспособления для производства рыбы и морепродуктов: а — прибрежные садки [2], б — оффшорная рыбоводная ферма

В связи с растущим спросом на высокие производственные показатели и экономически эффективную эксплуатацию рыбных хозяйств большинство пригодных прибрежных акваторий уже полностью освоены, и рыбные хозяйства садкового типа достигли максимума производительности [5]. Нынешняя практика прибрежного разведения рыбы привела к конфликтам с местными сообществами и природоохранными организациями [6]. Критика, высказываемая в адрес прибрежного рыбоводства, заключается в ухудшении состояния окружающей среды из-за загрязнения воды, шумового загрязнения и ухудшения эстетического облика прибрежных акваторий. Усилилась конкуренция за общее морское пространство в прибрежных районах не только между рыбными хозяйствами, но и с другими видами морской хозяйственной деятельности: судоходством, туризмом и охраной природы — из-за случаев негативного влияния выращиваемой рыбы на местную подводную фауну [7].

В качестве решения этих проблем и в ответ на давление со стороны регулирующих органов рыбоводческие компании начали осваивать морские участки [8]. Однако морская среда с характерными для нее более жесткими ветро-волновыми условиями, большими глубинами и удаленностью от береговых источников энергии значительно влияет на конструкцию рыбоводных ферм, требуя большего количества обслуживающего персонала, появления на них экипажа и специального оборудования, что делает ОРФ сходной с судном и оффшорной установкой. Целью данной статьи является анализ основных проблем, решаемых при проектировании ОРФ, имеющегося в настоящий момент мирового опыта проектирования этих сооружений и современной нормативной базы классификационных обществ (далее — КО), а также формирование перечня исходных требований на проектирование морских объектов этого типа.

1. ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОФШОРНЫХ РЫБОВОДНЫХ ФЕРМ

Основные условия, влияющие на использование офшорных рыбоводных ферм, можно разделить на несколько групп в соответствии с источником их возникновения: географические (глубина, расстояние от берега, состояние дна, течения), погодные условия (ветер, волнение), проблемы эксплуатации ОРФ (обеспечение благоприятной для роста аквакультуры среды, столкновение судов, проникновение морских животных, отсутствие инфраструктуры и обеспечивающего флота), технические факторы, связанные с отсутствием опыта проектирования и эксплуатации (отсутствие полноценной нормативной базы проектирования).

1.1. Глубина моря в месте установки ОРФ напрямую влияет на капитальные затраты на ее проектирование (разведка рельефа дна) и изготовление, а также техническое обслуживание (водолазные работы в случае выхода из строя рыбосодержащих садков или другого подводного оборудования). Длина якорных канатов для ОРФ в три-пять раз превышает глубину в месте установки, что негативно влияет на затраты на якорную и швартовую системы. Большая глубина может негативно сказываться на производительности установки, так как скорость роста рыбы зависит от температуры, освещенности воды и степени насыщения ее кислородом. При этом исследователи [1] отмечают и положительные особенности: большая глубина позволяет создавать садки для выращивания рыбы более крупного размера, а очищение объемов с рыбой от продуктов ее жизнедеятельности происходит эффективнее.

1.2. Расстояние от берега. Офшорная ферма для разведения морепродуктов — это один из звеньев в цепочке организации выращивания рыбной продукции. Например, для лосося эта цепочка представляет разведение мальков (смолта) на специальных смолтовых заводах на суше, доставку их в садки для дальнейшего выращивания, затем обратную доставку продукции для переработки и реализации (рис. 3). Таким образом, увеличение расстояния от берега негативно сказывается на всех логистических составляющих этого процесса.



Рис. 3. Цепочка производства рыбы и морепродуктов [9]

1.3. Состояние дна в месте установки ОРФ значительным образом влияет на якорную систему ОРФ. Необходим детальный анализ морского дна для определения подходящего метода якорения. Например, традиционное якорное закрепление (рис. 4а) или мертвое якорение (рис. 4б) подходит для участков морского дна с достаточно глубоким слоем осадочных отложений. Если морское дно каменистое, лучшим методом удержания ОРФ является якорение бурением при помощи анкерных свай.

1.4. Течение. Хотя течение необходимо для выращивания рыбы в садках для восполнения насыщенной кислородом воды и удаления органических отходов, слишком быстрые течения могут привести к пагубному воздействию как на конструкцию ОРФ, так и на продукцию. Максимальные нагрузки на сети в большинстве случаев вызваны течением, а не волнами. В случае садка, образованного гибкими кольцевыми ограждениями (сетями), горизонтальное сопротивление, создаваемое течением, может значительно уменьшить его внутренний объем. Исследователи [10] провели экспериментальные испытания и наблюдали значительное уменьшение объема садка с увеличением скорости течения, как показано на рис. 5.

В ходе экспериментов уменьшение объема садка для рыбы составило до 30 % при скорости течения более 0,6 м/с. Более того, при чрезмерном течении рыба может тратить слишком много энергии на плавание, а также страдать от потерь корма. На практике скорости течения в диапазоне от 0,1 м/с до 0,6 м/с были признаны удовлетворительными для разведения лососевых рыб.

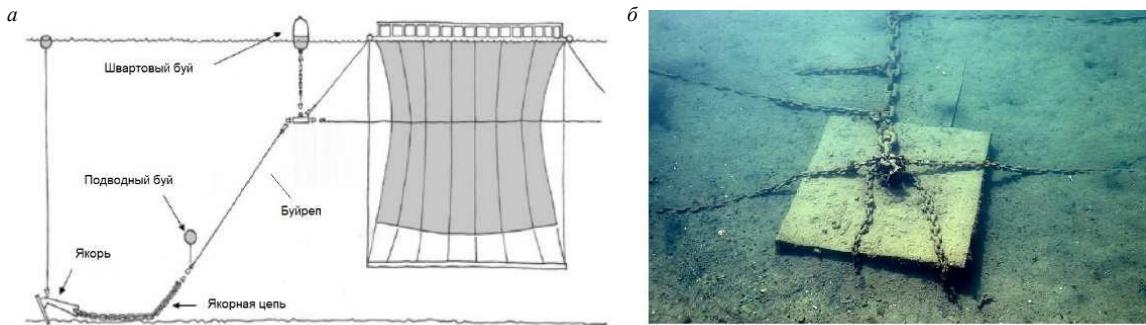


Рис. 4. Варианты якорения ОРФ: а — традиционная якорная система с швартовым буем, буйрепом и якорем Холла; б — при помощи мертвого якоря

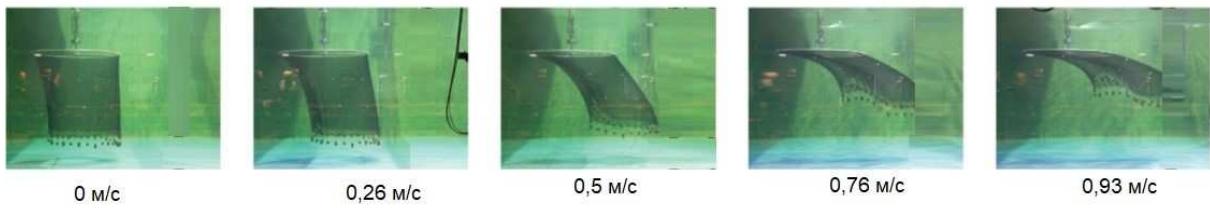


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования влияния скорости течения на форму садка для разведения рыбы [10]

1.5. Волнение. Величина интенсивности волнения на выбранной акватории оказывает сильное влияние на выращиваемые виды рыб. На те виды, естественная среда обитания которых находится в защищенных от волнения местах, сильное волнение действует пагубно. Хотя рыба может погружаться на большие глубины, где волнение менее заметно, она все же предпочитает находиться вблизи поверхности воды, чтобы получать солнечный свет, кислород, более низкое гидростатическое давление воды, питательные вещества/планктон и поверхностный воздух, которые необходимы рыбам с плавательным пузырем. Более того, чрезмерное волнение может повредить конструкцию ОРФ. Современные концепции борьбы с излишним волнобразованием сводятся к созданию гибкой конструкции внутри ОРФ (кольцевого барьера) [11], которая перемещается вместе с волнами и частично гасит их энергию; погружению частей или всей конструкции под воду целиком; изменению состояния окружающей среды за счет использования плавучих барьеров/волнорезов или укрепления конструкции, чтобы противостоять действию волн (рис. 6).

1.6. Столкновение судов. Крупные ОРФ подвержены столкновению с судами, в том числе вспомогательными (рис. 7а). Инциденты, связанные с навалом судов на ОРФ, могут привести не только к повреждениям, но и к массовой потере рыбы, которая может поставить под угрозу биологическую безопасность и прибыльность бизнеса. Для защиты рыбоводных хозяйств от подобных столкновений судов используются швартовые буи для вспомогательных судов, а также системы динамического позиционирования на самих судах.

1.7. Проникновение морских животных. ОРФ должны быть спроектированы таким образом, чтобы избегать проникновения морских млекопитающих, акул и других морских хищников (рис. 7б). Данная проблема актуальна для ОРФ с гибкими (сетчатыми) ограждениями, поэтому применяются акустические системы отпугивания, более прочные материалы сети, а также садки с двойными или тройными сетями.

1.8. Отсутствие инфраструктуры и обеспечивающего флота. Несмотря на то, что в настоящий момент уже реализованы новые конструкции рыбных загонов, предназначенные для работы в оффшорных зонах (рис. 8 — 11), мировой флот судов для оффшорного рыбоводства пока недостаточен ни по количеству, ни по своим характеристикам. При этом в настоящий момент не существует международного кодекса практики для судов аквакультуры, работающих в оффшорных зонах. Несмотря на то, что работа судов обеспечивающего ОРФ флота схожа с условиями работы судов, обеспечивающих установку и обслуживание ветрогенераторов [14] с характерными для них требованиями к экологичности энергетической установки, в силу особенностей доставляемых грузов (малька, корма и/или взрослых особей) использование существующих на рынке судов в зонах контроля выбросов сопряжено с затратами на оплату выбросов, что требует постройки новых судов, использующих топливо с низким углеродным следом WtW, например биотопливо, или полностью электрическую энергетическую установку [15].

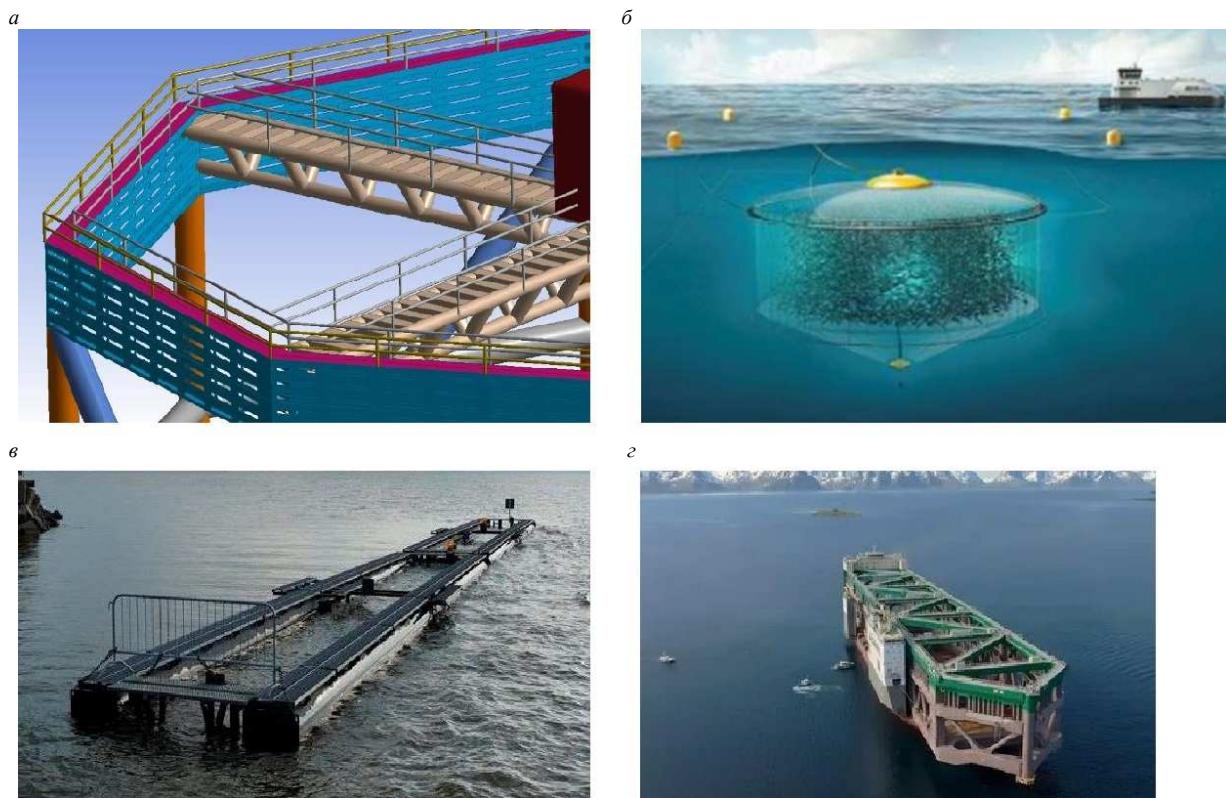


Рис. 6. Методы борьбы с пагубным воздействием волн: *а* — гибкая конструкция ОРФ — кольцевой барьер; *б* — погружной (подводный) ОРФ Atlantis; *в* — плавучие волнорезы; *г* — конструкция ОРФ судового типа

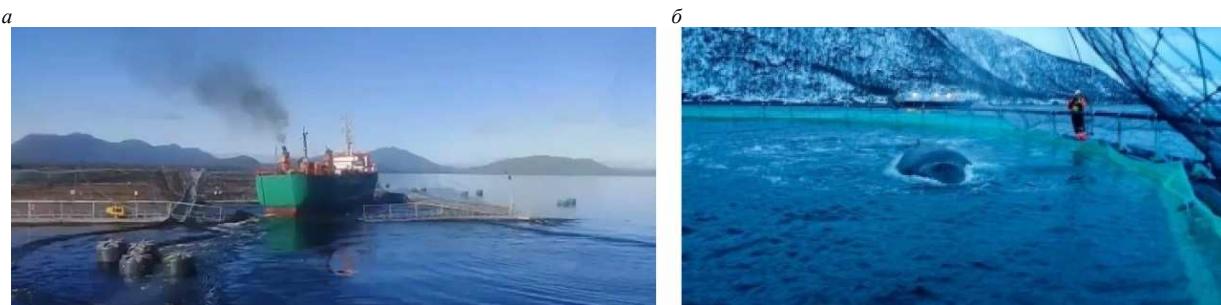


Рис. 7. Навал обеспечивающего судна на ОРФ в Чили в 2019 г. (а) [12]; проникновение кита в ОРФ (Норвегия) (б)

1.9. Отсутствие опыта проектирования и эксплуатации ОРФ сводится к отсутствию полноценной нормативной базы проектирования. В отличие от прибрежных конструкций, которые совершенствовались десятилетиями, большинство конструкций ОРФ разработаны недавно и находятся в стадии концептуальных проектов. По этой причине имеется мало данных об их долговечности, методах технического обслуживания и ремонта, а также о производительности и качестве получаемой продукции. Таким образом, существует много особенностей, связанных с новыми конструкциями ОРФ, в частности подводной конструкции. Рассмотрим их подробнее.

2. АНАЛИЗ ПРОЕКТОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОФШОРНЫХ РЫБОВОДНЫХ ФЕРМ

2.1. Модифицированные гибкие кольцевые садки состоят из плавающих труб, которые могут быть собраны различными способами для образования кольцеобразной формы. Самый известный пример — существующая ОРФ Tubenet (рис. 8а): здесь трубы удерживаются вместе с помощью ряда кронштейнов с опорами и распределены по всему периметру для поддержания рыболовной сети. Рыба выращивается на глубине от 14 м, что защищает ее от воздействия сильных волн. Кормушка расположена на глубине 13 м. Имеется система подачи воздуха в воду для насыщения им воды. Защита от птиц обеспечивается сеткой сверху. Диаметр внутреннего цилиндра равен 60 м, высота 14 м. Диаметр внешнего цилиндра равен примерно 120 м, а примерная высота составляет 28 м.

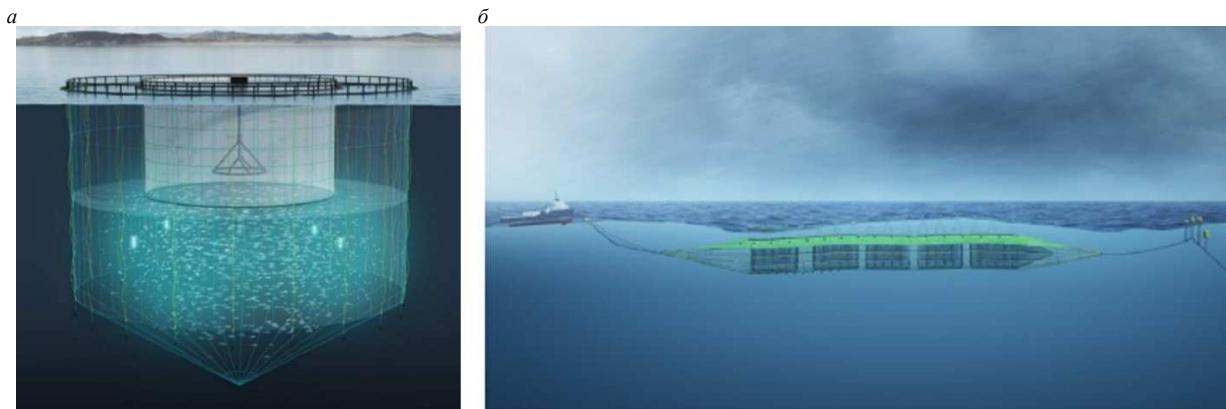


Рис. 8. ОРФ Tubenet (гибкий кольцевой садок) (а) [11]; ОРФ Giant Offshore (б)

Преимущества и недостатки модифицированных гибких кольцевых садков (рис. 8а) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Преимущества, недостатки и применение на ОРФ гибких кольцевых садков

№ п/п	Преимущества	Недостатки	Опыт применения
1	Высокая и продолжительная устойчивость к волновому воздействию (> 10 лет)	Проблемы уменьшения садка из-за деформации сети (рис. 5)	Могут переносить штормы со значительной высотой волны (~10 м)
2	Высокая устойчивость к износу, атмосферным воздействиям и биообрастанию	Проблемы перекручивания и поворота опор	Возможны модификации после установки
3	Могут иметь различное исполнение и относительно дешевы	Малая площадь и неустойчивость переходов для обслуживающего персонала	Малое количество эмпирических и теоретических данных о долговечности
4	Изготавливаются на суше и буксируются судами на место установки	Сложность с размещением системы питания из-за ограниченного пространства на ферме	

2.2. Погружные садки опускаются на расчетную глубину, которая считается безопасной с точки зрения волнения. Для технического обслуживания и сбора рыбы садки поднимаются на поверхность. Самые известные примеры проектов: ОРФ Atlantis (рис. 8а), Giant Offshore (рис. 9а), AquaPod, NSENGI fish pen (рис. 9б).

На погружной садок Atlantis (рис. 8а) диаметром 160 м корм доставляют с помощью судна снабжения. Погружной садок Giant Offshore, изготовленный из гибкого и прочного материала, имеет цилиндрическую форму конструкции с заостренными оконечностями, центральная часть которой оснащена пятью садками. Длина 500 м, центральная часть длиной 300 м и диаметром 40 м. Объем садков 290 000 м³.

Садок AquaPod (рис. 9а) сферической формы диаметром 21 м расположен в 13 км от берега, на глубине 45 м и выдерживает волны высотой до 10 м. Конструкция изготовлена из переработанного полиэтилена с армированным стекловолокном. Считается, что он полностью защищен от хищников и утечки рыбы.

Садок NSENGI fish pen (рис. 9б) Рыбоводная ферма обслуживается самоподъемной платформой, на которой расположены оборудование и хранилище для корма. Располагается в 3 км от берега на глубине 60 м и рассчитан для работы в условиях волн от 7 до 9 м. Объем каждого загона составляет 50 000 м³.

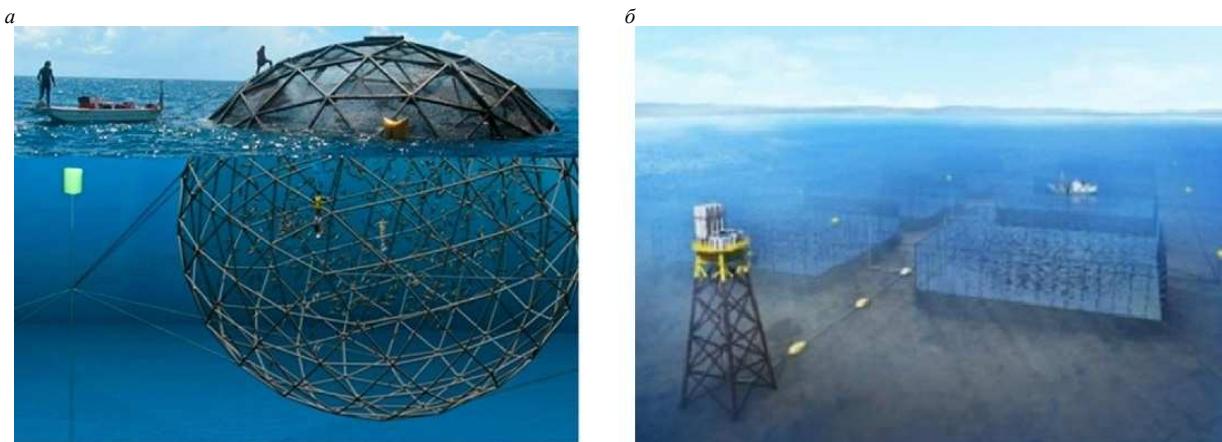


Рис. 9. Погружной садок AquaPod (гибкий кольцевой садок) (а) [11]; ОРФ NSENGI fish pen (б)

Преимущества и недостатки погружных садков представлены в табл. 2.

Таблица 2

Преимущества и недостатки ОРФ на основе погружных садков

№ п/п	Преимущества	Недостатки
1	Могут управляться дистанционно	Трудно обнаруживаемы судами (не видны)
2	Хорошо защищены от непогоды	Сложны в эксплуатации
3	Прочность конструкции может быть ниже, чем у надводных ОРФ	Могут быть дороже в эксплуатации, чем другие виды садков

2.3. Системы с открытыми садками — наиболее распространенные и, несмотря на большие габариты, легкие конструкции. Они обладают значительным коэффициентом демпфирования, благодаря чему имеют преимущества перед другими видами конструкций, так как вибрации гасятся более эффективно. Конструкции бывают гибкого (деформированного) типа и жесткого (прочного) типа, который чаще всего используется для обеспечения работоспособности садка на сильном волнении и течении при сохранении его достаточного объема. Самые известные примеры проектов и эксплуатирующихся ОРФ (рис. 10): Ocean Farm 1, Smart Fish Farm, Havfarm 1, Zhenyu 1, Viewpoint Seafarm, Spider cage, De Mass SSFF150 pen, Impact-9 submersible salmon pen.

Открытая ОРФ Ocean Farm 1 конструктивно схожа с плавучей оффшорной платформой (добычной, разведывательной), способной работать на глубинах от 100 до 300 м, состоит из pontонов, рамы и швартовых систем. Подходит для работы даже в арктических условиях. Высота 68 м, осадка 43 м, диаметр 110 м, объем 250 000 м³.

Открытая ОРФ Smart Fish Farm представляет собой модифицированную версию Ocean Farm 1, которая считается передовым производственным объектом. Ее производительность в два раза выше, чем у Ocean Farm 1, благодаря не только большим размерам, но и высокой степени автоматизации. Диаметр 160 м, высота 70 м.

Открытая ОРФ Havfarm 1 представляет собой самую длинную рыбоводную ферму в мире, она состоит из стального каркаса и шести загонов, изготовленных из полиэтилена высокой прочности. Способна выдержать высоту волны более 10 м. Подача электроэнергии с берега происходит с помощью подводного кабеля длиной 7 км. Судно имеет одноточечную систему швартовки, чтобы ОРФ могла вращаться вокруг всей оси под действием сил ветра, волнения и течений. Длина Havfarm 1 составляет 385 м, ширина 59,5 м, осадка 37,75 м (эксплуатационная 30,7 м).

Zhenyu 1 состоит из плавучего корпуса, в котором заключен веретенообразный каркас и механизм для его вращения. Вращение необходимо для того, чтобы бороться с биообрастанием. Для подачи энергии используется ветряная турбина.

Viewpoint Seafarm состоит из полупогружной платформы и четырех плавучих сетчатых садков, соединенных шарнирной системой, способной выдерживать высоту волны 11 м.

Spider cage оснащена специальным кольцевым ограждением, которое предназначено для защиты загона от тяжелых морских условий. Может выдерживать высоту волны 11 м. Производит 3400 т рыбы в год. Диаметр ограждения 100 м. Объем 100 000 м³.

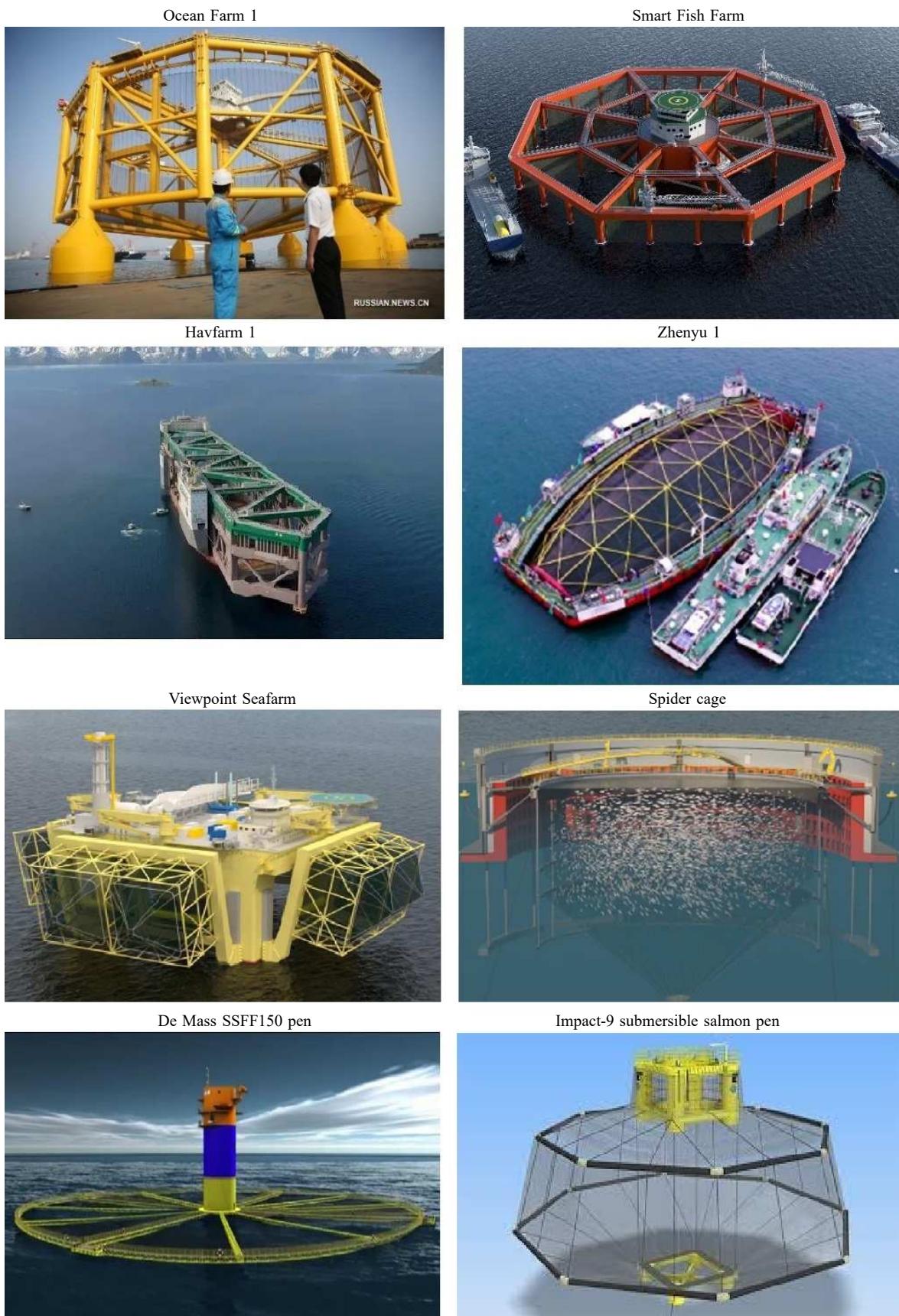


Рис. 10. Системы с открытыми садками

De Mass SSFF150 реп защищена от штормов благодаря погружению в воду. В центральной башне размещаются машинные помещения, хранилище кормов и жилые помещения для операторов. Диаметр 139 м, высота 12 м.

Impact-9 submersible salmon rep может выдерживать штормы из-за инновационной гибкой конструкции и эксплуатироваться на глубинах выше 60 м. Производительность 3000 т лосося в год. Прочная центральная конструкция является безопасным местом работы и хранилищем для кормов и хозяйственного оборудования. Сети у основания оснащены надувными воротниками (для гибкости системы и избегания коррозии). Может эксплуатироваться в ледовых условиях.

Преимущества и недостатки открытых садков (рис. 10) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Преимущества и недостатки ОРФ на основе открытых садков

№ п/п	Преимущества	Недостатки
1	Стабильная работа	Необходимость в громоздких и тяжелых конструкциях
2	Потенциал для автоматизации кормления и сбора готовой рыбы	Требует дорогостоящей буксировки на место эксплуатации
3	Строительство и ремонт объектов может быть выполнен на верфях	Конструкция может разрушиться в экстремальных условиях
4	Относительно небольшие вертикальные колебания (перемещения) из-за большой массы	Требует высоких капитальных затрат

2.4. Системы с закрытыми садками представляют собой водоизмещающие суда с металлическим или бетонным корпусом, плавучесть которых обеспечивается достаточным надводным бортом, запасом водоизмещения и остойчивости. Внутри корпуса организованы садки, вода в которых поступает извне: фильтрация и насыщение воды кислородом происходит на борту судна. Также может использоваться система очистки балластных вод. Чаще всего эти фермы используются в благоприятных водах, преимущественно у побережья. Чтобы использовать их в открытом море с более сильными волнами и течениями, необходимо учитывать влияние сплошинга воды в садках на остойчивость и прочность конструкции. Самые известные примеры проектов и эксплуатирующихся ОРФ (рис. 11): Fish farm egg, Neptun, Salmon Home 1, Eco-Ark, Marine Donut, Stadion Laks, Preline, FishGLOBE.

Закрытая ОРФ Fish farm egg представляет полностью закрытую конструкцию овальной формы. Воду забирают на глубине 17 м и более и выводят на глубину 3 — 6 м, создавая циркуляцию и постоянный уровень кислорода. Лишь 10 % высоты конструкции находится выше поверхности воды.

Резервуар ОРФ Neptun изготовлен из полимерных материалов, армированных стекловолокном, и оснащен входными и выходными отверстиями для циркуляции воды. Рассчитан на скорость ветра 30 м/с и течение до 1 м/с. Расчетный срок службы 25 лет. Внутренний диаметр 40 м, высота 22 м, объем 21 000 м³.

Резервуар ОРФ Salmon Home 1 имеет форму цилиндра и изготовлен из бетона. Уровень кислорода в воде поддерживается автоматически. Внутренний диаметр 14,8 м, внешний диаметр 16,5 м, высота 6 м, объем 1000 м³.

Резервуар ОРФ Eco-Ark состоит из четырех резервуаров, может производить до 166 т рыбы в год. Спроектирован для работы при скорости ветра 15 м/с, высоте волн 0,5 м, скорости течения 1,2 м/с, глубине 10 м. Длина 25 м, вес 5300 т.

Marine Donut представляет собой закольцованный трубу из полиэтилена высокой плотности. Конструкция должна выдерживать волну высотой 3 м. Вода поступает через шесть впускных патрубков и непрерывно циркулирует внутри.

Stadion Laks представляет собой резервуар, изготовленный из железобетона. Вода подается с глубины не менее 20 м. Объем 38 500 м³. Длина 117 м, ширина 39 м.

FishGLOBE имеет цилиндрическую форму. Впускные и выпускные патрубки вместе с цилиндром образуют жесткую конструкцию. Установка выдерживает волны высотой до 2,5 м и течение до 1 м/с. Высота 35 м, объем 30 000 м³.

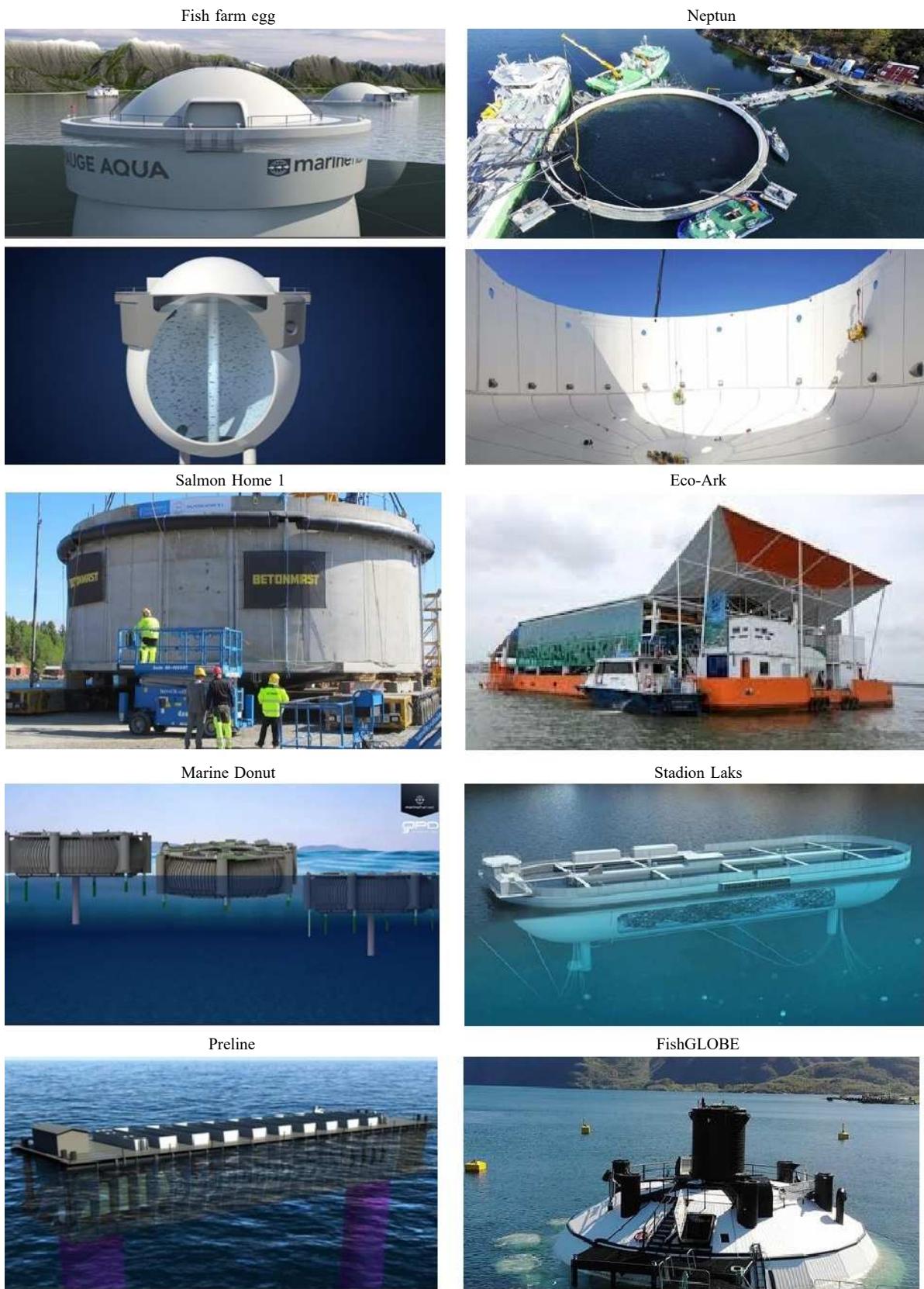


Рис. 11. Системы с закрытыми садками

Преимущества и недостатки закрытых садков (рис. 11) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Преимущества и недостатки ОРФ на основе закрытых садков		
№ п/п	Преимущества	Недостатки
1	Есть контроль качества воды в садках, поэтому вода может быть постоянно дезинфицирована для очищения патогенных микроорганизмов	Требуется система обеспечения электроэнергией для расположения на морских участках
2	Внешние воздействия, такие как цветение водорослей, больше не являются проблемой	Требуются значительные затраты для постройки и оборудования
3	Органические отходы могут быть удалены с помощью биофильтрационной системы перед сбросом воды обратно в море	Предъявляются более строгие требования к управлению, мониторингу и постороннему вмешательству
4	Полностью устраняется угроза хищников (акулы, тюлени и т.д.)	
5	Достигается более высокий уровень производства, чем у системы с открытыми сетями	

3. НОРМАТИВНАЯ БАЗА СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОФШОРНЫХ РЫБОВОДНЫХ ФЕРМ

Определение термина «оффшорный» может принимать различную форму в зависимости от заинтересованной стороны — судовладельца, законодателя, представителя классификационного общества, государственного служащего или исследователя. Для рыбопроизводителя «оффшорный» означает сочетание нескольких параметров, включающих погодные условия, батиметрию дна, удаленность от берега, используемые на ОРФ технологии (например, обеспечивающие автоматизацию всех или нескольких процессов выращивания). Некоторые зарубежные исследователи вкладывают в термин «оффшорный» значения «незащищенный» (exposed), «удаленный» (remote) и «энергетически нагруженный» (high energy), что характеризует основные особенности этих объектов [16].

В исследовании [17] определены следующие типы рыбоводческих хозяйств (табл. 5) и их основные страны-производители.

Таблица 5

Типы рыбоводческих хозяйств			
Параметр	Наземные	Прибрежные	Морские
Местонахождение	<500 м от берега <10 м глубина	от 500 м до 3 км от берега глубина от 10 м до 50 м	>3 км от берега >50 м глубина Континентальный шельф
Внешние условия	Высота волны <1 м Прибрежные ветры Прибрежное волнение Сильные приливно-отливные течения	Высота волны от 3 до 4 м Прибрежные ветры Местное волнение Слабые приливно-отливные течения	Высота волны до 5 м Океанские ветры Морское волнение Приливно-отливные течения отсутствуют
Акватория (воды)	Национальные	Национальные	Национальные/международные
Производители	КНР, Чили, Норвегия	Чили, Норвегия	США, Испания (Канарские о-ва)

На основе исследования [17] авторы [1] предлагают определение: ОРФ — это объект, спроектированный и построенный таким образом, чтобы его можно было безопасно и эффективно эксплуатировать в следующих условиях:

- на расстоянии не менее 3 км мористее береговой линии, но в пределах государственной исключительной экономической зоны (до 370,4 км);
- на глубине, равной или превышающей 50 м;
- при скорости течения от 0,1 м/с до 1 м/с;
- при высоте волн, превышающей 3 м.

Классификационные общества (КО), в свою очередь, подразделяют такие объекты по конструктивному типу и обитаемости (ABS) или только по конструктивному типу (DNV, BV). Например, ABS в своих правилах [18] вводит в символе класса нотацию «обитаемая/необитаемая» (manned/unmanned), а также разделяет ОРФ по ее архитектурно-конструктивному типу: сетчатого типа (spar-type), колонного типа (column-stabilized type), судового типа (ship shape) и неплавучего типа (un-buoyant).

В правилах DNV [19] содержатся определения архитектурно-конструктивного типа: с большой осадкой (deep draught type), колонного (column-stabilized type), судового (ship shaped type), самоподъемного (self-elevating type) и цилиндрического (cylindrical type).

В правилах BV [20] и [21] ОРФ классифицируются как баржа (barge or converted ship), понтон (rigid pontoon), погружная клеть (submersible cage unit), сочлененная установка (articulated unit), водонепроницаемый понтон (watertight cage unit), установка с опорой на дно (bottom-resting unit), гибкий садок (flexible cage unit), модифицируемый гибкий садок (modifiable cage unit) и балластируемая установка (ballastable unit). Подобное разнообразие словесных характеристик может быть объяснено значительным количеством существующих проектов ОРФ, создаваемых одновременно под воздействием многих внешних факторов, в первую очередь видом выращиваемой аквакультуры и особенностями места размещения ОРФ.

В результате существующие ОРФ сильно отличаются друг от друга, а значительные отличия во внешних условиях (ветро-волновых, температурных, глубине моря в месте размещения установки) не позволяют сконцентрировать весь опыт проектирования в одном руководстве. Тем не менее исследователи [22] проанализировали имеющиеся правила КО в части требований к ОРФ и определили степень охвата Правилами различных типов ОРФ (рис. 12).



Рис. 12. Степень охвата правил различных КО к системам с закрытыми садками

Освидетельствование плавучих рыбоводческих ферм КО является добровольным, однако компании зачастую запрашивают одобрения проекта у КО для того, чтобы заручиться поддержкой у страховщиков, контрагентов и потребителей.

К настоящему времени Det Norske Veritas (DNV), American Bureau of Shipping (ABS) и Bureau Veritas (BV) ввели собственные правила сертификации и услуги освидетельствования морских рыбоводных ферм (установок).

1. ABS, Руководство по постройке и классификации объектов аквакультуры (Guide for building and classing, aquaculture installations) [18].

2. ABS-FPI, Правила постройки и классификации плавучих производственных установок (Rules for building and classing, floating production installations) [23].

3. ABS-OI, Правила постройки и классификации сооружений на морских установках (Rules for building and classing, facilities on offshore installations) [24].

4. ABS, Якорные системы удержания (Position mooring systems) [25].

5. DNV-RU-OU-0503, Правила классификации оффшорных рыбоводных установок и агрегатов (Rules for classification, offshore fish farming units and installations) [26].

6. DNV-ST-C502, Оффшорные бетонные конструкции (Offshore concrete structures) [27].

7. DNV-OTG-24, Защита от утечки рыбы с морских рыбоводных ферм (Fish escape prevention from marine fish farms) [28].

8. DNV-OS-C101, Проектирование оффшорных стальных конструкций, общие положения (Design of offshore steel structures, general) [29].

9. DNV-OS-C102, Морской стандарт для конструктивного проектирования морских судов (Offshore standard for structural design of offshore ships) [30].

10. DNV-OS-C103, Конструктивное проектирование узлов, стабилизованных на колонне (Structural design of column stabilised units) [31].

11. DNV-OS-C106, Конструктивное проектирование плавучих установок с большой осадкой (Structural design of deep draught floating units) [32].

12. DNV-OS-C201, Морской стандарт для проектирования конструкций оффшорных объектов (Offshore standard for structure design of offshore units) [33].

13. DNV-RP-C205, Условия окружающей среды и внешние нагрузки (Environmental conditions and environmental loads) [34].

14. DNV-RP-F205, Глобальный анализ эксплуатационных характеристик глубоководных плавучих сооружений (Global performance analysis of deepwater floating structures) [35].

15. DNV-OS-E301, Морской стандарт для позиционной швартовки (Offshore standard for position mooring) [36].

Что касается BV, основными правилами являются Правила классификации и сертификации рыбоводных ферм (Rules for classification and certification of fish farms) [37], которые действуют для установок в прибрежных водах. В случае если рыбоводческое хозяйство находится в суровых погодных условиях, применяются следующие правила:

1) Правила и положения классификации стальных судов — применимы к рыбоводным хозяйствам в форме судов (Rules and regulations for the classification of steel ships) [38];

2) Правила классификации оффшорных объектов — применимы к полупогруженным рыбоводным хозяйствам или рыбоводным фермам, использующим методы морского промысла (Rules for the classification of offshore units) [39].

В работе [22] показано, что основными критериями проектирования морских загонов для рыбы являются расчетный срок службы, расчетные нагрузки от волн, течения и ветра, комбинация внешних нагрузок для проектирования плавучих средств, сетей и опорных систем, а также систем швартовки. Анализ и оценка эффективности ОРФ сводится к выполнению гидростатического анализа, гидродинамического (в частотной и временной областях), анализа системы швартовки.

В части расчетного срока службы КО, имеющие правила по проектированию ОРФ, сходятся во мнении, что для стальных ОРФ должны предъявляться требования, аналогичные назначению срока службы морским судам со стальным корпусом в части назначения толщин и надбавок на коррозию. В правилах ABS и DNV минимальный срок службы назначается равным 20 годам.

Правила ABS распространяются лишь на некоторые элементы ОРФ, такие как корпус, якорная система, фундаменты, механизмы, системы, которые не относятся к системам аквакультуры. При этом правила не распространяются на садки из полимеров, бетона и прочих подобных материалов, а также на оборудование для кормления и производства рыбы, хранения сырья и устройства для защиты от утечки рыбы. Аналогично правило DNV-RU-OU-0503 учитывает требования к корпусу с надстройкой, фундамент кранового оборудования, крепление вертолетной площадки и пр. В правилах ABS и DNV указано, что элементы ферм,

на которые не распространяются правила, должны оцениваться в соответствии с юрисдикцией местных органов (в России таким органом является Федеральное агентство по рыболовству). Правила классификации в основном охватывают конструкции из стали или металлических материалов, а сети не учитываются в правилах, за исключением случая, когда существует опасность, связанная со значительными техногенными нагрузками на конструкцию рыболовного хозяйства.

Чтобы охватить те элементы ОРФ, которые не подпадают под перечисленные требования, существуют следующие национальные и международные стандарты:

1) Норвежский стандарт NS 9415, Требования к морским рыболовным хозяйствам при проектировании, определении размеров, производстве, монтаже и эксплуатации (Marine fish farms requirements for design, dimensioning, production, installation, and operation), включая Норвежский стандарт NS 3472 Металлические конструкции — Правила проектирования (Steel structures — Design rules) [40];

2) Технический стандарт для шотландской аквакультуры (A technical standard for Scottish finfish aquaculture) [41];

3) Стандарт ISO 16488:2015. Морские рыболовные фермы — открытый сетчатый садок и его эксплуатация (Marine finfish farms—open net cage-design and operation) [42].

В России в настоящий момент не разработаны аналогичные правила и стандарты. Единственный документ, который регулирует аквакультуру, это Федеральный закон от 02.07.2013 N 148-ФЗ (ред. от 25.12.2023) «Об аквакультуре (рыбоводстве) и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [43]. Его целью является обеспечение производства рыбы и иной продукции аквакультуры, сохранение водных биологических ресурсов.

С учетом перечисленных особенностей ОРФ и необходимости их строительства таким образом, чтобы конструкция, оборудование и системы работали надежно, необходимо учитывать эксплуатационные параметры, включая природные особенности окружающей среды в местах предполагаемой эксплуатации ОРФ, оценивать возможность столкновения с судном, защищать аквакультуру от внедрения морских животных, обращать внимание на наличие инфраструктуры для офшорного рыболовства, а также минимизировать влияние на морскую экологию. С учетом того, что в настоящее время существуют неопределенности в связи с недостаточным опытом проектирования и эксплуатации ОРФ в мировом масштабе, при разработке отечественных проектов ОРФ целесообразно проводить анализ рисков для выявления опасностей и снижения вероятности возникновения аварийных происшествий, а также уже на этапе предпроектных изысканий проводить консультации со специалистами КО, в случае строительства ОРФ под его техническим наблюдением, для согласования перечня нормативных документов и технических требований, которым должен отвечать проектируемый объект.

ВЫВОДЫ

В настоящей статье приведены и проанализированы проекты офшорных ферм для рыболовства, краткие сведения об офшорной аквакультуре, преимущества и недостатки данного способа производства морепродуктов.

В работе рассмотрена нормативная база классификационных обществ по созданию и эксплуатации офшорных рыболовных ферм. Отмечается, что объем наблюдения КО не охватывает многие элементы ОРФ, в работоспособности которых в течение всего срока службы установлены оператор и страховая компания. Для решения этой проблемы в части таких элементов, как оборудование для аквакультуры (кормления, переработки), сети, не применяемые в судостроении материалы корпуса (полимерные материалы), КО ориентируются на применимые действующие национальные и международные стандарты. Такая практика обусловлена широким разнообразием созданных в настоящий момент ОРФ, разительно отличающихся исполнением многих элементов, что, в свою очередь, обусловлено различными условиями эксплуатации ОРФ: глубинами в месте установки, расстоянием от берега, состоянием и качеством дна, силой и регулярностью течений и волнения. Это приводит к отсутствию единой базы проектирования ОРФ, однако в качестве основных его критерии необходимо выделить расчетный срок службы, расчетные нагрузки от волн, течения и ветра и их комбинации, влияющие на особенности проектирования плавучих средств, сетей и опорных систем, а также систем якорения и швартовки.

Несмотря на то, что в России существуют достаточно крупные рыболовные фермы в Мурманской области и Карелии (выращивание форели и семги в садках) и переоборудованная плавучая мастерская во Владивостоке для выращивания морепродуктов, наличие этих примеров не позволяет сделать вывод о высоком уровне развития отечественной офшорной аквакультуры на данном этапе. Однако с учетом

тенденции к увеличению объемов выращиваемой аквакультуры при разработке и внедрении новых типов сооружений рыбоводства целесообразно учитывать международные практики и привлекать экспертов классификационных обществ к оценке проектов установок для разведения рыбы и морепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Wang C.M. Offshore fish farming: Challenges and developments in fish pen designs / C.M. Wang, Yu. Chu, J. Baumeister, H. Zhang, D.S. Jeng, N. Abdussamie // Global Blue Economy. — Boca Raton: CRC Press, 2022. — P. 87 — 128. — DOI 10.1201/9781003184287-4.
2. ФАО. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры — 2024. «Голубая трансформация» в действии. — Рим, 2024. — DOI 10.4060/cd0683ru. = FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 — Blue Transformation in action. Rome, 2024. DOI 10.4060/cd0683en.
3. Марикультура. [Электронный ресурс] URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Марикультура> (дата обращения 07.07.2025). = Mariculture. URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Марикультура> (accessed 07.07.2025). (In Russ.)
4. DNV Marine Aquaculture Forecast: Oceans' Future to 2050. — Høvik, Norway, 2021.
5. Stickney R.R. Impacts of cage and net-pen culture on water quality and benthic communities / R.R. Stickney // Aquaculture and the Environment in the United States. — U.S. Aquaculture Society: St Amant, LA, 2002. — P. 105 — 118.
6. Tidwell J.H. Aquaculture production systems / J.H. Tidwell. — Oxford: Wiley-Blackwell, 2012.
7. Verhoeven J.T.P. Temporal bacterial surveillance of salmon aquaculture sites indicates a long lasting benthic impact with minimal recovery / J.T.P. Verhoeven, F. Salvo, R. Knight, D. Hamoutene, S.C. Dufour // Frontiers in Microbiology. — 2018. — No. 9. — P. 3054.
8. Bjelland H.V. 2016. Exposed aquaculture in Norway / H.V. Bjelland, M. Fore, P. Lader, D. Kristiansen et al. // Oceans 2015 — MTS/IEEE Washington. — P. 1 — 10.
9. «Русская аквакультура» INARCTICA. Попробуй Арктику на вкус (Ч. 1). [Электронный ресурс] URL: <https://smart-lab.ru/blog/850673.php?nomobile=1> (дата обращения 07.07.2025). = Russian aquaculture. INARCTICA. Taste the Arctic (Pt. 1). URL: <https://smart-lab.ru/blog/850673.php?nomobile=1> (accessed 07.07.2025). (In Russ.)
10. Moe-Føre H. Structural response of high solidity net cage models in uniform flow / H. Moe-Føre, P.F. Lader, E. Lien, O.S. Hopperstad // Journal of Fluids and Structures. — 2016. — Vol. 65. — P. 180 — 195.
11. Chu Y.I. Design development of porous collar barrier for offshore floating fish cage against wave action, debris and predators / Y.I. Chu, C.M. Wang // Aquacultural Engineering. — 2020. — Vol. 92. — P. 102137.
12. Sernapesca y Transmarko activan protocolos de acción por accidente en centro. 23.05.2019. [Электронный ресурс] URL: <https://www.salmonexpert.cl/investigacion/sernapesca-y-transmarko-activan-protocolos-de-accion-por-accidente-en-centro/1368003> (дата обращения 07.07.2025).
13. Knølhval i merd. 03.05.2019. [Электронный ресурс] URL: <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Erfaringsbase/Knoelhval-i-merd> (дата обращения 07.07.2025).
14. Реуцкий А.С. Суда для постройки и обслуживания морских ветроэлектростанций / А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 112 — 123. — EDN SDGAXN. = Reutskii A.S. Ships for construction and maintenance of offshore wind farms. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 112 — 123. EDN SDGAXN. (In Russ.)
15. Реуцкий А.С. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А.С. Реуцкий, В.К. Шурпяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14 — 25. — EDN FBBBJV. = Reutskii A.S., Shurpyak V.K., Tolmachev S.A. Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 14 — 25. EDN FBBBJV. (In Russ.)
16. Morro B. Offshore aquaculture of finfish: Big expectations at sea / B. Morro, S.R. Planellas, K. Davidson, T.P. Adams et al. // Reviews in Aquaculture. — 2021. — Vol. 14, No. 2. — P. 791 — 815.
17. Holmer M. Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs / M. Holmer // Aquaculture Environment Interactions. — 2010. — Vol. 1. — P. 57 — 70. — DOI 10.3354/aei00007.
18. ABS. Guide for Building and Classing, Aquaculture Installations. — Houston, TX, USA, 2020.
19. DNV-RU-OU-0503. Floating Fish Farming Units and Installations. — Høvik, Norway, 2017.
20. BV. NR467. Rules and Regulations for the Classification of Steel Ships. — Neuilly-sur-Seine, France, 2022.
21. BV. NR445 Rules for the Classification of Offshore Units. — Neuilly-sur-Seine, France, 2019.
22. Chu Y.-I. Offshore fish farms: A review of standards and guidelines for design and analysis / Y.-I. Chu, C.-M. Wang, H. Zhang, N. Abdussamie et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11, Issue 4. — P. 762. — DOI 10.3390/jmse11040762.
23. ABS. Rules for Building and Classing, Floating Production Installations. — Houston, TX, USA, USA, 2021.
24. ABS. Guide for Building and Classing Facilities on Offshore Installations. — Houston, TX, USA, 2014.
25. ABS. Position Mooring System. — Houston, TX, USA, 2020.
26. DNV-RU-OU-0503. Offshore Fish Farming Units and Installations. — Høvik, Norway, 2017.
27. DNV-ST-C502. Offshore Concrete Structures. — Høvik, Norway, 2018.
28. DNV-OTG-24. Fish Escape Prevention from Marine Fish Farms. — Høvik, Norway, 2020.
29. DNV-OS-C101. Design of Offshore Steel Structures, General — LRFD Method. — Høvik, Norway, 2015.
30. DNV-OS-C102. Offshore Standard for Structural Design of Offshore Ships. — Høvik, Norway, 2015.
31. DNV-OS-C103. Structural Design of Column Stabilised Units (LRFD Method). — Høvik, Norway, 2018.
32. DNV-OS-C106. Structural Design of Deep Draught Floating Units (LRFD Method). — Høvik, Norway, 2015.
33. DNV-OS-C201. Structural Design of Offshore Units (WSD Method). — Høvik, Norway, 2017.
34. DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads. — Høvik, Norway, 2010.
35. DNV-RP-F205. Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures. — Høvik, Norway, 2010.
36. DNV-OS-E301. Offshore Standard: Position Mooring. — Høvik, Norway, 2015.

37. BV. Rules for Classification and Certification of Fish Farms. — Neuilly-sur-Seine, France, 1994.
38. BV. NR467. Rules and Regulations for the Classification of Steel Ships. — Neuilly-sur-Seine, France, 2022.
39. BV. NR445. Rules for the Classification of Offshore Units. — Neuilly-sur-Seine, France, 2019.
40. NS 9415. Marine Fish Farms. Requirements for Design, Dimensioning, Production, Installation and Operation. — Skøyen, Norway, 2009.
41. The Scottish Government. A Technical Standard for Scottish Finfish Aquaculture. — Edinburgh, UK, 2015.
42. ISO 16488:2015. Marine finfish farms — Open net cage — Design and operation.
43. Федеральный закон «Об аквакультуре (рыбоводстве) и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 02.07.2013 N 148-ФЗ (ред. от 25.12.2023). = Federal Law No. 148-FZ of July 2, 2013 ‘On Aquaculture (Fish Farming) and Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation’ (as amended on 25-12-2023).



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.076.3 + 656.073.437
EDN АОНYSK

АНАЛИЗ ФРАХТОВЫХ СТАВОК НА ПЕРЕВОЗКУ НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ В ПОРТАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ПЕРИОД С АПРЕЛЯ 2024 ПО АПРЕЛЬ 2025 ГОДА

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

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

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

Я.А. Сперанская, стажер, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: speranskaia.ia@rs-class.org

Целью представленного исследования являлся сбор и анализ размера фрахтовых ставок на перевозку различных навалочных грузов из портов РФ в период с апреля 2024 г. по апрель 2025 г. согласно имеющимся актуальным данным. Данная работа представляет интерес в качестве источника актуальной информации по затрагиваемому вопросу и позволяет сформировать объективную оценку сложившейся в настоящий момент ситуации на рынке фрахтовых ставок в портах Российской Федерации.

Ключевые слова: навалочные грузы, фрахтовая ставка, зерно, минеральные удобрения, сера, поташ, мочевина, уголь, чугун, металлопрокат, металломолом.

Для цитирования: Бабчук Е.В. Анализ фрахтовых ставок на перевозку навалочных грузов в портах Российской Федерации в период с апреля 2024 по апрель 2025 года / Е.В. Бабчук, А.О. Березин, А.С. Реуцкий, Я.А. Сперанская // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 21 — 31. — EDN АОНYSK.

ANALYSIS OF BULK CARGO FREIGHT RATES IN THE PORTS OF THE RUSSIAN FEDERATION IN THE PERIOD FROM APRIL 2024 TO APRIL 2025

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

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

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

Ya.A. Speranskaya, Intern, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: speranskaia.ia@rs-class.org

The purpose of the presented study was to collect and analyze the value of freight rates for the transportation of various bulk cargoes from ports of the Russian Federation in the period from April 2024 to April 2025 in accordance with the available up-to-date data. This work is of interest as a source of up-to-date information on the issue raised and allows us to form an objective assessment of the current situation on the market of freight rates in the ports of the Russian Federation.

Keywords: *bulk cargo, freight rate, grain, mineral fertilizers, sulfur, potash, urea, coal, cast iron, rolled metal, scrap metal.*

For citation: Babchuk E.V., Berezin A.O., Reutskii A.S., Speranskaya Ya.A. Analysis of bulk cargo freight rates in the ports of the Russian Federation in the period from April 2024 to April 2025. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 21 — 31. EDN AOHYSK. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Международные морские перевозки играют существенную роль в современной экономике и в жизни каждого человека. По статистике, около 80 % товаров, которые поставляются в магазины для продажи, доставлены морским транспортом или произведены из материалов, доставленных по морю [1]. Ключевым элементом системы международных морских перевозок является фрахтование судов, представляющее собой сложный и многозадачный процесс подбора транспортного судна для перевозки определенного груза. Иными словами, фрахт — это договор о найме судна фрахтователем для транспортировки партии одного или нескольких грузов одновременно. На практике встречается и обратная ситуация, когда владелец морского транспорта ищет груз для транспортировки, чтобы не совершать обратный переход в порожнем или частично загруженном состоянии (в балласте). Для обоих случаев применяется единый термин — «фрахтование». В процессе фрахтования принимают участие несколько сторон:

- фрахтователь — лицо, осуществляющее подбор судна для заключения договора фрахтования и его оплаты (грузоотправитель, продавец, покупатель, посредник);
- фрахтовщик — лицо, осуществляющее грузоперевозку и/или предоставляющее судно или его часть для грузоперевозки (грузоперевозчик, судоходная компания, судовладелец и т.д.);
- фрахтовый брокер — лицо, осуществляющее поиск, подбор судна и заключение фрахтового договора.

Как правило, это опытные специалисты, владеющие информацией о состоянии в мировой логистике, грузопотоках, количестве груза и судов в том или ином порту и т.д.

Ставка фрахта является составной единицей и складывается из нескольких компонентов:

- основная или базисная часть фрахта (включает расходы на погрузку, разгрузку, хранение и затраты на рейс);
- дополнительные платежи (портовые сборы, пошлины и т.д.);
- морские сборы и надбавки (в зависимости от особенностей перевозимого груза, условий транспортировки, маршрута следования).

1. ФРАХТОВЫЕ СТАВКИ НА ПЕРЕВОЗКУ ЗЕРНА ИЗ ПОРТОВ РФ СУДАМИ БАЛКЕРНОГО ФЛОТА РАЗЛИЧНЫХ ДЕДВЕЙТНЫХ ГРУПП

К основным факторам, влияющим на размер ставки фрахта, относятся: маршрут следования, портовые сборы, габариты и особенности перевозимого груза, надбавки, компенсирующие возможные неустойки судовладельца, и плата за другие услуги.

Маршрут следования. В случае если судно проходит через районы, где есть риск нападения пиратов или ведутся боевые действия, это соответствующим образом сказывается на фрахтовой ставке. В случае прохождения пролива Босфор, Суэцкого канала, Панамского канала и Аденского залива власти Турции, Египта, Панамы и Йемена взимают плату за использование этих транспортных путей.

Портовые сборы зависят от существующих в порту назначения особенностей работы и обычно носят соответствующее название: причальный, маячный, ледовый и т.д.

Надбавки:

- за «высокий сезон». Если договор фрахтования заключается в период пикового спроса на транспортные услуги, перевозчики включают в стоимость договора фрахтования соответствующую надбавку, в особенности это характерно для товаров, доставляемых из стран Азии;
- учитывая особенности груза (опасный, хрупкий, ценный);
- компенсирующие неустойки судовладельца (топливная, валютная, фрахтовый налог).

Другие возможные платы, отражаемые в договоре фрахта: очистка трюмов, оформление таможенных документов, обеспечение безопасности и т.д.

2. ФРАХТОВЫЕ СТАВКИ НА ПЕРЕВОЗКУ ЗЕРНА ИЗ ПОРТОВ РФ СУДАМИ БАЛКЕРНОГО ФЛОТА РАЗЛИЧНЫХ ДЕДВЕЙТНЫХ ГРУПП

За исследуемый период с апреля 2024 по апрель 2025 г. наблюдалось существенное уменьшение размера фрахтовых ставок на перевозку зерна, колебания составили 30 — 65 %. (рис. 1, 3 — 5). Исключением стало незначительное увеличение стоимости фрахтовых ставок (около 3 %) для перевозок зерна из порта Владивосток в направлении портов Китая (рис. 2). Стоит обратить внимание на скачок стоимости фрахта в период с октября по ноябрь 2024 г., который связан с сезонным сбором урожая и его активным экспортом [2], а также отсутствием должного предложения на рынке морских перевозок. В настоящий момент на рынке перевозок зерна наблюдается снижение фрахтовых ставок приблизительно на 40 % в сравнении с аналогичным месяцем предыдущего года. На конец рассматриваемого периода размер фрахтовой ставки находился в интервале 12 — 51,6 USD за тонну грузоподъемности.

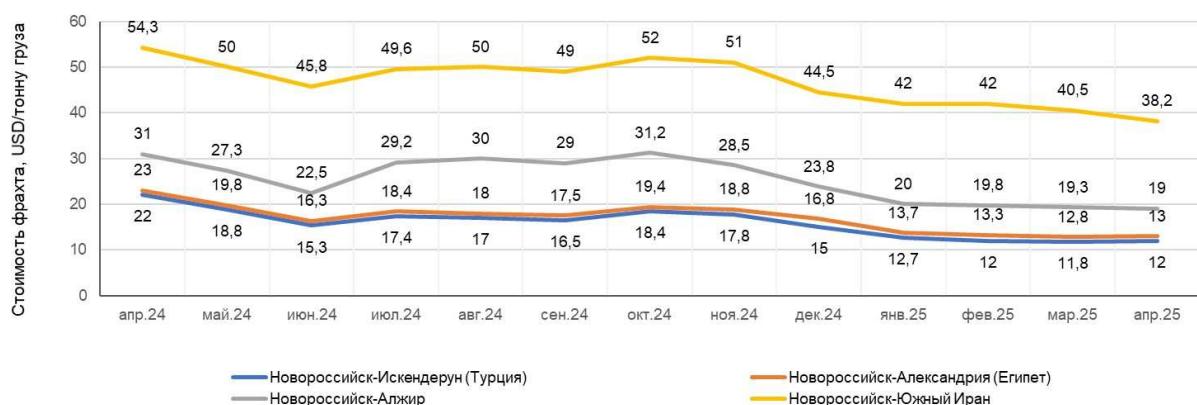


Рис. 1. Фрахтовые ставки на перевозку зерна из порта Новороссийск судами балкерного флота дедвейтной группы 30 — 35 тыс. т

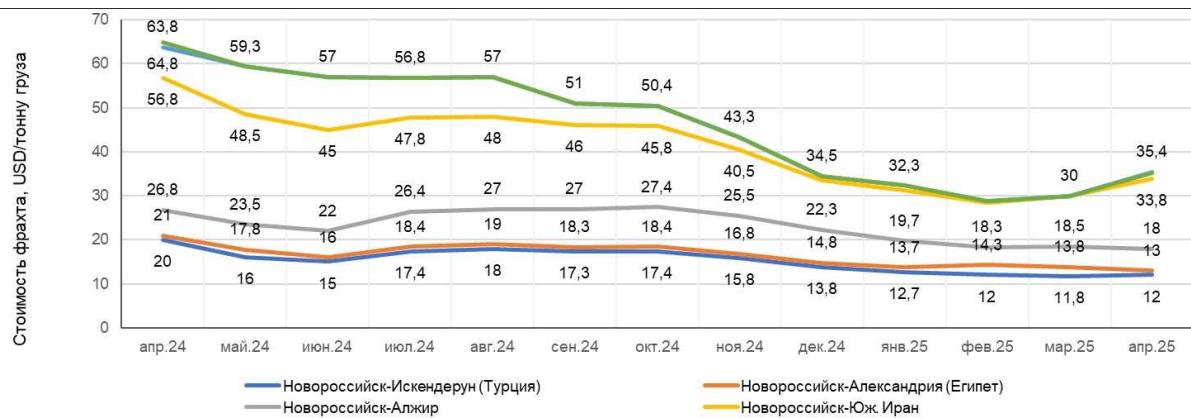


Рис. 2. Фрахтовые ставки на перевозку зерна из порта Новороссийск судами балкерного флота дедвейтной группы 50 — 55 тыс. т

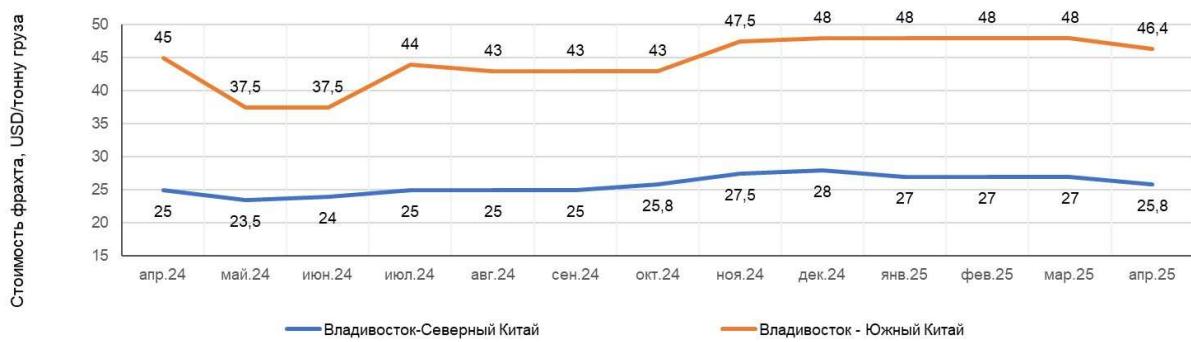


Рис. 3. Фрахтовые ставки на перевозку зерна из порта Владивосток судами балкерного флота дедвейтной группы 3 — 5 тыс. т

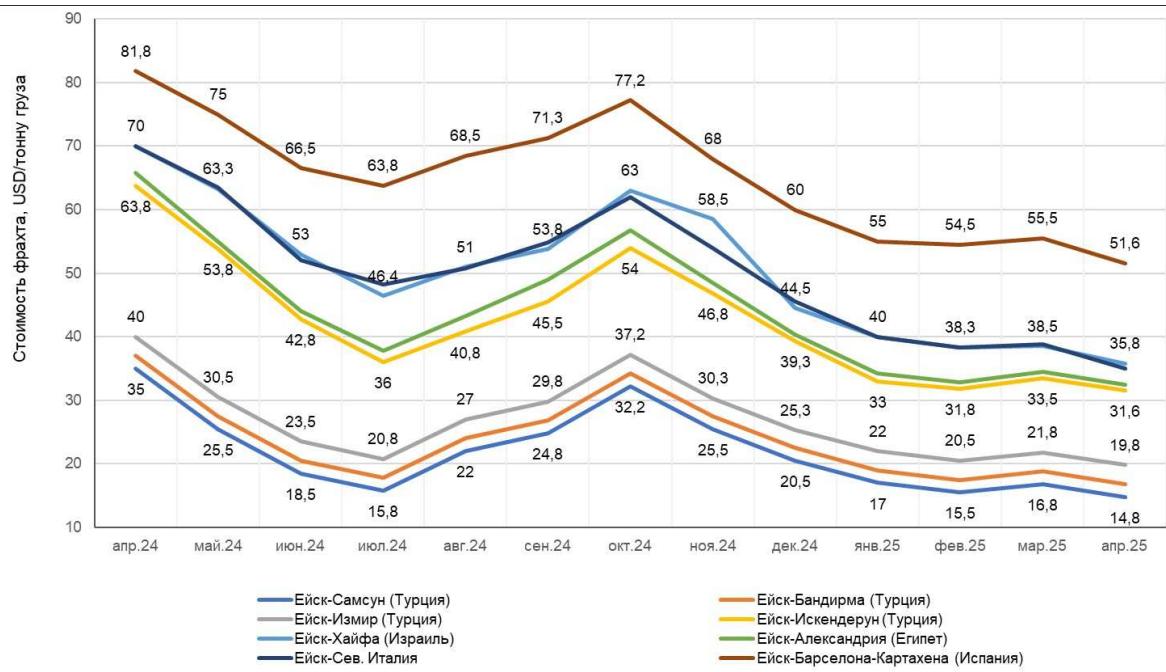


Рис. 4. Фрахтовые ставки на перевозку зерна из порта Ейск судами балкерного флота дедвейтной группы 3 — 5 тыс. т



Рис. 5. Фрахтовые ставки на перевозку зерна из портов Астрахань и Махачкала судами балкерного флота дедвейтной группы 3 — 5 тыс. т

3. ФРАХТОВЫЕ СТАВКИ НА ПЕРЕВОЗКУ РАЗЛИЧНЫХ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ (В Т.Ч. МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ, СЕРЫ, ПОТАША, МОЧЕВИНЫ) ИЗ ПОРТОВ РФ СУДАМИ БАЛКЕРНОГО ФЛОТА РАЗЛИЧНЫХ ДЕДВЕЙТНЫХ ГРУПП

Минеральные удобрения. За исследуемый период с апреля 2024 по апрель 2025 г. фрахтовые ставки на перевозку минеральных удобрений из портов Балтийского моря в направлении Бразилии и Индии существенно снизились и на конец периода для судов дедвейтной группы 25 — 30 тыс. т составили около 34,5 и 54,8 USD за тонну грузоподъемности соответственно, тогда как годом ранее — 48,3 и 77,4 USD (рис. 6).

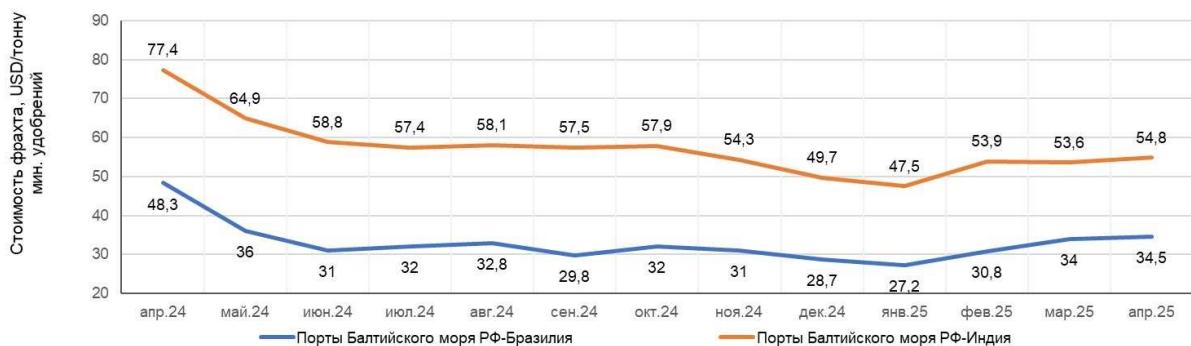


Рис. 6. Фрахтовые ставки на перевозку минеральных удобрений из портов Балтийского моря РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 25 — 35 тыс. т

Сера. Большую часть прошедшего 2024 г. фрахтовые ставки на перевозку серы находились на стабильно высоких позициях, а к октябрю этого же года ставки плавно снизились. К апрелю 2025 г. стоимость фрахта из портов Балтийского моря в направлении портов Бразилии, Северной Африки и Мексиканского залива уменьшилась в среднем на 40 % в сравнении с тем же периодом предыдущего года и находилась в интервале 36,3 — 48,8 USD за тонну грузоподъемности для судов дедвейтной группы 30 — 40 тыс. т (рис. 7).

Фрахтовые ставки на перевозку серы из портов Черного моря в направлении портов Бразилии и Северной Африки к апрелю текущего года претерпели изменения по отношению к тому же периоду предыдущего года, снизившись до 30 %, и находились в интервале 38,1 — 46,9 USD за тонну грузоподъемности для судов дедвейтной группы 30 — 35 тыс. т (рис. 8).

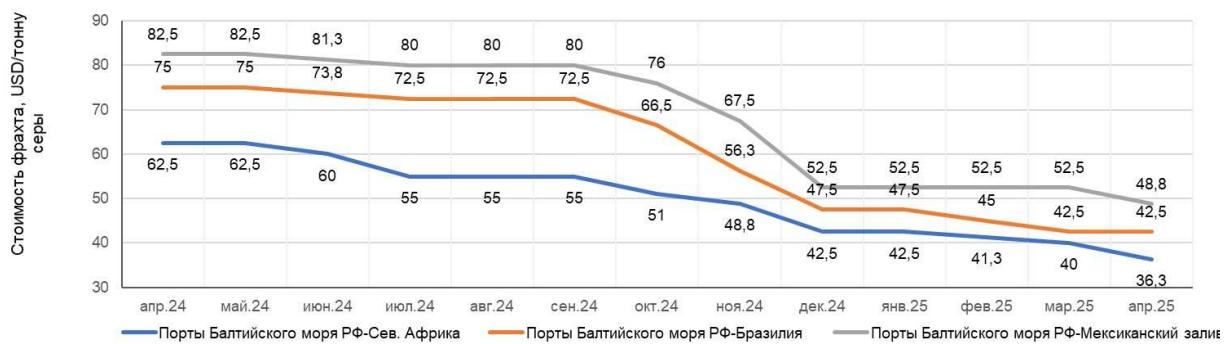


Рис. 7. Фрахтовые ставки на перевозку серы из портов Балтийского моря РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 30 — 40 тыс. т

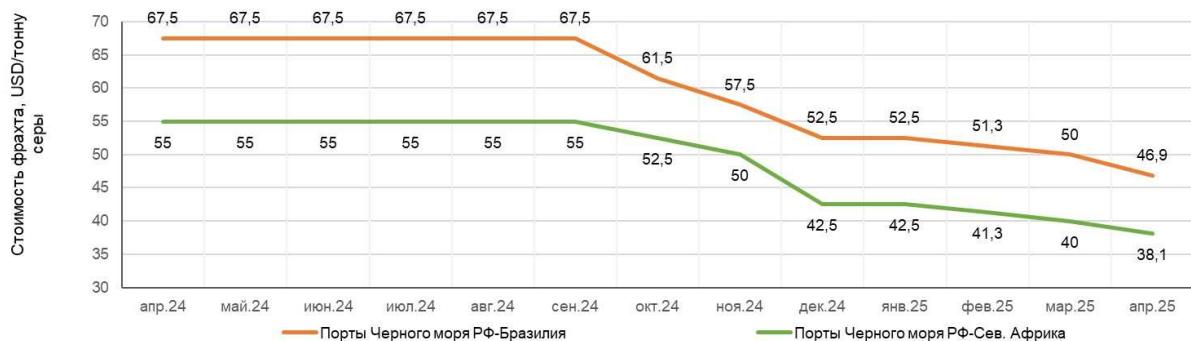


Рис. 8. Фрахтовые ставки на перевозку серы из портов Черного моря РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 30 — 35 тыс. т

Поташ. В данном сегменте наблюдалась незначительная волатильность ставок фрахта: в среднем снижение составило около 15 % в сравнении с тем же периодом предыдущего года. На конец рассматриваемого периода фрахтовые ставки из портов Балтийского моря в направлении портов Китая, Бразилии, Мексиканского залива и Юго-Восточной Азии находились в интервале 40 — 76,3 USD за тонну грузоподъемности для судов дедвейтной группы 25 — 65 тыс. т (рис. 9).

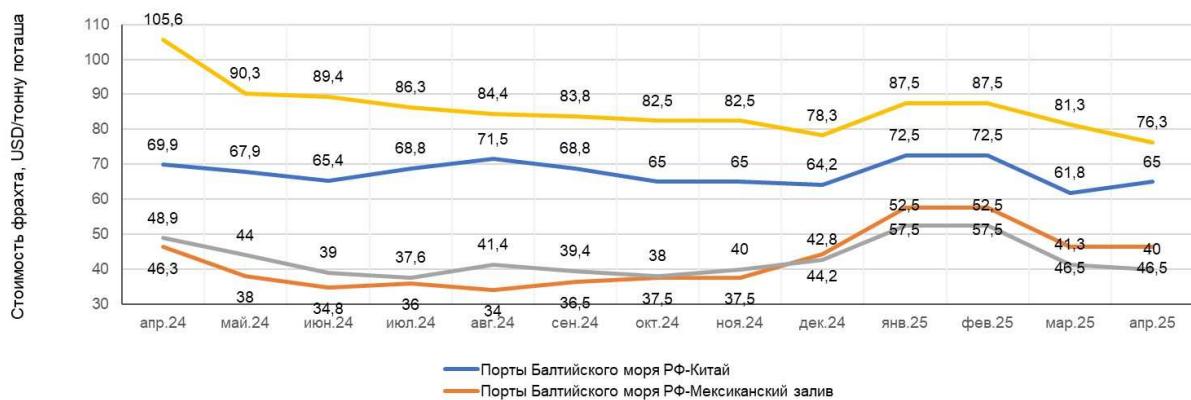


Рис. 9. Фрахтовые ставки на перевозку поташа из портов Балтийского моря РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 25 — 65 тыс. т

Мочевина. В данном сегменте наблюдалась плавное снижение фрахтовых ставок за рассматриваемый период, составившее в среднем около 25 % в сравнении с соответствующими месяцами предыдущего года. На конец периода фрахтовые ставки из портов Балтийского моря в направлении портов Бразилии и Мексиканского залива находились в интервале 37,8 — 57,8 USD за тонну грузоподъемности для судов дедвейтной группы 25 — 35 тыс. т (рис. 10).

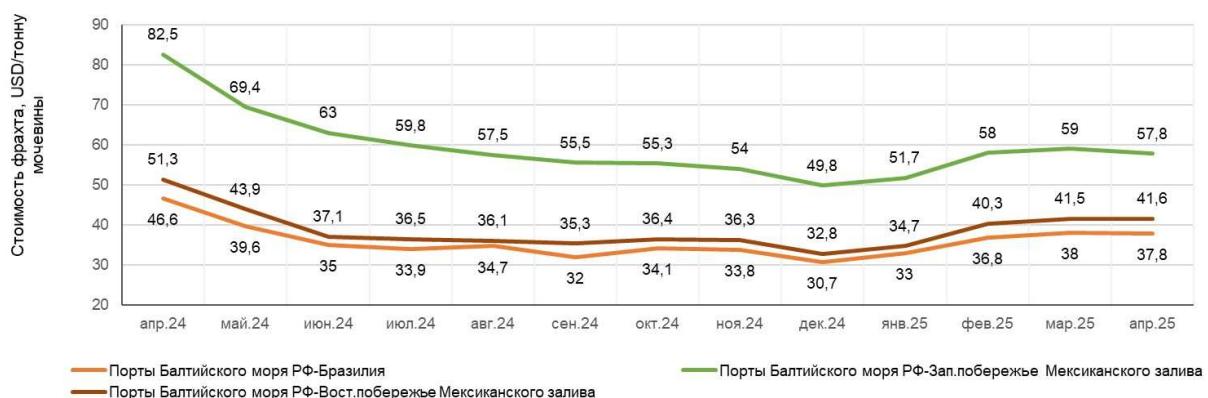


Рис. 10. Фрахтовые ставки на перевозку мочевины из портов Балтийского моря РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 25 — 35 тыс. т

4. ФРАХТОВЫЕ СТАВКИ НА ПЕРЕВОЗКУ УГЛЯ ИЗ ПОРТОВ РФ СУДАМИ БАЛКЕРНОГО ФЛОТА РАЗЛИЧНЫХ ДЕДВЕЙТНЫХ ГРУПП

За исследуемый период с апреля 2024 по апрель 2025 г. наблюдается умеренное снижение размера фрахтовых ставок из портов Балтийского моря и Черного моря для судов дедвейтной группы менее 75 тыс. т в среднем на 25 %, который на конец периода составил 12,5 — 39,1 USD за тонну грузоподъемности (рис. 11, 12).

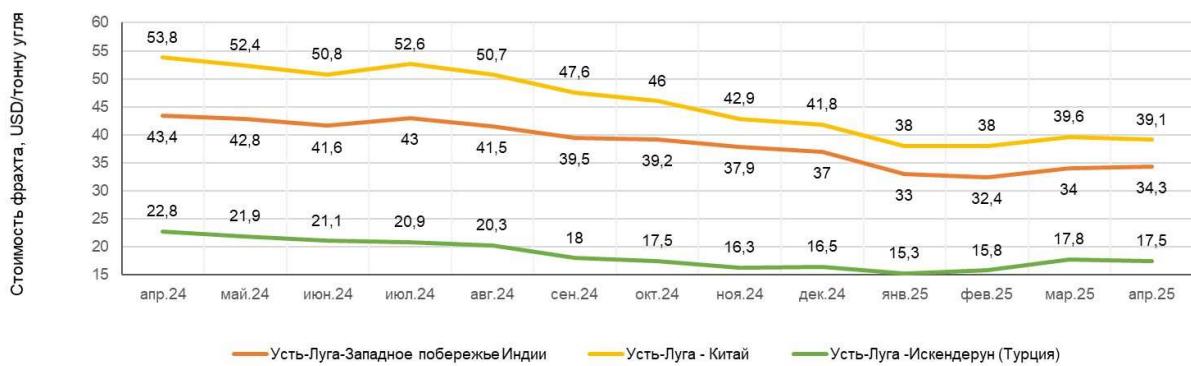


Рис. 11. Фрахтовые ставки на перевозку угля из порта Усть-Луга судами балкерного флота дедвейтом менее 75 тыс. т

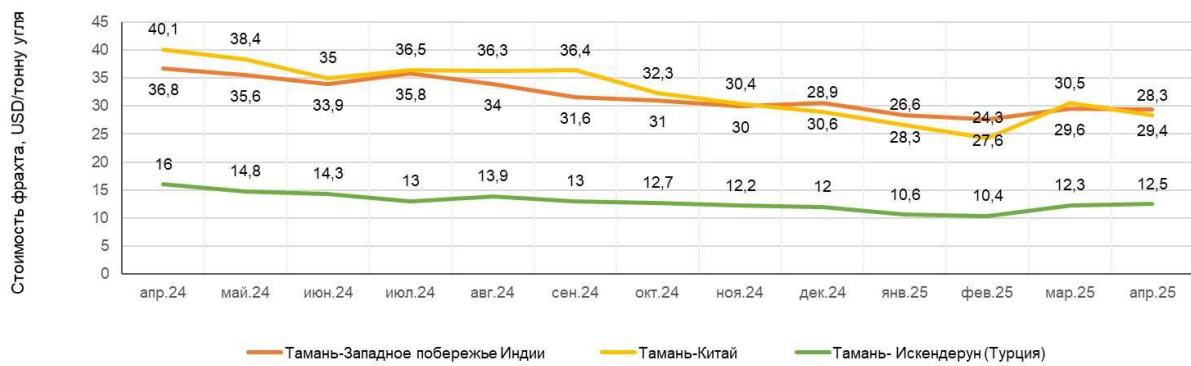


Рис. 12. Фрахтовые ставки на перевозку угля из порта Тамань судами балкерного флота дедвейтом менее 75 тыс. т

Что касается портов Дальнего Востока РФ, для перевозок в направлении портов Китая и Республики Корея снижение ставок составило в среднем не более 10 %, на апрель 2025 г. они находились в интервале 7,8 — 13 USD за тонну грузоподъемности (рис. 13, 14). Стоит отметить, что резких колебаний за рассматриваемый период не наблюдалось.

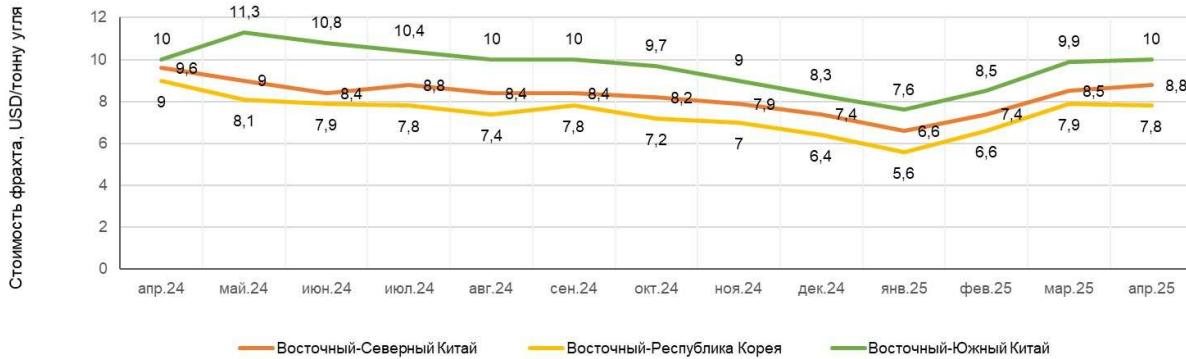


Рис. 13. Фрахтовые ставки на перевозку угля из порта Восточный судами балкерного флота дедвейтом менее 75 тыс. т



Рис. 14. Фрахтовые ставки на перевозку угля из портов Мурманск и Находка судами балкерного флота дедвейтом не более 75 тыс. т и 30 тыс. т соответственно

5. ФРАХТОВЫЕ СТАВКИ НА ПЕРЕВОЗКУ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ ИЗ ПОРТОВ РФ СУДАМИ БАЛКЕРНОГО ФЛОТА НЕСКОЛЬКИХ ДЕДВЕЙТНЫХ ГРУПП

Чугун в чушкиах. Динамика снижения фрахтовых ставок на перевозку чугуна в чушках происходила волнообразно. За период исследования с апреля 2024 по апрель 2025 г. размер фрахтовых ставок снизился в среднем более чем на 36 % и сейчас составляет около 18 USD за тонну грузоподъемности на судах дедвейтных групп 8 — 30 тыс. т, следующих из порта Новороссийск в порты Южной Европы (рис. 15).

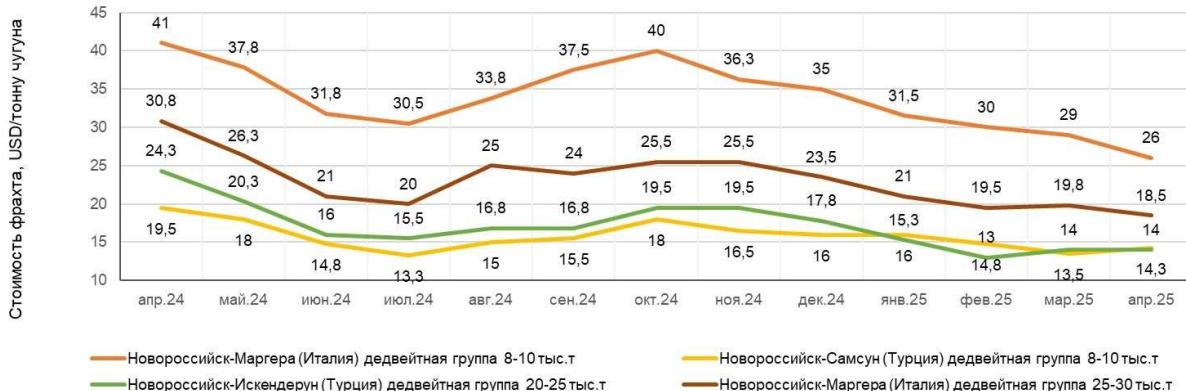


Рис. 15. Фрахтовые ставки на перевозку чугуна в чушках из порта Новороссийск на судах балкерного флота дедвейтных групп 8 — 10 тыс. т, 20 — 25 тыс. т и 25 — 30 тыс. т

Металлопрокат. Более плавное снижение размера фрахтовых ставок (около 30 %) за исследуемый период наблюдалось при перевозке металлопроката из порта Новороссийск в направлении портов Турции и Египта на судах дедвейтных групп 3 — 5 тыс. т, 8 — 10 тыс. т и 25 — 30 тыс. т. В настоящий момент размер фрахтовой ставки находится в интервале 14,5 — 23,3 USD за тонну грузоподъемности (рис. 16 — 18).



Рис. 16. Фрахтовые ставки на перевозку металлопроката из порта Новороссийск на судах балкерного флота дедвейтной группы 3 — 5 тыс. т



Рис. 17. Фрахтовые ставки на перевозку металлопроката из порта Новороссийск на судах балкерного флота дедвейтной группы 8 — 10 тыс. т

Более существенная динамика снижения размера фрахтовых ставок наблюдалась при перевозке металлопроката из порта Новороссийск в порты Сингапура и Филиппин: оно составило около 45 % от начала анализируемого периода, и в апреле 2025 г. ставки находились в интервале 34,4 — 53,8 USD за тонну грузоподъемности судов дедвейтной группы 25 — 50 тыс. т (рис. 18).

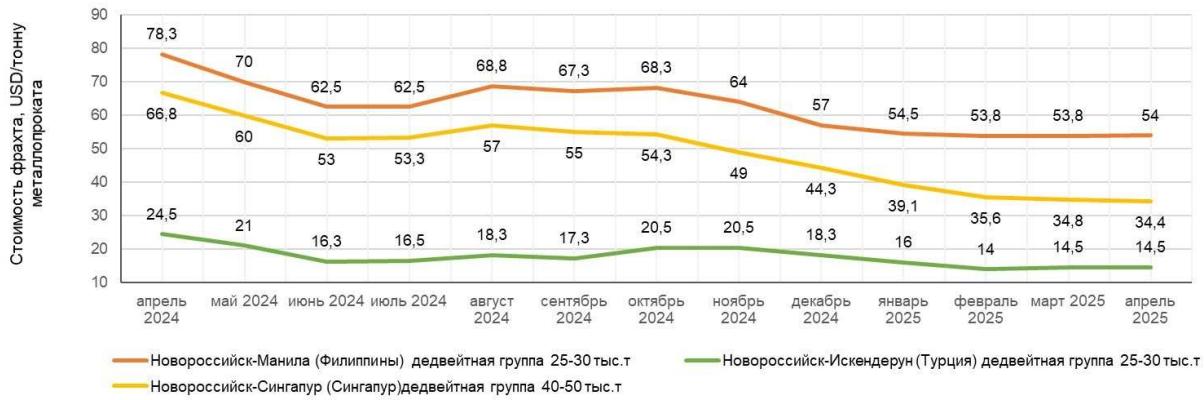


Рис. 18. Фрахтовые ставки на перевозку металлопроката из порта Новороссийск на судах балкерного флота дедвейтной группы 25 — 30 тыс. т и 40 — 50 тыс. т

Из портов Дальнего Востока РФ в направлении Северного Китая и Тайваня для судов дедвейтной группы 25 — 30 тыс. т размер фрахтовых ставок за анализируемый период снизился всего не более чем на 20 % и в августе 2025 г. находился в интервале 16 — 18 USD за тонну грузоподъемности (рис. 19).

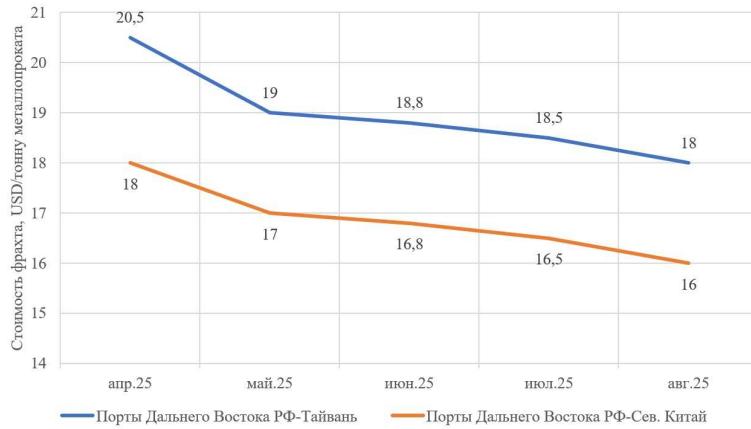


Рис. 19. Фрахтовые ставки на перевозку металлопроката из портов Дальнего Востока РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 25 — 30 тыс. т

Согласно имеющимся данным, размер фрахтовой ставки на перевозку металлолома из портов Санкт-Петербург и Ростов-на-Дону для судов дедвейтных групп 25 — 30 тыс. т и 3 — 5 тыс. т соответственно в направлении турецких портов находился в интервале 20 — 39 USD за тонну грузоподъемности (рис. 20).



Рис. 20. Фрахтовые ставки на перевозку металлопроката из портов Дальнего Востока РФ судами балкерного флота дедвейтной группы 25 — 30 тыс. т

ВЫВОДЫ

На размер фрахтовых ставок оказывает влияние множество факторов. Один из ключевых аспектов — геополитическая нестабильность в различных регионах мира, зачастую приводящая к изменению маршрутов морской торговли и снижению спроса на определенные виды товаров, а как следствие, изменению на рынке фрахтовых ставок.

Проведенный в данной статье анализ для сухих грузов позволяет констатировать, что размер фрахтовых ставок на перевозку всей рассматриваемой номенклатуры грузов претерпел изменения в сторону снижения. Отрицательная динамика сохраняется, поскольку оправдался прогноз ключевых отраслевых консалтинговых агентств (Clarksons, Barry Rogliano, Drewry и др.) о сохранении в 2025 г. тенденции на сокращение потребности в таких стратегически важных видах товара, как уголь, металл, железная руда, на фоне роста спроса на зерно и минеральные удобрения [3 — 7]. В настоящий момент наблюдается кризис в строительной сфере Китая, что влечет за собой снижение темпов производства металлопродукции и использования угля. На рынок морских перевозок оказывает существенное влияние процесс декарбонизации — переход на низкоуглеродные виды топлива [8], уменьшается спрос на традиционные энергоносители [9], происходит

постепенный переход на более экологичные виды топлива, такие как природный газ, водород, электрические энергоносители и другие возобновляемые источники энергии [10]. Поэтому ожидать резкого скачка цен и увеличения фрахтовых ставок на анализируемые типы грузов в ближайшее время не стоит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Review of Maritime Transport. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2006, 2007, 2008.
2. Березин А.О. Закономерности развития экспорта зерновых культур из южных регионов России водным транспортом / А.О. Березин, Я.А. Сперанская, К.В. Прозоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 690 — 699. — DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699.
3. Clarksons Research Services Limited. World Shipyard Monitor, 2024.
4. Clarksons Research. Shipping Review & Outlook, September 2024.
5. Clarksons Research. Shipping Review and Outlook: Financial Markets, March 2025.
6. Barry Rogliano Salles. Shipping and Shipbuilding Markets. Dry Bulk Monthly Report, February 2025.
7. Drewry Maritime Research. Drewry Shipping Insight, December 2024.
8. Толмачев С.А. Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (СII) и предлагаемые подходы к их совершенствованию / С.А. Толмачев, А.А. Серов, А.А. Михеева, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 24 — 32. — EDN FXBYEL.
9. Реуцкий А.С., Якимов В.В., Буцанец А.А. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — №76. — С. 87 — 96.
10. Реуцкий А. С. Сравнительный анализ способов транспортировки водорода морским транспортом по критерию удельной грузоподъемности // А. С. Реуцкий, А. С. Буянов, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 709 — 725. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725.

REFERENCES

1. Review of Maritime Transport, United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2006, 2007, 2008.
2. Berezin A.O., Speranskaya Y.A., Prozorov K.V. Patterns of development of export cargo flows of grain crops from the southern regions of Russia. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 690 — 699. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-690-699. (In Russ.)
3. Clarksons Research Services Limited. World Shipyard Monitor, 2024.
4. Clarksons Research. Shipping Review & Outlook, September 2024.
5. Clarksons Research. Shipping Review and Outlook: Financial Markets, March 2025.
6. Barry Rogliano Salles. Shipping and Shipbuilding Markets. Dry Bulk Monthly Report, February 2025.
7. Drewry Maritime Research. Drewry Shipping Insight, December 2024.
8. Tolmachev S.A., Serov A.A., Mikheeva A.A., Semionichev D.S., Reutskii A.S. Consequences of applying MARPOL requirements to operational carbon intensity (CII), and approaches for their improvement. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 24 — 32. EDN FXBYEL. (In Russ.)
9. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 87 — 96. (In Russ.)
10. Reutskii A.S., Buyanov A.S., Butsanets A.A. Comparative analysis of methods of hydrogen transportation by sea transport based on the criterion of specific loading capacity. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 2024. Vol. 16. No. 5. P. 709 — 725. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725. (In Russ.)



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.5.018.71
EDN CEZAAM

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНОПЛАНА С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н.Е. Румянцев, студент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155 Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: rnikita00@gmail.com
В.П. Морозов, канд. техн. наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155 Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru
Н.В. Калинина, канд. техн. наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155 Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

В настоящей статье предложен комбинированный вариант исследования характеристик проектируемого экраноплана, объединяющий результаты цифрового (с CAD-моделями) и физического экспериментов в целях исследования летных характеристик перспективного амфибийного экраноплана с шасси на воздушной подушке.

В статье представлены описание и параметры свободнолетающих и связанных масштабных моделей летательных аппаратов, выбран способ исследований масштабных моделей и дано краткое описание экспериментальных работ с катапультной и радиоуправляемой моделями экраноплана с шасси на воздушной подушке.

В рамках цифрового эксперимента создана цифровая модель экраноплана в формате 3D и осуществлены аэродинамические исследования этой модели в системе автоматизированного проектирования. Полученная аэродинамика CAD-моделей (визуализация обтекания поверхностей экраноплана и значения различных сил с моментами) подтвердила рациональный выбор аэрогидродинамической компоновки амфибийного экраноплана.

Ключевые слова: экраноплан, экранный эффект, аэродинамика, модельные испытания, свободнолетающие модели, кордовые испытания, испытания в системе автоматизированного проектирования.

Для цитирования: Румянцев Н.Е. Способы определения характеристик экраноплана с помощью различных видов экспериментов / Н.Е. Румянцев, В.П. Морозов, Н.В. Калинина // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 32 — 49. EDN CEZAAM.

METHODS FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF AN EKRANOPLAN USING VARIOUS TYPES OF EXPERIMENTS

N.E. Rumyantsev, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina, 24, e-mail: rnikita00@gmail.com
V.P. Morozov, PhD, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina, 24, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru
N.V. Kalinina, PhD, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

In this article, an attempt is made to combine the results of a physical and digital experiment with CAD models in order to study the flight characteristics of a promising amphibious ekranoplan with an air cushion landing gear.

The article provides a general description of free-flying and associated scale models of aircraft, a method for studying scale models is selected and a brief description of experimental work with ejection and radio-controlled models of an ekranoplan with an air cushion landing gear is given.

As part of the digital experiment, a 3D digital model of an ekranoplan was created and aerodynamic studies of this model were carried out in the CAD system. The obtained results of external visual flow around CAD models confirmed the rational choice of the aerohydrodynamic layout of the amphibious ekranoplan.

Key words: ekranoplan, ground effect, aerodynamics, model tests, free-floating models, cord tests, tests in the computer-aided design system.

For citation: Rumyantsev N.E., Morozov V.P., Kalinina N.V. Methods for determining the characteristics of an ekranoplan using various types of experiments. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 32 — 49. EDN CEZAAM. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Сфера экранопланостроения проходит точно такие же этапы развития, как и отрасли автомобилестроения, авиастроения, вертолетостроения и т.д. В начале «жизни» новые отрасли промышленности требуют больших финансовых вложений, то есть зачастую новые виды сложной или высокотехнологичной техники изначально экономически нецелесообразны. На данный момент наиболее актуальным способом уточнения характеристик проектируемого аппарата является сочетание теоретического метода с дорогостоящим и тем не менее необходимым экспериментальным. С целью удешевления между теоретическим проектированием и экспериментальным уточнением предлагается ввести промежуточный этап — предмодельные испытания (исследования модели в различных системах автоматизированного проектирования), что позволило бы сэкономить миллионы рублей.

Предмодельный этап позволяет уменьшить число модельных испытаний, а следовательно, расходы на постройку моделей, потребление электроэнергии на испытательные стенды, расходы на транспортировку модели (если не производятся самим конструкторским бюро или институтом) и т.п. Предварительные испытания в программных обеспечениях дают возможность примерно наметить оптимальную конструкцию и выявили бы наиболее очевидные недостатки проекта.

Более того, предмодельные испытания в программных обеспечениях позволяют сэкономить время проектирования, так как постройка модели и ее испытания занимают время и проводятся (зачастую) в рабочее время, расчет в программах можно проводить 24 часа в сутки.

Стоимость всего комплекса испытаний по курсу для одного проекта экраноплана в 2016 г. составила 100 млн рублей [1, с. 103, 105]. Если учесть, что проект на этапе проектирования подвергается корректировкам, что конструкторское бюро проводит научно-исследовательские работы с целью модернизации аппаратов и разрабатывает новые концепции, то стоимость выходит в несколько сот или несколько миллиардов рублей (точно сложно сказать).

Относительно недавно экранопланы вновь стали притягивать к себе внимание. После ряда неудач в сфере советского экранопланостроения тематику окрестили опасной и неперспективной. Данное мнение тормозит развитие тематики и противодействует решению проблем в нашей стране.

История создания экранопланов описана, например, в источниках [2] и [3]. На сегодняшний день ряд стран (Германия, Франция, Великобритания, США, Китай, Южная Корея, Сингапур, Иран, ОАЭ, Япония и др.) продолжают работу в сфере экранопланостроения [4, с. 3].

Так, Сингапур с 2025 г. будет осуществлять коммерческие перевозки в Турции [5], свой экраноплан разрабатывают США [6], а Франция создает другие виды транспорта на схожем эффекте (динамическая воздушная подушка) [7].

На данный момент командой студентов НГТУ им. Р.Е. Алексеева проведены модельные испытания с катапультной моделью, свободнолетающей радиоуправляемой моделью, со стендом шасси на воздушной подушке в боксировочном бассейне Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева. Проект был продемонстрирован Фонду содействия инновациям в октябре — ноябре 2023 г. (был выделен небольшой студенческий грант на реализацию проекта), на конференции в МАИ в ноябре 2023 г., на Всемирном фестивале молодежи в Сочи в марте 2024 г., на различных конференциях в НГТУ им. Р.Е. Алексеева в 2023 — 2025 гг.

Задача исследования состоит из нескольких пунктов:

1) произвести анализ видов испытаний в сферах авиастроения и судостроения с целью их применения для проверки проектируемого аппарата на соответствие его заявленным и требуемым параметрам;

2) проверить, насколько точно программа учитывает влияние экранного эффекта на проектируемый аппарат (в данной статье сравнение производится только с теоретическими расчетом массы аппарата);

3) произвести анализ первого приближения (т.е. грубая оценка со значительными погрешностями) с целью оценки достоверности и точности полученных результатов;

4) произвести визуализацию аэродинамики и оценить ее оптимальность (влияние завихрений на горизонтальное оперение, наличие и число локальных завихрений, концентратов высоких давлений, срывов потока и др.).

В дальнейшем были найдены чертежи экраноплана «Волга-2» и результаты продувок. В последующих статьях будет произведена верификация продувок в системе автоматизированного проектирования с результатами продувки модели в трубе.

1. КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СО СВОБОДНОЛЕТАЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ

Процесс создания летательных аппаратов, к которым относятся и экранопланы, всегда опирается на обширные экспериментальные исследования.

После Второй мировой войны, в борьбе за прогресс, многие страны стали использовать свободнолетающие модели самолетов, управляемые по радио. Для них создавались специальные миниатюрные двигатели, датчики и специальное оборудование для регистрации полетных параметров.

При исследовании летных характеристик военного самолета XF фирмы «Локхид» половину всех данных получили путем испытаний управляемых моделей, сбрасываемых на большой высоте. С помощью летающих моделей были получены данные для ряда самолетов: Republic XF-91 Thunderceptor, Convair XF-92, Douglas F4D Skyray, Bell X-2, Douglas DC-8 Douglas D-558-1 Skystreak.

Вопросы, исследуемые методом свободно летающих моделей, очень разнообразны: вопросы интерференции, бафинга, управляемость на всех режимах, работа воздухозаборников, критические режимы полета до сваливания, отрабатывались различные взлетно-посадочные устройства, гидролыжи, подводные крылья, различные отказы и т.д.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНОПЛАНОВ И МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА СТЕНДАХ. ВИДЫ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты, проводимые на масштабных моделях, допустимо разделить на два вида: со связанными моделями и со свободнолетающими. Связанные модели каким-либо образом прикреплены к испытательному оборудованию, например, модель в аэродинамической трубе закрепляется на специальной державке (рис. 1).

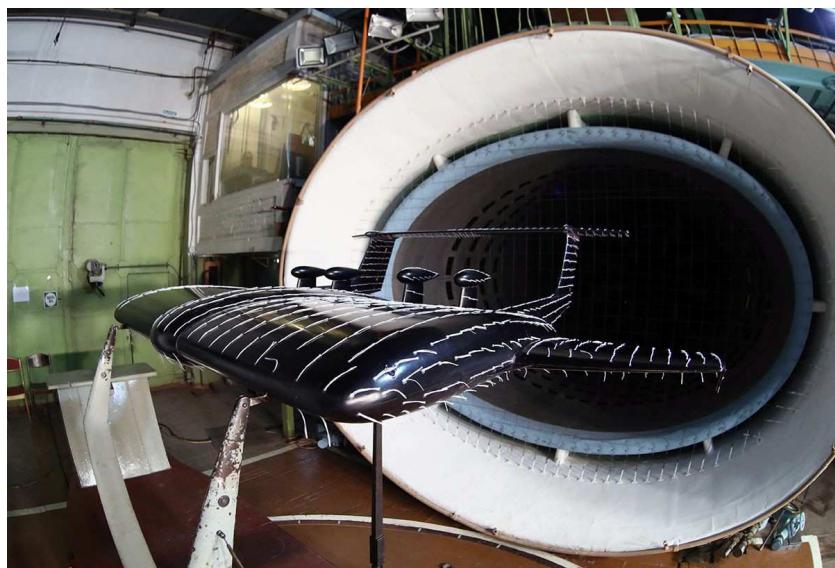


Рис. 1. Модель экраноплана, продуваемая из трубы¹

¹Изображение из открытого источника в сети интернет: <https://www.ridus.ru/vtoroe-prishestvie-kaspiskih-monstrov-299940.html> (дата обращения 09.02.2025).

Связанные модели для гидродинамических испытаний могут буксироваться в опытном бассейне на специальной державке (рис. 2).



Рис. 2. Модель самолета с шасси на воздушной подушке в опытном бассейне

За рубежом и в Центральном конструкторском бюро по судам на подводных крыльях (Россия) широко использовался метод буксировки гидродинамических моделей на специальной штанге, закрепленной на скоростном катере (рис. 3). Модель, двигаясь на расстоянии от штанги, имела возможность свободного перемещения по высоте и тангажу.



Рис. 3. Буксировка модели за скоростным катером на штанге²

²Изображение из открытого источника в сети интернет: <https://cz.pinterest.com/pin/test-model-of-the-ekranoplan-302726406211051635/> (дата обращения 09.02.2025).

В закрытых бассейнах часто проводились исследования на моделях или даже стенах, моделирующих нижнюю гидродинамическую часть летательного аппарата. Такой стенд показан на рис. 4 [8, 9].

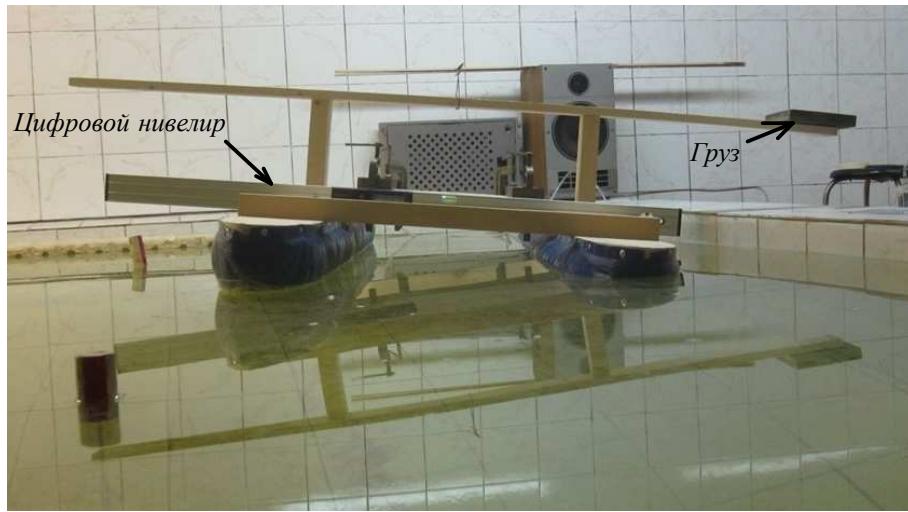


Рис. 4. Исследование остойчивости пневмобаллонного шасси на воде в бассейне

2.1. Достоинства и недостатки экспериментов и получаемых результатов при испытаниях связанных моделей.

К связанным моделям можно отнести:

- трубные модели;
- буксируемые модели (как в опытном бассейне, так и на свободной привязке на штанге скоростного катера);
- кордовые модели (модели, движение которых в полете по кругу ограничивается кордом, или вращающейся в горизонтальной плоскости балкой).

Испытания в аэродинамических трубах позволяют достаточно быстро получать все безразмерные аэродинамические характеристики модели. Для испытаний моделей экранопланов в трубе устанавливается подвижный перфорированный экран с отсосом пограничного слоя или зеркальная ему модель.

Гидродинамические характеристики моделей оцениваются в опытном бассейне с достаточной точностью для построения зависимостей, для соблюдения требований нормативных документов при создании техники подобного рода.

Кордовые модели, так же как буксируемые катером, могут быть двух видов: свободнолетающая на корде (струне) и жестко привязанная к консольной балке-крылу. Достоинства и недостатки связанных моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Достоинства и недостатки связанных моделей экранопланов

Параметры	Трубная модель	Буксируемая в опытном бассейне модель	Кордовая свободная модель
Ограничения по массе модели	По прочностным ограничениям державок	По прочностным ограничениям державок телеги	Согласно масштабу модели
Ограничения по габаритам модели	По размерам рабочей части трубы	По нормам РДК-11 и согласно правилам в опытном бассейне	Пропорционально длине корды
Ограничения по скорости полета	Не более скорости потока в трубе	Не более скорости буксировочной телеги	Зависят от мощности двигателей модели
Питание модели от внешних источников энергии	Возможность подвода энергии от внешних источников	Возможность подвода энергии от внешних источников	Нет, в основном от автономных бортовых источников
Съем информации	Максимально полный	Полный	Ограниченный
Точность информации	Точная	Точная	Качественная ограниченная
Стоимость модели	Высокая	Средняя	Низкая
Стоимость оборудования	Высокая	Высокая	Низкая
Возможность видео-фото съемки	Есть	Есть	Есть

2.2. Достоинства и недостатки экспериментов и получаемых результатов при испытаниях свободнолетающих моделей.

Свободнолетающие модели — это модели, способные осуществлять полет без связи с любым видом носителя, буксировщика или конструкцией аэродинамической трубы.

К свободнолетающим моделям можно отнести катапультные и радиоуправляемые модели самолетов, гидросамолетов и экранопланов.

Катапультные исследовательские модели экранопланов, как правило, не имеют маршевых двигателей. Задача этих моделей заключается в предварительном определении центровки при определенном сочетании балансировочных углов крыла и оперения. На рис. 5 показана легкая катапульта простейшего арбалетного типа с резиновым силовым жгутом в качестве силового элемента.



Рис. 5. Катапульта с легкой моделью экраноплана

Запуск катапультных моделей происходит в помещении для исключения влияния порывов ветра на модель.

На рис. 6 показана радиоуправляемая модель экраноплана с шасси на воздушной подушке в полете на корде. Модель имеет два маршевых электромотора с воздушными винтами и одним электровентилятором для создания воздушной подушки под фюзеляжем. Установка свободнолетающей модели на корду позволяла более точно замерять скорость, тангаж и высоту полета.



Рис. 6. Радиоуправляемая модель экраноплана с шасси на воздушной подушке

Преимущества получаемых результатов со свободнолетающей моделью по сравнению со связанный заключаются в следующем:

1) масштаб модели может быть больше по сравнению с трубными испытаниями, а приведение результатов испытаний к натурным, вследствие этого, достовернее;

2) можно без особого труда решать многие вопросы (безопасности, управляемости на различных режимах, аэродинамических характеристик, вибрации и др.), возникающие в действительном полете, например, определение летных характеристик и т.п.;

3) на динамически подобных моделях можно исследовать нестационарные процессы;

4) исследования на свободнолетающих моделях позволяют изучить спектр перекрестных проблем (например, влияние нагнетателя воздушной подушки на моментные характеристики, проходимость и пр.), которые можно выявить только на различных специализированных стендах и невозможно получить ни в трубе, ни в бассейне.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕЙ РАДИОУПРАВЛЯЕМОЙ МОДЕЛЬЮ

Основными объектами экспериментальных исследований были катапультная модель, выполненная в масштабе 1:96 к натуральному экраноплану, и радиоуправляемая модель в масштабе 1:24. Основные характеристики моделей даны в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры моделей

№	Основные параметры	Катапультная модель	Радиоуправляемая модель
1	Длина модели	360 мм	1450 мм
2	Размах крыла модели	250 мм	1000 мм
3	Площадь крыла	312 см ²	5000 см ²
4	Площадь воздушной подушки	Нет воздушной подушки	1408 см ²
5	Масса модели	92 г	3700 — 3900 г
6	Маршевые двигатели	нет	2 э/д по 300 Вт
7	Двигатель воздушной подушки	нет	1 э/д 300 Вт

Испытания катапультной модели позволили определить сбалансированные углы атаки крыла и оперения при предполагаемом диапазоне рабочих центровок.

Испытания радиоуправляемой модели делятся на три типа: статические, динамические и кордовые.

К статическим испытаниям относятся замеры стартовой тяги винтов в зависимости от положения регулятора пульта управления, давление, создаваемое вентилятором воздушной подушки в зависимости от положения пульта управления, связь тяги маршевых двигателей и давления в камере воздушной подушки с оборотами винтов и вентилятора, оценка взлетной массы и центровки, влияние вентилятора на моментные характеристики.

К динамическим испытаниям относится определение крейсерской скорости, скорости отрыва, оценка дистанции разбега с выпущенными и убранными закрылками, влияние угла атаки (подрыва экраноплана) на подъемную силу и длину разбега; определение маневренности экраноплана на различных скоростях; изучение влияния тяги воздушных винтов на дистанцию разбега и др.

Статические испытания проводились на специальном стенде, рис. 7.

Взвешивание и определение центровки проводилось с помощью динамометров № 1 и № 2 с неработающим вентилятором воздушной подушки. Центровка вычислялась по результатам взвешивания по формуле:

$$X = \frac{P_2}{P_1 + P_2} L - A,$$

где P_1 — показания динамометра № 1;

P_2 — показания динамометра № 2;

L — фиксированное расстояние между динамометрами (770 мм);

A — расстояние от носка крыла и вертикальной оси динамометра № 1 (77 мм).

Масса модели полная определялась формулой:

$$m_0 = P_1 + P_2.$$

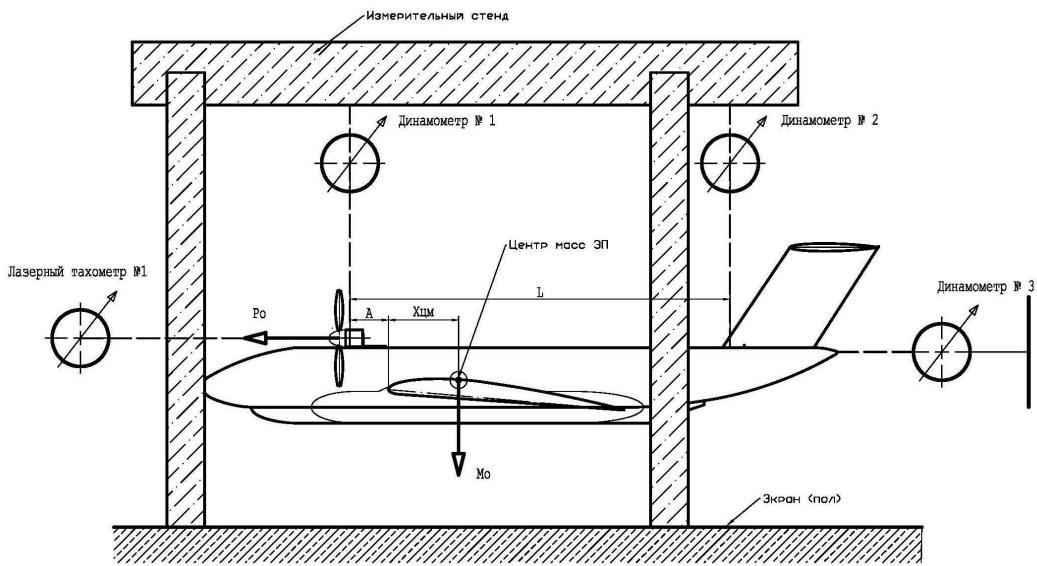


Рис. 7. Стенд для замера стационарных характеристик

При работающем вентиляторе разность между взвешиванием модели без воздушной подушки и с работающей воздушной подушкой позволяла определить вертикальную реакцию вентилятора вдали от экрана.

Динамометром № 3 определялась стартовая тяга маршевых двигателей в зависимости от положения регулятора на пульте управления, при этом лазерным бесконтактным тахометром определялись обороты воздушных винтов (рис. 8).



Рис. 8. Устройство для замеров массы, центровки и тяги экраноплана

Испытания радиоуправляемой модели проводились на снегу и асфальте. Схема испытания показана на рис. 9.

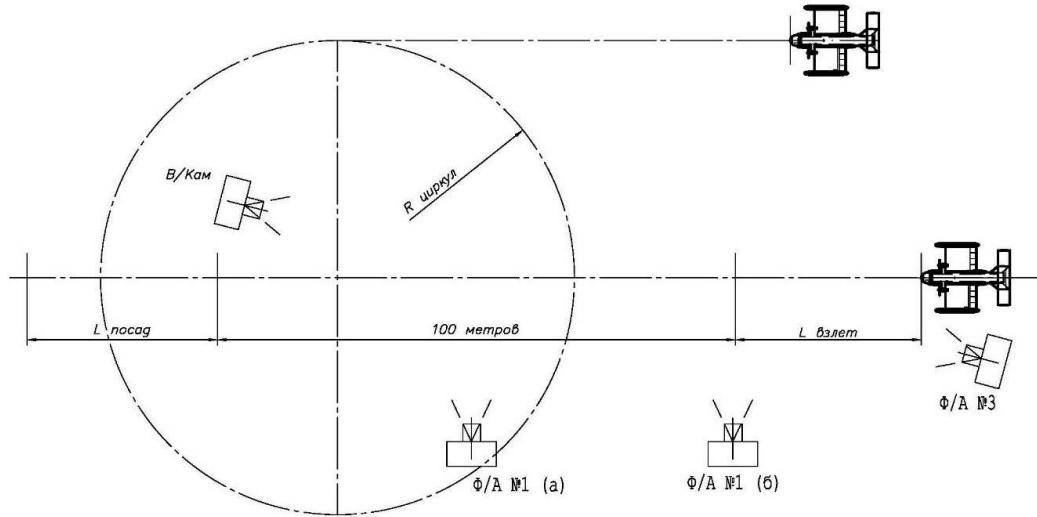


Рис. 9. Обобщенная схема испытаний радиоуправляемой модели по прямой и по корде

Свободный полет модели при различных центровках позволил оценить устойчивость, характеристики маневрирования, скорость полета, дистанцию разбега. При стартовой тяговооруженности около 0,5 разбег модели на снегу составлял около 15 — 20 м, скорость полета, замеренная GPS-трекером, — около 55 км/ч. Устойчивый полет модели на экране на высоте 0,3 — 0,5 хорды крыла осуществлялся при снижении стартовой тяговооруженности примерно вдвое.

Исследования показали, что во время включения воздушной подушки экраноплан полностью разгружался и сила трения на асфальте отсутствовала.

При неработающей воздушной подушке модель при максимальной тяге не могла взлететь с асфальта.

На рис. 10 представлен полет модели в работающим вентилятором, который работает на нагнетание воздушной подушки.



Рис. 10. Полет модели на экране с работающим вентилятором

Производились исследования длины и времени разбега. Модельные испытания показали лучший результат, чем теоретические расчеты (в частности, аэродинамические характеристики на различных режимах эксплуатации подтвердили отсутствие существенного влияния вихрей от скегов на горизонтальное оперение и др.). Итоги дают возможность полагать, что длина и время разбега натурного экраноплана будут значительно меньше расчетных.

На снегу и асфальте оценивалась управляемость экранопланом на рулежных режимах и в полете. На верхнюю плоскость крыла дополнительно были установлены пластины-интерцепторы и оценивалось влияние их дифференцированного выпуска на управляемость модели. Ожидаемого эффекта получено не было.

Кордовые испытания этой же модели оказались более информативными. Практически перед каждым полетом модель взвешивалась и контролировалась центровка. Этот вид испытания позволял точно определять скорость, дистанцию разбега с выпущенными и убранными закрылками, скорость отрыва, тангаж, высоту полета и в отдельных случаях влияние центровки и качества радиоуправления оператором на динамику полета.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

После внесения всех поправок и согласования изменений с научным руководителем началось проектирование новой 3D-модели в системе автоматизированного проектирования. Темой исследований являлся четырехмоторный экраноплан взлетной массой 642 т, выполненный по аэродинамической схеме, подобной исследуемой на радиоуправляемой модели. Итоговый вид экраноплана представлен на рис. 11.

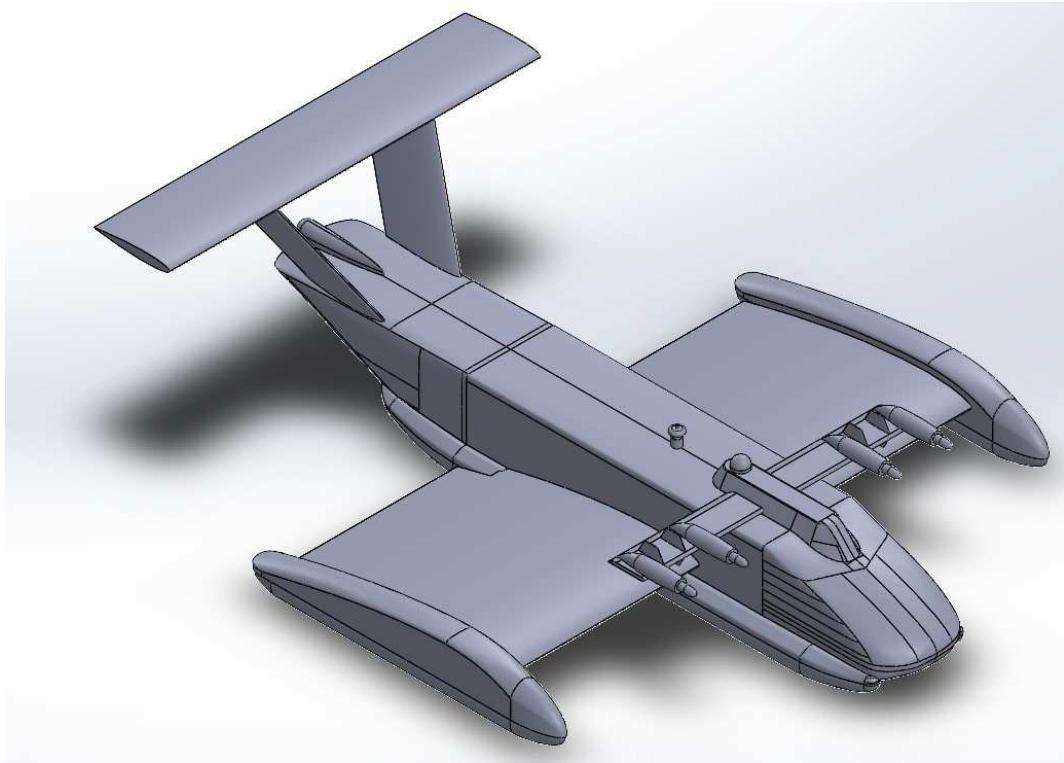


Рис. 11. Вид 3/4-й проекции экраноплана

4.1. Продувка и результаты расчетов по результатам продувки моделей.

Результаты расчета представлены в табл. 3. Оценивались только параметры сопротивления и подъемной силы, так как проверялась возможность программы учитывать экранный эффект, а также исследовалась оптимальность аэрогидродинамической компоновки.

Таблица 3

Значения, полученные при продувке модели экраноплана

Случай продувки	Подъемная сила, Н	Сила сопротивления, Н
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=0^\circ$)	$3,943 \cdot 10^6$	$6,520 \cdot 10^5$
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=4^\circ$)	$8,077 \cdot 10^6$	$1,126 \cdot 10^6$

По полученным значениям можно судить о том, что экранный эффект данный модуль учитывает. В случае тангажа в 4 градуса аппарат имеет подъемную силу примерно 8,1 МН, а вес в 6,5 МН, то есть при скорости 100 м/с и тангаже в 4 градуса аппарат будет набирать высоту. Можно уменьшать тангаж (что снизит лобовые сопротивления примерно в 1,5 раза) либо же лететь на большей высоте.

Визуализация аэродинамики представлена на рис. 12 — 14.

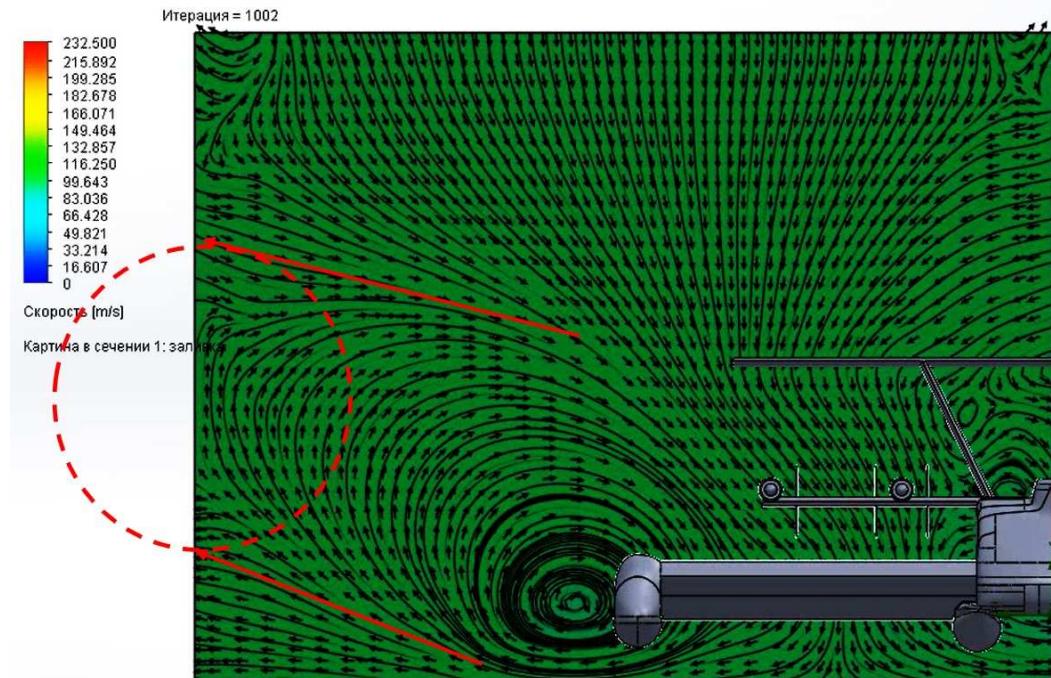


Рис. 12. Фронтальный вид на экраноплан при оценке образования завихрений

На данном рисунке отчетливо виден стеночный эффект, так как вихрь у концевой шайбы настолько большой, что его влияние распространяется до пределов расчетной области. При последующих продувках расчетная область была увеличена.

На других видах заметно образование еще трех завихрений за корпусом, они являются результатом завихрений от гондол двигателей, мест стыков фюзеляжа с вертикальным оперением и вертикального оперения с горизонтальным оперением. Проблема частично решается с помощью обтекателей, но их не удалось реализовать на этой модели, так как данной системе автоматизированного проектирования тяжело обрабатывать уже имеющуюся модель. На рис. 13 представлено завихрение, которое получается от гондол двигателей.

Был произведен отдельный расчет движения частиц и их реальное взаимодействие с корпусом экраноплана. Результат представлен на рис. 14.

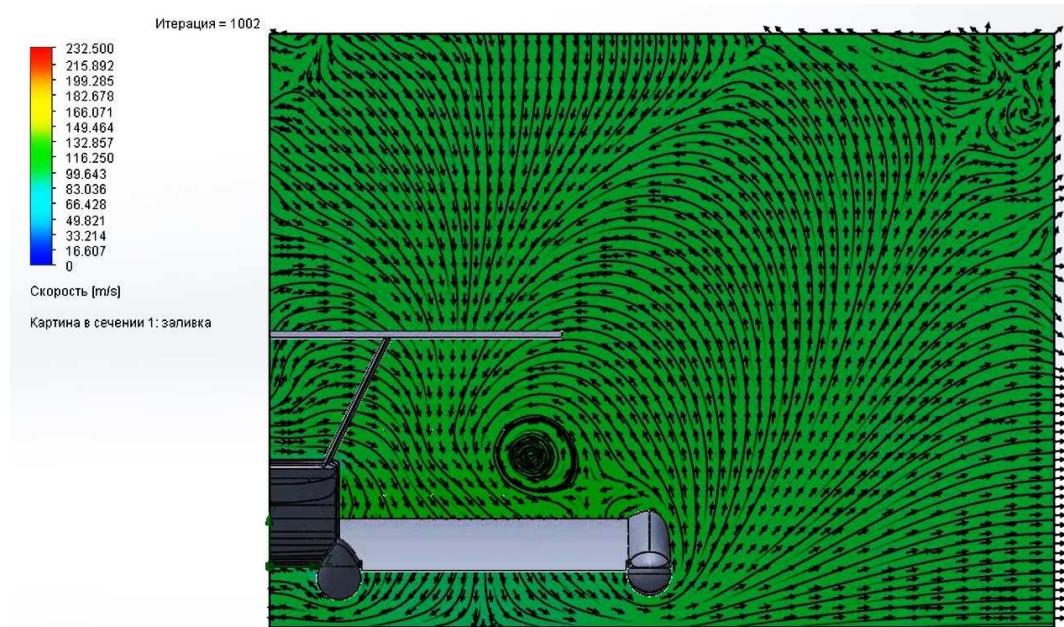


Рис. 13. Вид сзади на экраноплан при оценке образования завихрений от гондол двигателей

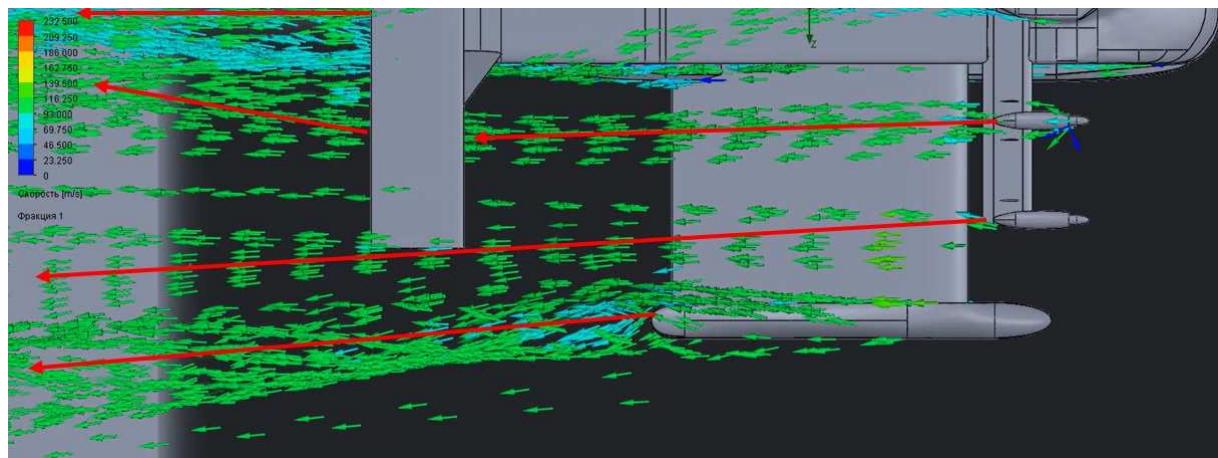


Рис. 14. Объемная картина реального движения частиц, вид сверху

Другие визуализации аэродинамики экраноплана представлены на рис. 15 — 17.

Источники [1] и [10] подтвердили оптимальность выбранных параметров расчета (расчетная область, оптимальное число расчетных ячеек, граничные условия и др.). Дальнейшие расчеты осуществлялись по аналогичному методу.

Стоит отметить, что не все удалось реализовать подобно источникам, в частности гексаэдрическую сетку. Для расчетов использовалась сетка из тетраэдров, она усложняет расчет (делает его дольше и требует больше вычислительных ресурсов), а также снижает точность полученных результатов (зачастую косвенно, так как приходится уменьшать число ячеек или конечных объемов, если расчет ведется по методу конечных объемов, а не по методу конечных элементов).

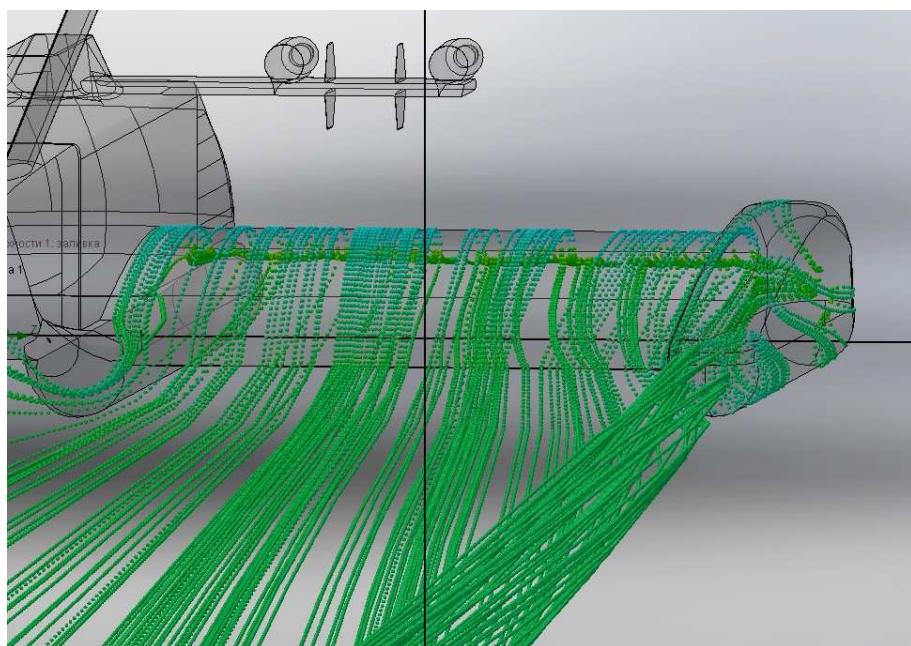


Рис. 15. Визуализация движения потока между баллоном и концевой шайбой

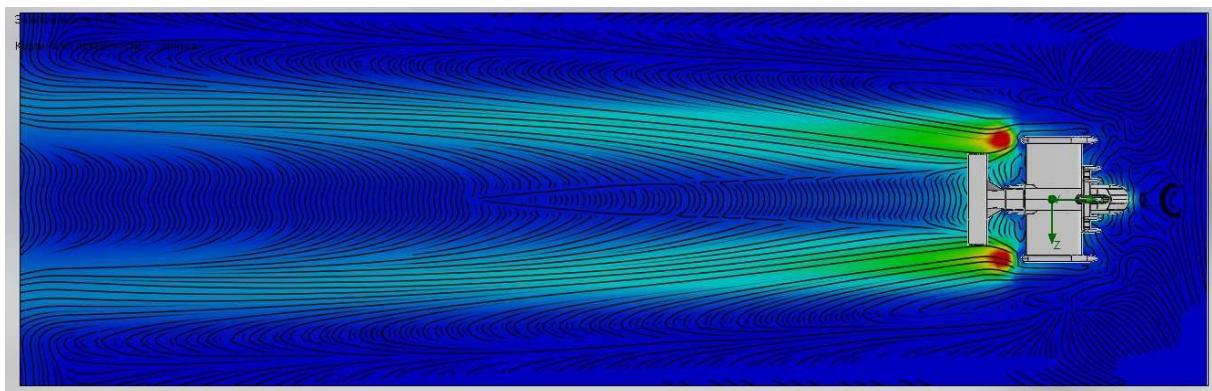


Рис. 16. Визуализация движения потоков и их возмущающее воздействие, вид сверху

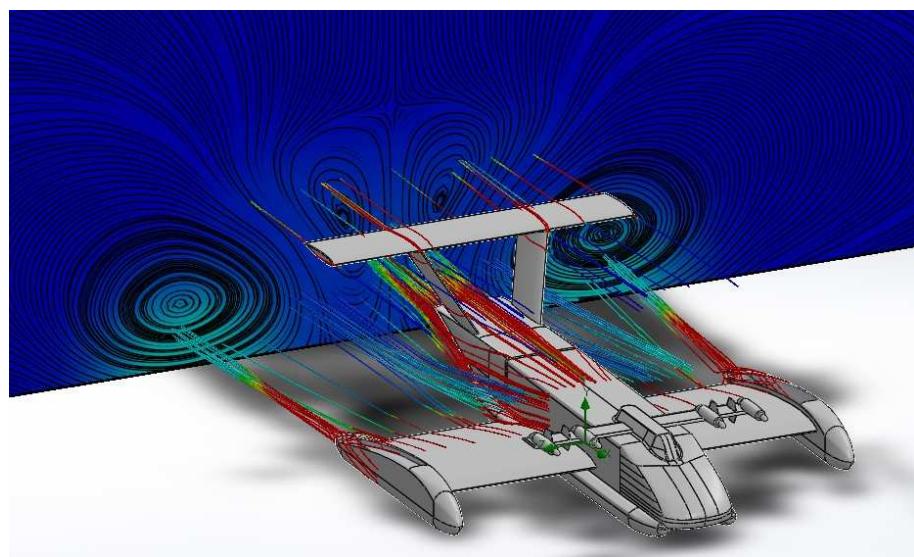


Рис. 17. Визуализация завихрений экраноплана

Взлетная масса исследуемого аппарата составляет 642 т. Аэродинамическая схема аналогична схеме радиоуправляемой модели. В табл. 4 представлены результаты продувки в системе автоматизированного проектирования. На рис. 18 — 23 представлены другие виды визуализации аэродинамики экраноплана.

Таблица 4

Результаты продувки с новыми граничными условиями

Случай продувки	Подъемная сила, Н	Сила сопротивления, Н
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=0^\circ$)	$3,543 \cdot 10^6$	$5,727 \cdot 10^5$
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=4^\circ$)	$7,992 \cdot 10^6$	$1,440 \cdot 10^6$
Вне экрана ($h=60$ м; $\alpha=0^\circ$)	$2,071 \cdot 10^6$	$3,236 \cdot 10^5$

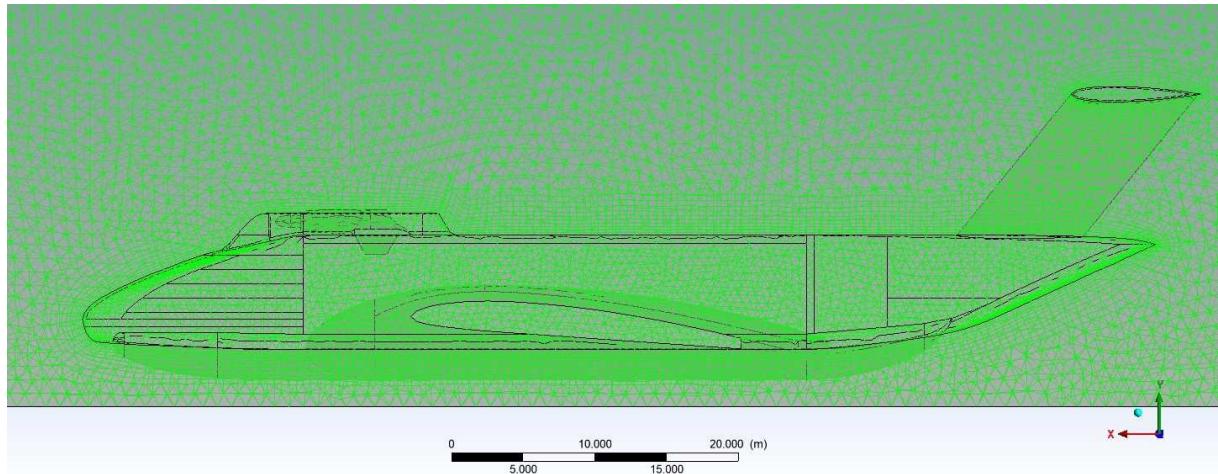


Рис. 18. Расчетная сетка экраноплана и окружающей области

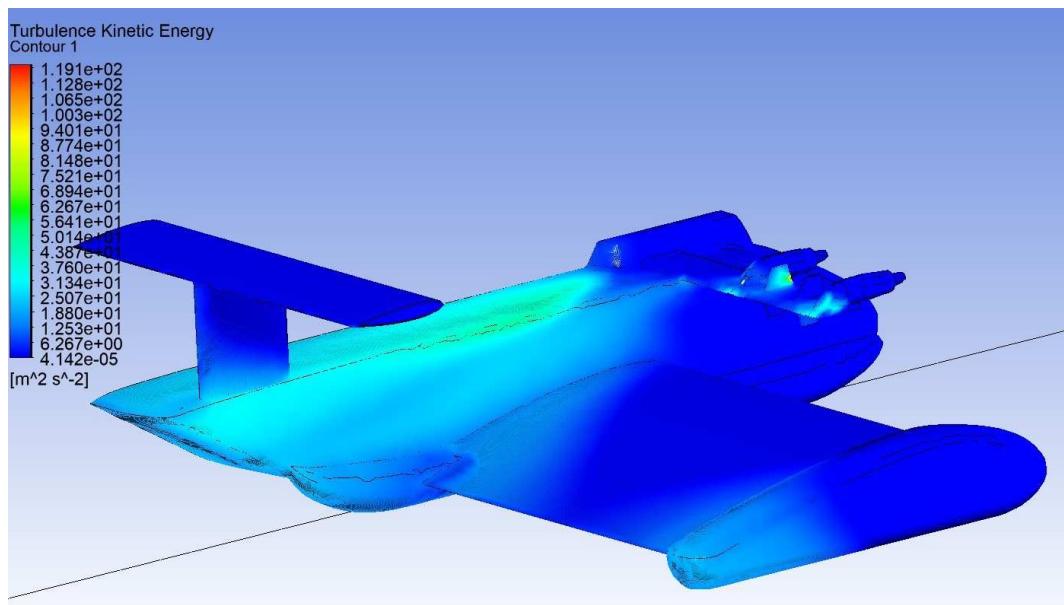


Рис. 19. Визуализация наибольших сопротивлений от завихрений (чем ярче оттенок, тем больше сопротивления)

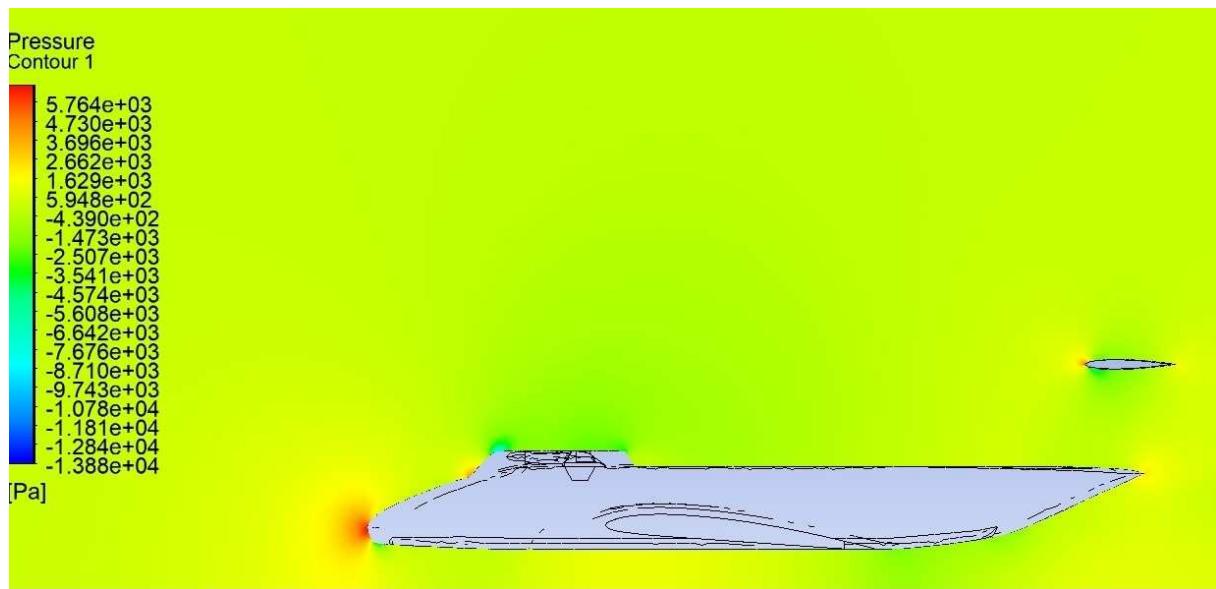


Рис. 20. Визуализация распределения давлений по контуру экраноплана

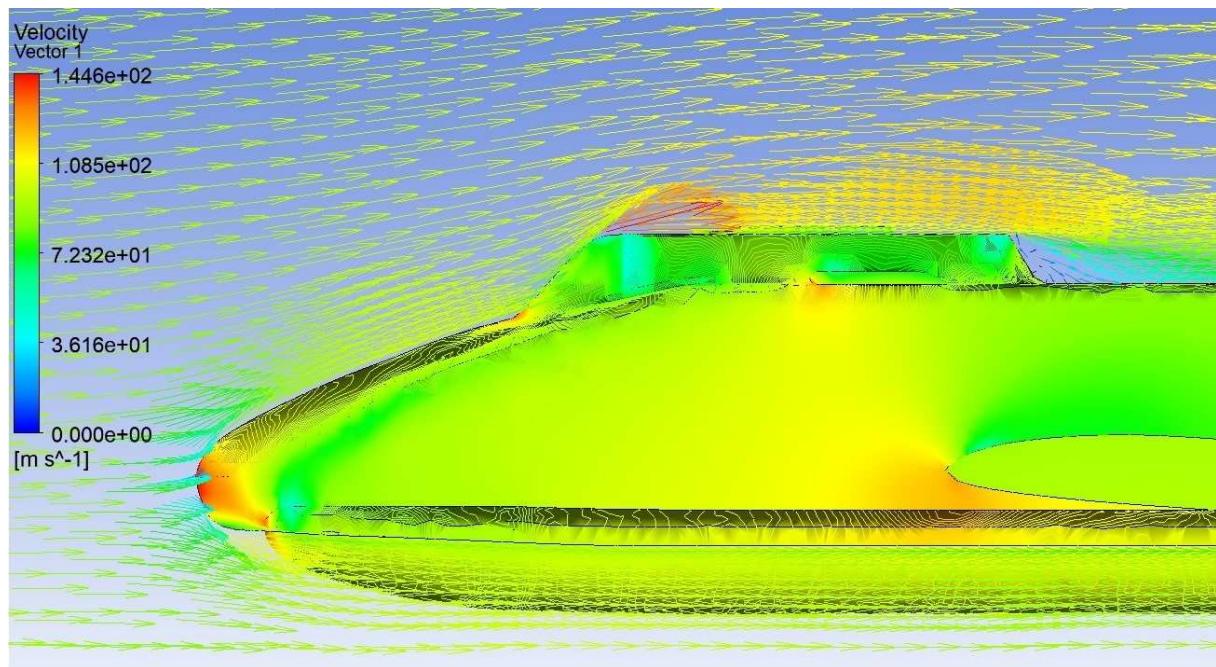


Рис. 21. Визуализация траекторий движения потоков

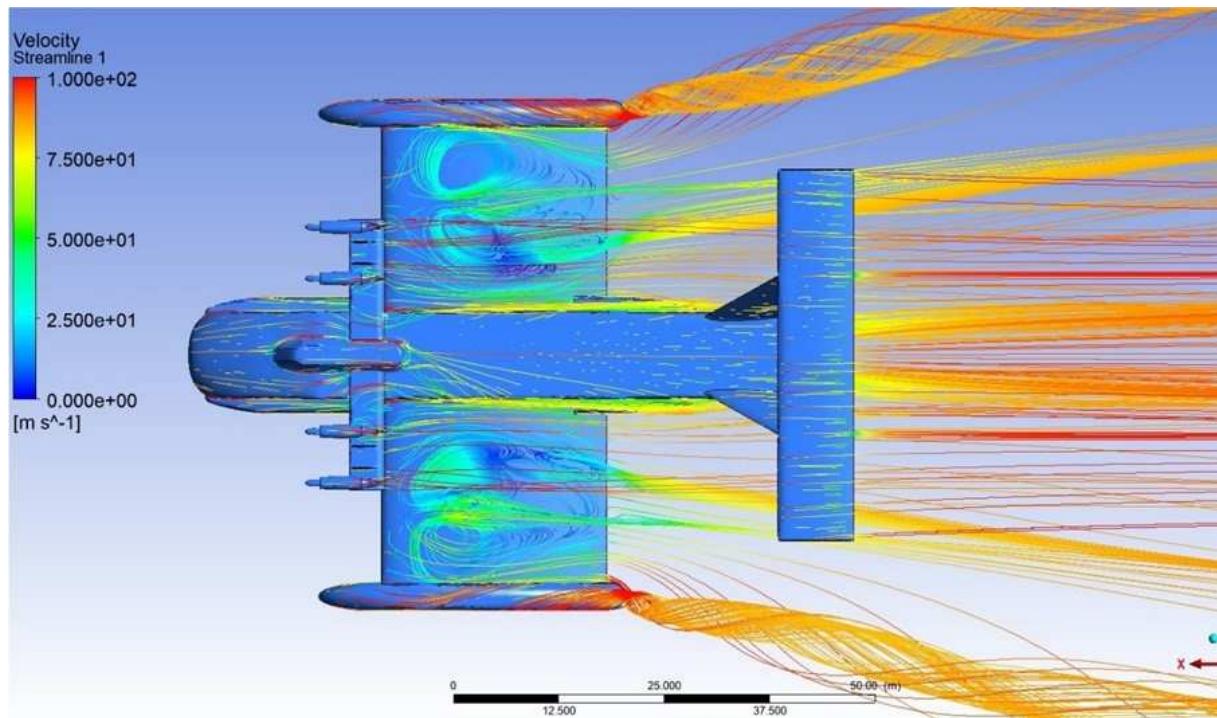


Рис. 22. Визуализация завихрений и срыва потока на крыле экраноплана

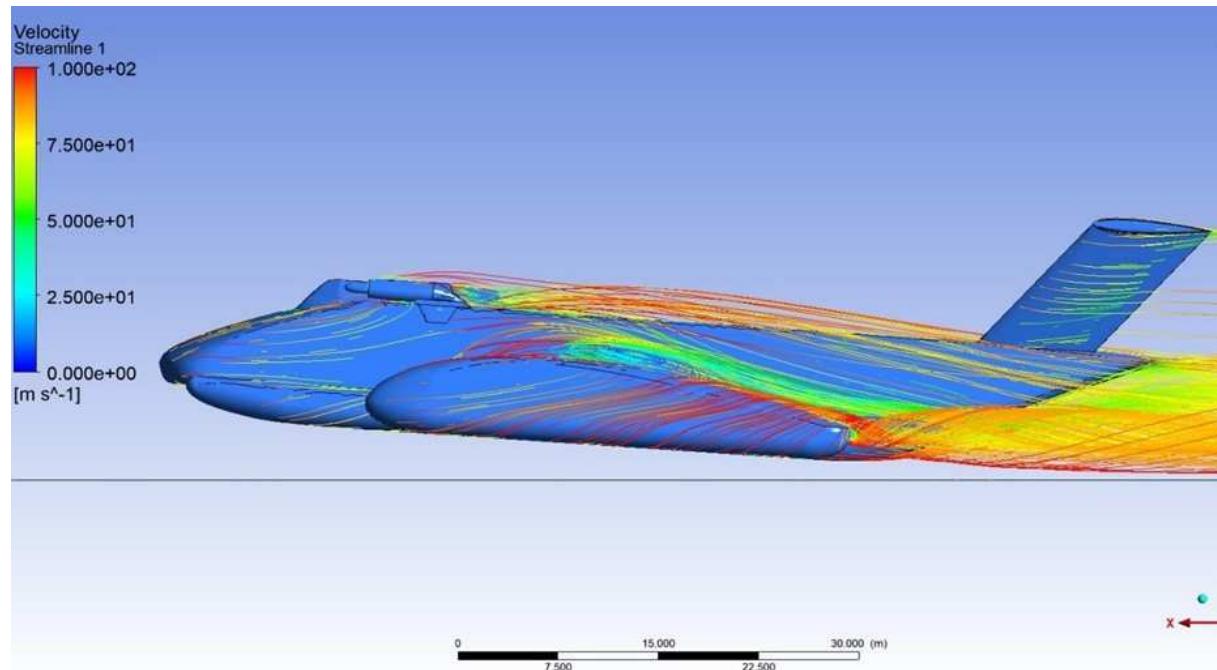


Рис. 23. Визуализация завихрений, вид сбоку

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания моделей на стенах, корде, катапульте и испытания свободнолетающей модели можно сочетать с испытаниями CAD-моделей в системе автоматизированного проектирования, они дополняют друг друга, помогая получить недостающую информацию на начальных этапах (аванпроект, эскизный проект). Визуализация обтеканий позволяет заранее обнаружить проблемные зоны (срывы потоков, завихрения и их контакт с несущими поверхностями, явное избыточное сопротивление в местах контакта корпуса с обтекающей средой и др.), с которыми далее надо работать, чтобы оптимизировать аэродинамическую поверхность экраноплана и усовершенствовать его эксплуатационные характеристики.

Полученные данные и результаты исследований, представленные в источниках [1], [9], [10], свидетельствуют о том, что применение систем автоматизированного проектирования на начальных этапах проектирования позволяет определить первичные характеристики проектируемого аппарата (в данном случае речь идет об экранопланах, но данная методика может быть применима и к другим видам судов). На начальных этапах проектирования применение систем автоматизированного проектирования ускоряет и удешевляет доработку аппарата, что подтверждает исследования из источника [1, с. 103, 105], где представлена экономическая оценка применения систем автоматизированного проектирования (закупка лицензий, обучение персонала, постройка виртуальных моделей для испытаний) по отношению к модельным экспериментам (путь от постройки к экспериментам).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Февральских А.И. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. канд. техн. наук / А.И. Февральских. — Н. Новгород, 2017. — 175 с.
2. Кирилловых В.Н. История ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева. Т. 1. Ростислав Евгеньевич Алексеев в истории создания ЦКБ по судам на подводных крыльях / В.Н. Кирилловых, Т.Р. Алексеева, Ю.П. Чернигин. — Н. Новгород: Кварц, 2015. — 336 с.
3. Кирилловых В.Н. История ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева. Т. 2. Боевые экранопланы конструктора Алексеева / В.Н. Кирилловых, А.А. Беляев, О.В. Салахова. — Н. Новгород: АО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева»; Кварц, 2020. — 304 с.
4. Ильин В.Е. Экранопланы / В.Е. Ильин // Техническая информация. — 2011. — Вып. 4 — 5. — 80 с. (Новости зарубежной науки и техники. Серия: Авиационная и ракетная техника)
5. ST Engineering clinches launch customer for Wing-In-Ground AirFish // FlightGlobal. [Электронный ресурс] URL: <https://www.flightglobal.com/aerospace/st-engineering-clinches-launch-customer-for-wing-in-ground-airfish/157035.article> (дата обращения: 09.02.2025).
6. Экраноплан как конкурент Евростару. Старая идея обретает ренессанс и потенциал коммерческого применения в Европе. 20.06.2021 // Зелёная точка старта. [Электронный ресурс] URL: <https://greenstartpoint.ru/ekranoplan-kak-konkurent-evrostaru-staraya-ideya-obreetaets-renessans-i-potenzial-kommercheskogo-primeneniya-v-evrope/> (дата обращения: 09.02.2025).
7. Во Франции построили катамаран, который взлетает над водой и почти не потребляет топлива. 24.07.2021 // novate [Электронный ресурс] URL: <https://novate.ru/blogs/240721/59890/> (дата обращения: 09.02.2025).
8. Болотин А.А., Попов А.Н., Чеботаев В.Ф. Изучение аэродинамических характеристик модели экраноплана / А.А. Болотин, А.Н. Попов, В.Ф. Чеботаев. — Н. Новгород: НГТУ, 2001. — 18 с.
9. Демешко Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке: в 2 кн. / Г.Ф. Демешко. — СПб.: Судостроение, 1992. — 269 с.
10. Блохин В.Н. Применение методов вычислительного эксперимента для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения / В.Н. Блохин, В.М. Прохоров, П.С. Калъясов, А.К. Якимов и др. // Математическое моделирование. Оптимальное управление методов вычислительного эксперимента для определения. — 2012. — № 3. — С. 147 — 154.
11. Wang H. Computational aerodynamics and flight stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft / H. Wang, C.J. Teo, B.C. Khoo, C.J. Goh // Procedia Engineering. — 2013. — Vol. 67. — P. 15 — 24.

REFERENCES

1. Fevralskikh A.I. Razrabotka metodiki proektirovaniya aerogidrodinamicheskoi komponovki amfibiinogo sudna na vozдушноi podushke s aerodinamicheskoi razgruzkoi na osnove chislennogo modelirovaniya [Development of a methodology for designing the aerohydrodynamic layout of an amphibious hovercraft with aerodynamic unloading based on numerical modeling: PhD thesis]. Nizhny Novgorod, 2017. 175 p.
2. Kirillov V.N., Alekseeva T.R., Chernigov Yu.P. Istorya TsKB po sudam na podvodnykh krylyakh im. R.E. Alekseeva. T. 1. Rostislav Evgen'evich Alekseev v istorii sozdaniya TsKB po sudam na podvodnykh krylyakh [The history of the Central design bureau for hydrofoil vessels named after R.E. Alekseev. Vol. 1. Rostislav Evgenievich Alekseev in the history of the creation of the Central design bureau for hydrofoil vessels]. Nizhny Novgorod: Quartz, 2015. 336 p.
3. Kirillov V.N., Belyaev A.A., Salakhova O.V. Istorya TsKB po sudam na podvodnykh krylyakh im. R.E. Alekseeva. T. 2. Boevye ekranoplany konstruktora Alekseeva [The history of the Central design bureau for hydrofoils named after R.E. Alekseev. Vol. 2. Combat ekranoplans designed by Alekseev]. Nizhny Novgorod: JSC Central design bureau for SEC named after R.E. Alekseev; Quartz, 2020. 304 p.
4. Ilyin V.E. Ekranoplany [Ecranoplans]. *Tekhnicheskaya informatsiya* [Technical Information]. 2011. No. 4-5. 80 p. (News of foreign science and technology. Series: Aviation and rocket technology.)
5. ST Engineering clinches launch customer for Wing-In-Ground AirFish. *FlightGlobal*. URL: <https://www.flighthglobal.com/aerospace/st-engineering-clinches-launch-customer-for-wing-in-ground-airfish/157035.article> (accessed 09.02.2025).
6. Ekranoplan kak konkurent Evrostaru. Staraya ideya obretaet renessans i potentsial kommercheskogo primeneniya v Evrope [Ekranoplan as a competitor to Eurostar. An old idea is gaining a renaissance and the potential for commercial application in Europe]. 20.06.2021. *Green Starting Point*. URL: <https://greenstartpoint.ru/ekranoplan-kak-konkurent-evrostaru-staraya-ideya-obretaet-renessans-i-potenczial-kommercheskogo-primeneniya-v-evrope/> (accessed 09.02.2025).
7. Vo Frantsii postroili katamaran, kotoryi vzletaet nad vodoi i pochti ne potrebliaet topliva [In France, they built a catamaran that takes off above the water and consumes almost no fuel]. 24.07.2021. *novate*. URL: <https://novate.ru/blogs/240721/59890/> (accessed 09.02.2025).
8. Bolotin A.A., Popov A.N., Chebotaev V.F. Izuchenie aerodinamicheskikh kharakteristik modeli ekranoplana [Studying the aerodynamic characteristics of the ekranoplan model]. Nizhny Novgorod: NGTU, 2001. 18 p.
9. Demeshko G.F. Proektirovaniye sudov. Amfibiinyye suda na vozдушnoi podushke [Ship design. Amphibious hovercraft: in 2 books]. St. Petersburg: Shipbuilding, 1992. 269 p.
10. Blokhin V.N., Prokhorov V.M., Kalyasov P.S., Yakimov A.K. et al. The application of computer simulation for the determination of wing craft aerodynamic characteristics in a cruising regime // Mathematical modeling. Optimal control of computational experiment methods to determine. 2012. No. 3. P. 147 — 154. (In Russ.)
11. Wang H., Teo C.J., Khoo B.C., Goh C.J. Computational aerodynamics and flight stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 67. 15 — 24.

УДК 621.74:624.012
EDN CREIVW

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РУЛЕЙ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, ПОВЫШАЮЩЕЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

В.О. Бессонова, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: bessonchik99@gmail.com

А.П. Аносов, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

Рули изменяемого профиля, то есть снабженные в общем случае закрылком и предкрылком, обладают существенно большей эффективностью, чем обычные рули. Известные конструкции таких рулей обладают рядом недостатков, несовершенств и накладывают конструктивно обусловленные ограничения на их технические характеристики. В статье представлены две новые конструкции рулей изменяемого профиля, отличающиеся оригинальными приводами для управления подвижными элементами пера руля, а также устройство, улучшающее гидродинамические характеристики руля изменяемого профиля. Эти технические решения устраняют значительную часть имеющихся недостатков.

Ключевые слова: управляемость судна, гидродинамические характеристики руля, руль изменяемого профиля, привод подвижных частей пера руля.

Для цитирования: Бессонова В.О. Новые конструкции рулей изменяемого профиля и техническое решение, повышающее их эффективность / В.О. Бессонова, А.П. Аносов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 50 — 63. EDN CREIVW.

THE NEW CONSTRUCTION OF THE VARIABLE PROFILE RUDDERS AND A TECHNICAL SOLUTION FOR INCREASING EFFICIENCY

В.О. Бессонова, PhD student, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: bessonchik99@gmail.com

А.П. Аносов, DSc, Professor, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

The rudders of variable profile, such as equipped with a flap and a pre-flap, have essentially higher efficiency than traditional rudders. Known designs of flap rudders have a few disadvantages, imperfections and impose constructive limitations on their technical characteristics. The article presents two new designs of rudders of variable profile, characterized by original actuators for controlling the moving elements of the rudder, as well as a device that improves the hydrodynamic characteristics of the rudder of variable profile. These technical solutions eliminate a significant part of the existing defects.

Key words: maneuverability of a ship, hydrodynamic characteristics of a rudder, variable profile rudder, flap rudder, actuator of moving elements of a rudder.

For citation: Bessonova V.O., Anosov A.P. The new construction of the variable profile rudders and a technical solution for increasing efficiency. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 50 — 63. EDN CREIVW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы управляемости судов и результаты исследований технических характеристик традиционных судовых рулей исчерпывающе освещены в специальной литературе, например [1 — 3].

Рули изменяемого профиля, то есть по аналогии с авиационными крыльями и крыльями динамических успокоителей качки [4, 5] снабженные в общем случае закрылком и предкрылком, обладают существенно большей эффективностью, чем обычные рули. Несмотря на это, информация об их практическом использовании, конструктивных особенностях и технических характеристиках в научной и технической литературе практически отсутствует за исключением кратких упоминаний рулей с закрылками в интернет-ресурсах, в основном в качестве рекламы (рис. 1).



Рис. 1. Рули изменяемого профиля с закрылком: *а* — руль Becker; *б* — руль Heracles

В департаменте морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ разработано несколько конструкций рулей изменяемого профиля, защищенных патентами на изобретения и полезные модели, например [6 — 10], часть из которых, кроме отклоняемого закрылка, включает отклоняемый предкрылок (в авиационной терминологии — отклоняемый носок), что дополнительно повышает эффективность руля. Применительно к судам ледового плавания выполнены некоторые исследования гидродинамических характеристик рулей изменяемого профиля [11, 12].

Конструкция механизмов поворота подвижных частей руля в зависимости от угла перекладки основной части должна быть максимально простой по конструкции и по возможности не требующей дополнительного привода. В статье приведено описание новых конструкций таких механизмов, разработанных с учетом отдельных недостатков известных конструкций. Поданы заявки на патентование этих конструкций.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗВЕСТНЫХ РУЛЕЙ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ

Принцип действия наиболее эффективного руля, снабженного поворотными закрылками и предкрылком, состоит в следующем. При перекладке основной части руля автоматически с помощью того или иного механизма осуществляется поворот закрылка и предкрылка. При этом должно обеспечиваться оптимальное с точки зрения наибольшей эффективности руля соотношение улов поворота всех его частей.

На рис. 2 показано устройство руля изменяемого профиля, снабженного только закрылком [5] (в литературе упоминаются рули только этого типа). За счет выбора параметров механизма поворота закрылка оптимизирован угол его поворота в зависимости от угла перекладки основной части.

Принцип действия механизма поворота закрылка очевиден из рис. 2б. Наилучшее с точки зрения наибольшей эффективности руля соотношение угла перекладки основной части руля и угла поворота закрылка относительно основной части обеспечивается определенным расстоянием от точки крепления румпеля к закрылку до закрепленной на корпусе поворотной опорной втулки, сквозь которую румпель проходит.

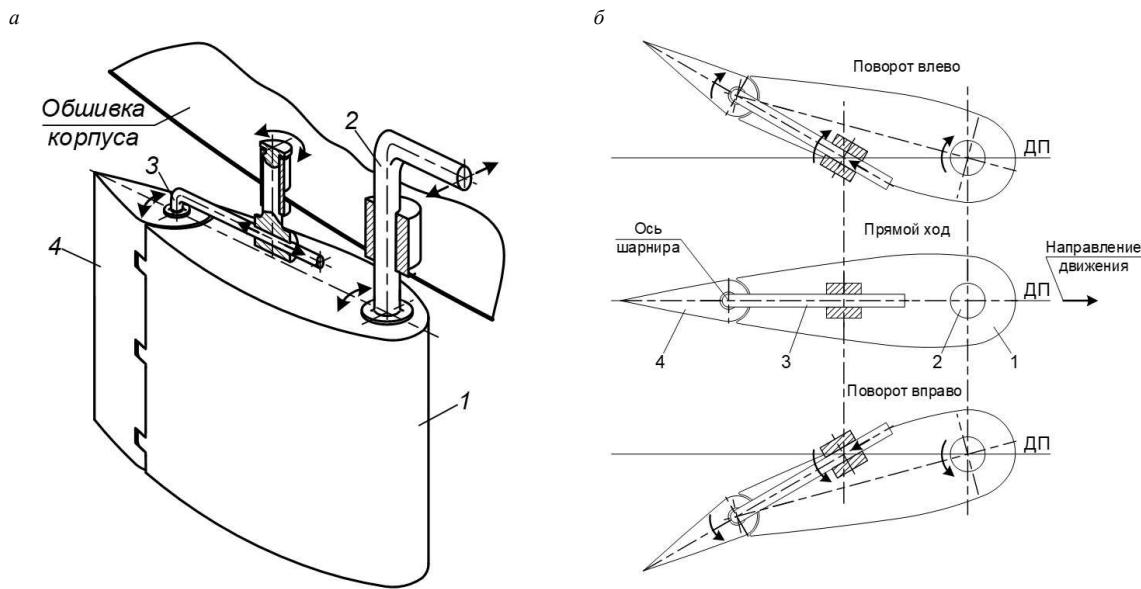


Рис. 2. Руль изменяемого профиля [6]: а — общий вид; б — принцип действия механизма поворота закрылка; 1 — основная часть руля; 2 — баллер; 3 — румпель закрылка; 4 — закрылок

Недостатком этого рулевого устройства является то, что при повороте в сторону любого борта независимо от направления движения (передним или задним ходом) профиль руля принимает форму, наиболее эффективную при движении передним ходом. При движении задним ходом такая форма руля по отношению к набегающему с кормы потоку наименее эффективна, и ее эффективность ниже, чем у обычного руля с неизменяемой формой профиля. Снижение управляемости усугубляется тем, что при движении задним ходом судно всегда хуже «слушается» руля из-за пониженной скорости движения.

Данный недостаток устранен в рулевом устройстве, представленном в [9] (рис. 3). Это достигается тем, что вертикальная ось поворота опорной втулки, которая в предыдущем устройстве неподвижно закреплена в диаметральной плоскости (ДП), в данном случае имеет возможность управляемого смещения в ту и другую сторону от ДП, что и дает возможность создавать необходимую, оптимальную при каждом маневре, кривизну профиля руля (рис. 3б, в).

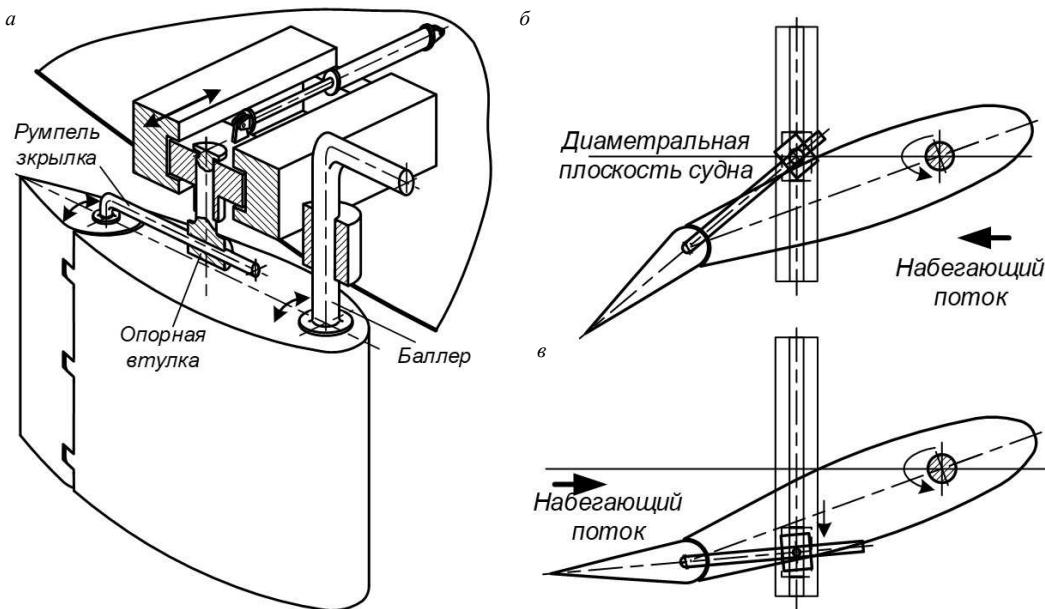


Рис. 3. Руль изменяемого профиля [9]: а — общий вид; принцип действия механизма поворота закрылка: б — передний ход, поворот в сторону правого борта; в — задний ход, поворот в сторону правого борта

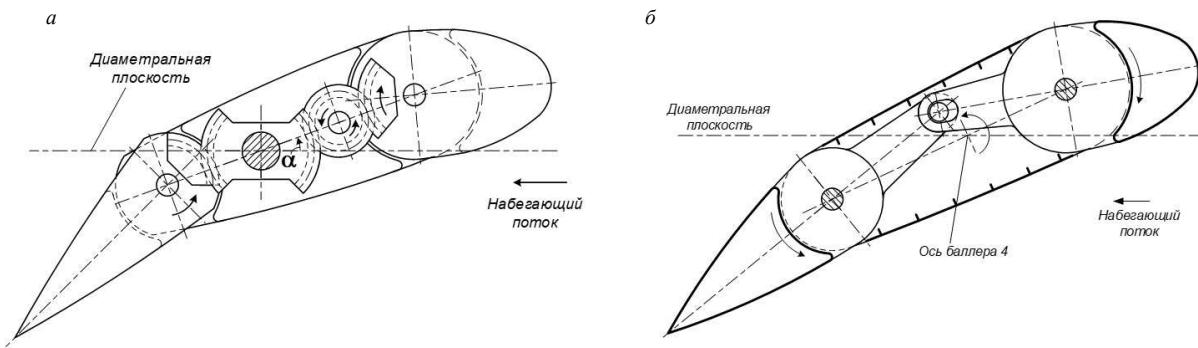


Рис. 4. Зубчатый (а) [8] и рычажный (б) [7] приводы поворота предкрылка

Поворот предкрылка осуществляется дополнительной механической передачей, связывающей его с закрылком. Величина углов поворота закрылка и предкрылка также взаимно обусловлена из соображений максимальной эффективности руля и определяется конструктивными параметрами передачи.

Различные механизмы, связывающие закрылки и предкрылки, основаны в большинстве случаев на двух механических передачах — зубчатой и рычажной (рис. 4).

Принцип действия обоих механизмов очевиден из рисунка и не требует особых комментариев. При этом оба устройства имеют конструктивно обусловленные недостатки.

Достоинство данного зубчатого привода заключается в том, что нет необходимости в отдельном приводе для закрылка: и закрылок, и предкрылок поворачиваются независимо друг от друга в зависимости от перекладки основной части руля.

Недостаток этого механизма состоит в том, что зубчатый элемент привода, ось которого совпадает с осью баллера (на рис. 4а заштрихован), должен быть жестко закреплен на неподвижной опоре, в данном случае на пятке ахтерштевня. В силу этой особенности все зубчатые элементы передачи открыто расположены ниже пера руля, работают в морской воде и не защищены от возможных внешних воздействий.

Рычажный привод (рис. 4б) конструктивно прост и находится во внутренней полости основной части руля, то есть надежно защищен. Однако это достоинство в определенных обстоятельствах создает непреодолимую проблему. Если руль имеет тонкий профиль, это может недопустимо ограничить возможный поворот рычагов и, значит, углы отклонения закрылка и предкрылка.

Целью работы является разработка таких рулей изменяемого профиля, которые лишены указанных недостатков. Ниже приведено описание разработанных конструкций двух рулей, в которых приводы поворота закрылка и предкрылка компактны и надежно защищены. В обоих случаях с помощью устройства, описанного в [9], первоначально осуществляется необходимый поворот закрылка, в зависимости от которого посредством одного из двух рассматриваемых устройств обеспечивается соответствующий поворот предкрылка.

Кроме того, разработано устройство, улучшающее гидродинамические качества руля за счет предотвращения срыва потока при больших углах перекладки руля.

ПЕРО РУЛЯ С ВНУТРЕННИМ ЗУБЧАТЫМ ПРИВОДОМ ПОВОРОТА ПРЕДКРЫЛКА

Рулевое устройство разработано на основе синтеза двух известных технических решений. Первое из них — руль с закрылком с возможностью обеспечения формы профиля, оптимальной при движении как передним, так и задним ходом [9] (рис. 3), второе — руль с закрылком и предкрылком с зубчатыми приводами поворота того и другого в зависимости от угла перекладки основной части руля [7] (рис. 4а).

Конструкция нового рулевого устройства показана на рис. 5.

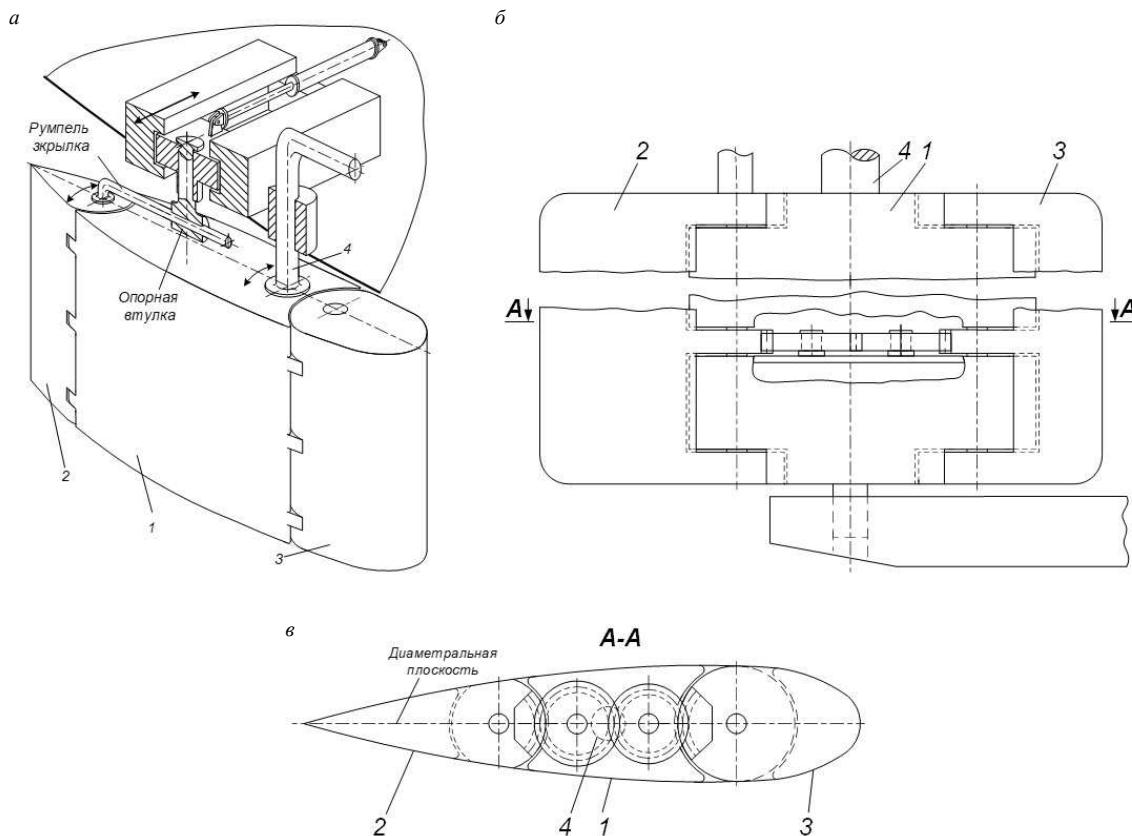


Рис. 5. Общий вид рулевого устройства (а), боковой вид пера руля (б) и сечение А-А, обозначенное на боковом виде (в):
1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 4 — баллер

Рулевое устройство включает перо руля 1, закрылок 2 и предкрылок 3, сопряженные друг с другом посредством шарниров. Перо руля жестко соединено с баллером 4. Во внутренней полости пера руля на платформе расположены две находящиеся в зацеплении друг с другом шестерни, закрепленные на ней вертикальными осями с возможностью свободного вращения. При этом одна из шестерней находится в зацеплении с зубчатым сектором, сопряженным с петлей закрылка, а другая находится в зацеплении с зубчатым сектором, сопряженным с петлей предкрылка.

На рис. 6а показано горизонтальное сечение руля в повернутом положении для разворота судна вправо при движении передним ходом. При развороте судна влево повернутый руль примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

При движении задним ходом закрылок и предкрылок при повороте влево по отношению к направлению движения займут положение, показанное на рис. 6б, а при развороте судна вправо руль примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

Как уже говорилось ранее, ведущей из двух отклоняемых частей руля в данном техническом решении является закрылок, а при его автоматическом отклонении при перекладке руля через зубчатую передачу осуществляется поворот предкрылка. Кинематика механизма очевидна из рис. 6.

Относительная компактность и простота привода в виде зубчатой передачи в сравнении с другими механизмами дает возможность его размещения в ограниченной по размерам внутренней полости основной части пера руля, обеспечивая тем самым защиту механизма от возможных внешних механических воздействий.

Соотношение величин углов поворота предкрылка 3 и закрылка 2 относительно пера руля ϕ_1 и ϕ_2 соответственно зависит от соотношения диаметров делительных окружностей зубчатых секторов 7 и 8 и не зависит от диаметров делительных окружностей промежуточных шестерней.

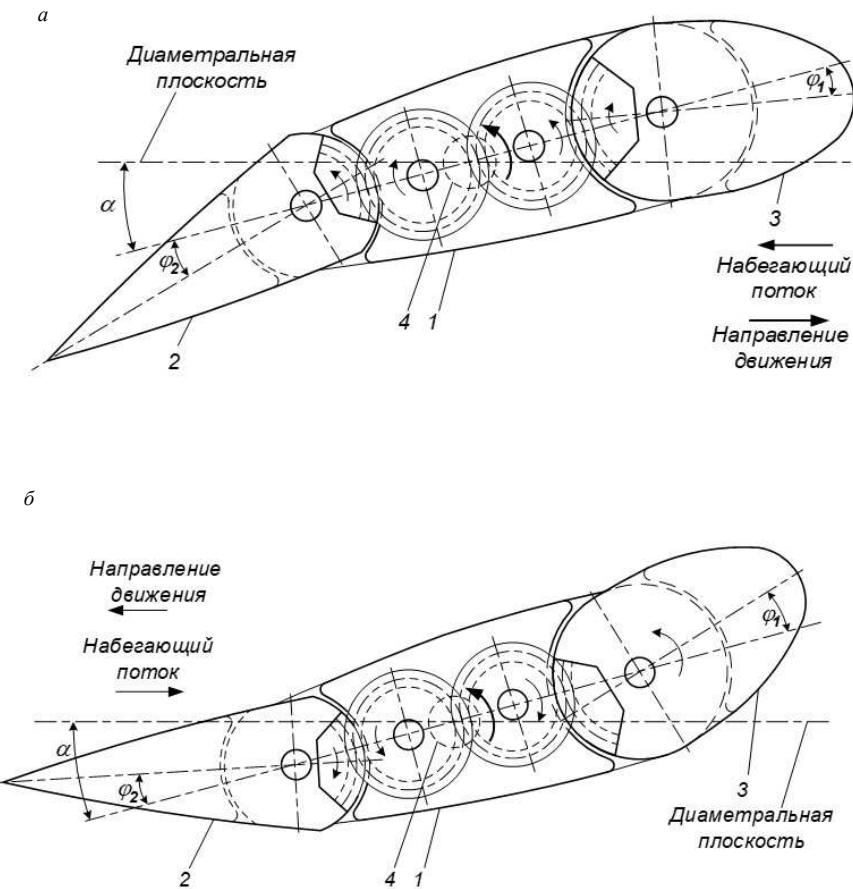


Рис. 6. Форма профиля руля при повороте вправо при движении передним ходом (а); то же при повороте влево по отношению к направлению движения задним ходом (б)

На рис. 7 показаны делительные окружности, четыре зубчатых колеса, находящихся в зацеплении. Под d_1 и d_2 подразумеваются зубчатые секторы, жестко закрепленные на предкрылке и закрылке соответственно, а под величинами φ_1 и φ_2 — углы их поворота.

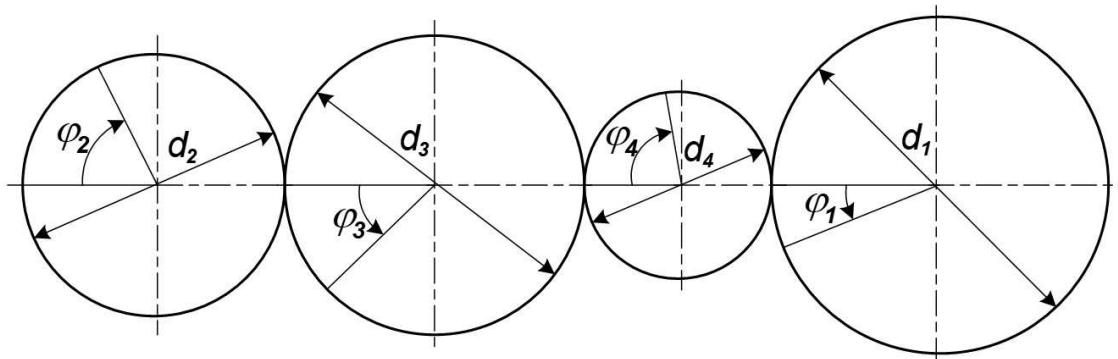


Рис. 7. К определению соотношения углов отклонения предкрылка φ_1 и закрылка φ_2 относительно пера руля

Опуская подробные выкладки, запишем соотношение между углами поворота предкрылка и закрылка:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \frac{d_2}{d_1}. \quad (1)$$

Соотношение диаметров делительных окружностей зубчатых секторов закрылка и предкрылка выбирается в соответствии с (1). Оптимальное для наибольшей эффективности руля соотношение углов φ_1 и φ_2 при движении как передним, так и задним ходом должно быть определено на основе гидродинамического исследования. Диаметры промежуточных шестерней, которые не имеют определяющего значения, следует находить конструктивно.

ПЕРО РУЛЯ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ПОВОРОТА ПРЕДКРЫЛКА

В данном рулевом устройстве поворот закрылка в зависимости от перекладки основной части руля осуществляется так же, как в рассмотренном выше устройстве (рис. 5а). При этом поворот предкрылка в зависимости от поворота закрылка осуществляется посредством гидравлического привода.

Гидравлический привод более компактен по сравнению с рычажным механизмом, как в статическом состоянии в положении «руль прямо», так и при максимальном отклонении предкрылка и закрылка. Амплитуда отклонения подвижных элементов гидравлического привода во всем рабочем диапазоне обеспечивает их движение в пределах габаритов внутренней полости пера руля, где размещен этот привод.

На рис. 8 показано горизонтальное сечение пера руля, в месте расположения в его полости гидравлической системы, которая обеспечивает синхронное отклонение предкрылка 3 при отклонении закрылка 2.

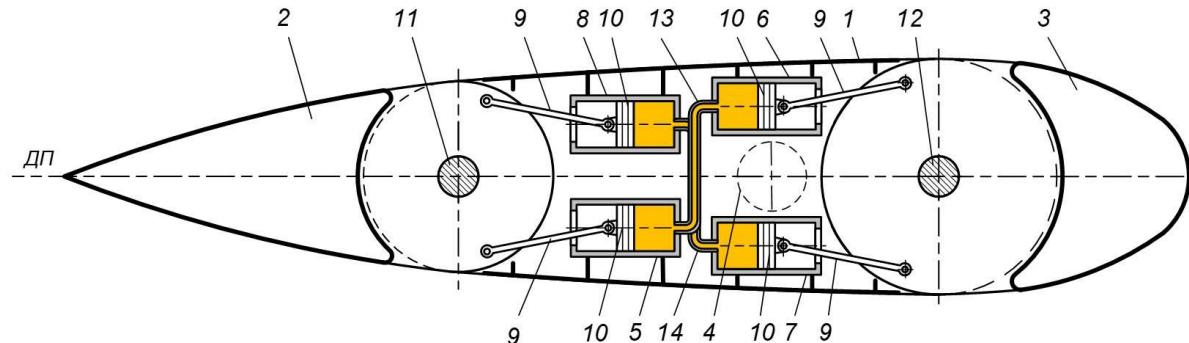


Рис. 8. Руль с гидравлическим приводом поворота предкрылка: 1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 4 — баллер; 5 — 8 — гидравлические цилиндры; 9 — шатуны; 10 — поршни; 11, 12 — оси вращения закрылка и предкрылка соответственно; 13, 14 — трубопроводы цилиндров 5 — 6 и 7 — 8 соответственно

Гидравлическая система, размещенная в полости основной части руля, состоит из двух пар соединенных друг с другом по диагонали цилиндров (5 и 6; 7 и 8). При необходимости, обусловленной ограниченными размерами внутренней полости пера руля, пары цилиндров могут быть разнесены по высоте внутренней полости пера руля. В каждой паре цилиндры, соединенные друг с другом трубопроводом, образуют замкнутую систему. При повороте закрылка гидравлическая жидкость из сопряженного с ним цилиндра нагнетается в соединенный с ним трубопроводом цилиндр, сопряженный с предкрылком, и обеспечивает его поворот.

На рис. 9а показано то же горизонтальное сечение пера руля в повернутом положении при развороте судна вправо. При развороте судна влево повернутое перо руля примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

При движении задним ходом закрылок и предкрылок при повороте влево по отношению к направлению движения займут положение, показанное на рис. 9б, а при развороте судна вправо перо руля примет симметричную относительно диаметральной плоскости форму.

Устройство работает следующим образом (на примере поворота вправо на переднем ходу). При повороте пера руля относительно диаметральной плоскости судна (рис. 9а) происходит автоматический поворот закрылка относительной пера руля в ту же сторону, что и поворот пера руля на угол φ_2 . При этом шатун 9 давит на поршень 10 цилиндра 5, поршень вдвигается в цилиндр, создавая избыточное давление в нем и в соединенном с ним трубопроводом 13 цилиндре 6. Под действием этого давления поршень 10 и сопряженный с ним шатун 9 цилиндра 6 выдвигаются из цилиндра, создавая усилие, которое передается шатуном на петлю шарнира предкрылка и поворачивает его в сторону, противоположную повороту пера руля, на угол φ_1 . При этом в другой паре цилиндров происходит обратный переток жидкости.

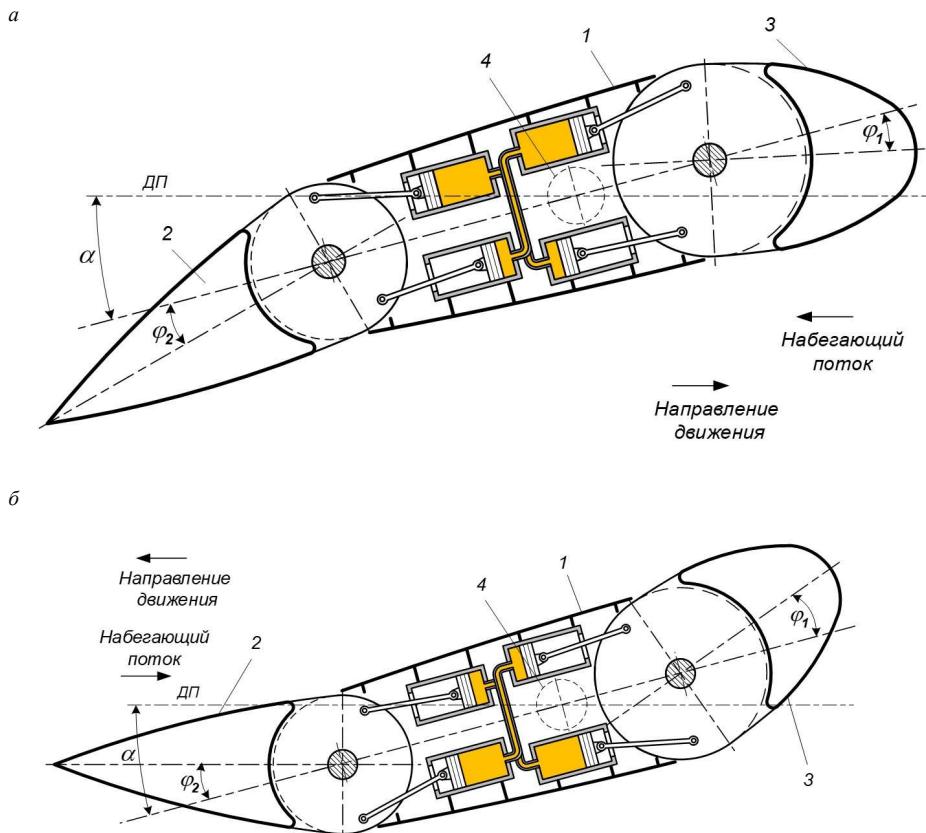


Рис. 9. Положение элементов составного руля с гидравлическим приводом поворота предкрылька:
 а — поворот вправо на переднем ходу; б — поворот влево на заднем ходу; α — угол атаки;
 φ_1 — угол отклонения предкрылька; φ_2 — угол отклонения закрылка

Принцип действия устройства продемонстрирован на примере поворота судна вправо при движении передним ходом. При повороте судна влево имеет место силовая и геометрическая симметрия относительно ДП по отношению к описанной выше.

Рис. 9б иллюстрирует работу гидравлического привода при движении задним ходом.

Величина углов поворота закрылка 2 и предкрылька 3 относительно основной части руля φ_2 и φ_1 соответственно зависят от двух параметров:

- от диаметра поршней цилиндров 5 и 8, а именно d_2 , по отношению к диаметру поршней цилиндров 6 и 7, а именно d_1 ;
- от величины радиуса крепления шатунов цилиндров 5 и 8 на петле шарнира закрылка, а именно r_2 , по отношению к радиусам крепления шатунов цилиндров 6 и 7 на петле шарнира предкрылька, а именно r_1 .

Выбор этих конструктивных параметров на основе соответствующих исследований должен обеспечивать оптимальное для наибольшей эффективности руля соотношение углов φ_1 и φ_2 .

На рис. 10 представлена кинематическая схема взаимодействия одного из гидравлических цилиндров и сопряженных с ним кинематических пар привода поворота закрылка. Аналогичная схема применима для управления предкрыльком.

При повороте закрылка на угол φ_2 ход поршня равен l_2 . При этом шатун АВ займет положение А'В'. а объем рабочей полости уменьшится на величину объема ΔV_2 перетекшей в сопряженный цилиндр предкрылька гидравлической жидкости. Этот объем определяется выражением

$$\Delta V_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} l_2. \quad (2)$$

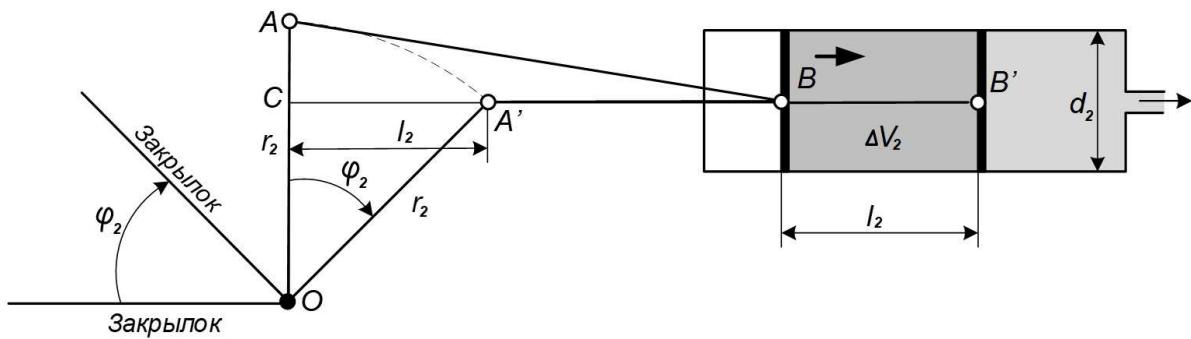


Рис. 10. Кинематическая схема взаимодействия одного из гидравлических цилиндров и сопряженных с ним кинематических пар привода поворота закрылка

При этом объем рабочей полости сопряженного цилиндра предкрылка увеличится на величину

$$\Delta V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} l_1. \quad (3)$$

Из треугольника ОСА' следует

$$l_2 = CA' = r_2 \sin \varphi_2, \quad (4)$$

и аналогично для предкрылка

$$l_1 = r_1 \sin \varphi_1. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (2) и (3) соответственно, запишем

$$\Delta V_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} r_2 \sin \varphi_2; \quad (6)$$

$$\Delta V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} r_1 \sin \varphi_1; \quad (7)$$

Очевидно, что в замкнутой системе цилиндров $\Delta V_1 = \Delta V_2$, то есть

$$\frac{\pi d_1^2}{4} r_1 \sin \varphi_1 = \frac{\pi d_2^2}{4} r_2 \sin \varphi_2,$$

или после сокращения

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \frac{r_2}{r_1}. \quad (8)$$

Как было сказано выше, оптимальное соотношение углов φ_1 и φ_2 должно быть определено по результатам гидродинамических исследований. С использованием зависимости (8) при заданных φ_1 и φ_2 возможны несколько вариантов проектирования элементов устройства.

1. Если используются одинаковые цилиндры, то есть $d_1 = d_2$, то

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{r_2}{r_1}, \quad (9)$$

и радиусы r_1 и r_2 подбираются конструктивно при сохранении пропорции (9).

2. Если радиусы r_1 и r_2 выбраны по конструктивным соображениям, например в связи с ограничениями, налагаемыми размерами профиля, то диаметры цилиндров определяются из соотношения

$$\frac{d_2}{d_1} = \sqrt{\frac{r_1 \sin \varphi_1}{r_2 \sin \varphi_2}}. \quad (10)$$

3. Возможен вариант подбора обоих диаметров и обоих радиусов с использованием зависимости (8).

Преимуществом рассмотренного технического решения является относительная компактность гидравлического привода в статическом состоянии и при работе в сравнении с рычажной конструкцией привода, что дает возможность его размещения в ограниченной по размерам полости пера руля.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО УГЛА АТАКИ РУЛЯ И ЕГО ПОВОРОТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Комплекс отклоняемых частей авиационного крыла принято называть общим термином «механизация крыла». По аналогии уместен термин «механизация руля».

Рис. 11 иллюстрирует эффективность элементов механизации крыла для увеличения подъемной силы, характеризуемой коэффициентом подъемной силы C_y и критического угла атаки α_{kp} , соответствующего максимуму C_y и началу его резкого падения. Видно, что с этой точки зрения наиболее эффективно крыло, снабженное предкрылком и закрылком.

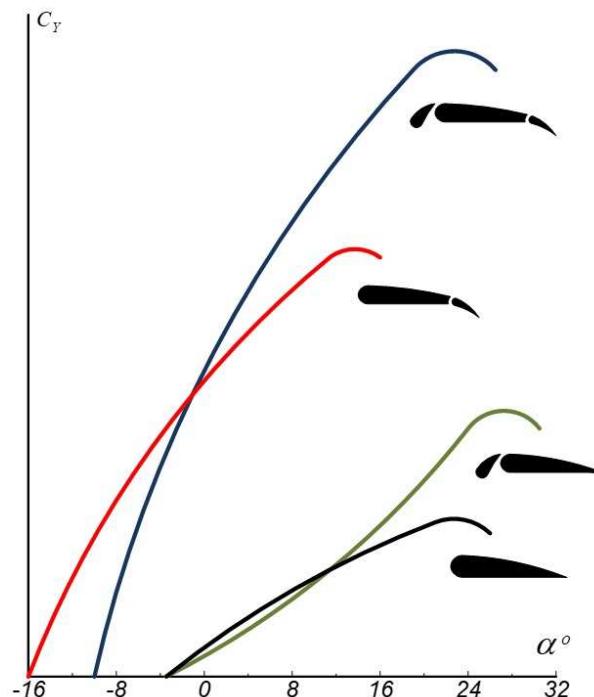


Рис. 11. Эффективность элементов механизации крыла

Для каждого профиля крыла существует критический угол атаки α_{kp} , при превышении которого на верхней поверхности крыла происходит отрыв потока, сопровождающийся резким снижением подъемной силы.

Увеличить подъемную силу (C_y) можно посредством изменения профиля крыла, для чего используется механизация крыла. Отклонение предкрылка и закрылка (рис. 11) и (рис. 12; [13]) меняет кривизну профиля крыла, увеличивая тем самым подъемную силу.

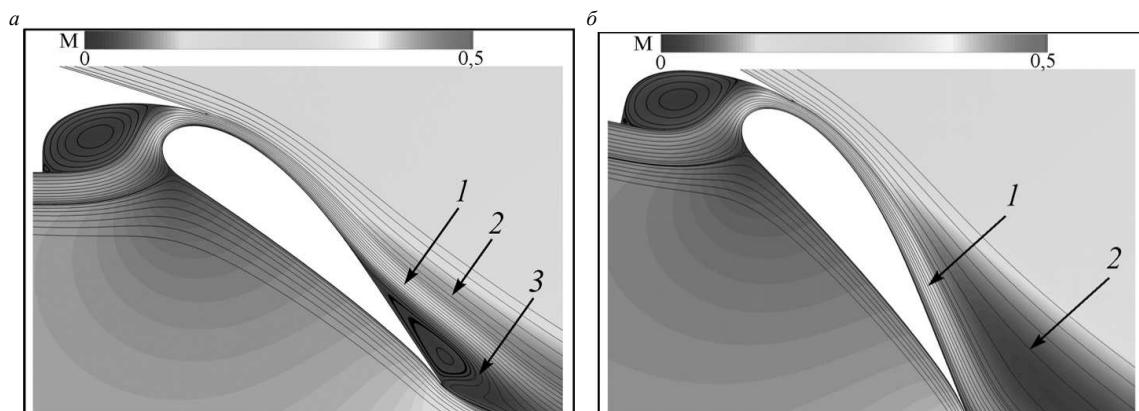


Рис. 12. Картина обтекания хвостовой части крыла при отклонении закрылка на углы $\alpha = 8^\circ$ (а) и $\alpha = 20^\circ$ (б) соответственно: 1 — поток из щели закрылка; 2 — след от основного профиля; 3 — область отрыва [13]

На рис. 12 слева направо показана картина обтекания хвостовой части крыла при отклонении закрылка на углы $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha = 20^\circ$ соответственно [13].

Видно также, что закрылок не только поворачивается на некоторый угол, но еще и отодвигается от кромки крыла, образуя щель. Такие закрылки называются щелевыми.

Поворот закрылка создает излом гладких поверхностей крыла. Результатом этого является отрыв потока, начиная от места излома, со всеми вытекающими последствиями. Наличие щели меняет картину обтекания. Щель представляет собой сужающийся кверху канал. Повышенное с нижней вогнутой стороны крыла давление направляет воздух в щель. При движении в сужающейся щели увеличивается скорость потока. Выходя на верхнюю поверхность, поток обеспечивает безотрывное обтекание закрылка.

Аналогичные эффекты возникают в месте установки предкрылка, который также отклоняется с образованием щели.

На судовых рулях переменного профиля возникают те же явления: отрыв потока сопровождается снижением C_y , то есть управляемости.

Закрылки и предкрылки судовых рулей вращаются вокруг шарниров, то есть выдвижение с образованием щели не предусмотрено, а простой перенос механизма привода движения элементов механизации самолетного крыла на судовой руль невозможен из-за его относительной сложности и «хрупкости». Неизбежны повреждения при столкновении с плавающими предметами и особенно со льдом.

Для обеспечения безотрывного обтекания руля переменного профиля в рабочем диапазоне углов перекладки, в том числе при угле перекладки, соответствующем его наивысшей эффективности, разработана представленная ниже конструкция руля изменяемого профиля.

На рис. 13 показан общий вид руля в трех проекциях: боковой вид, вид с носа и вид сверху, а на рис. 14 — положение элементов механизации при движении прямо (б), при повороте влево (а) и повороте вправо (в).

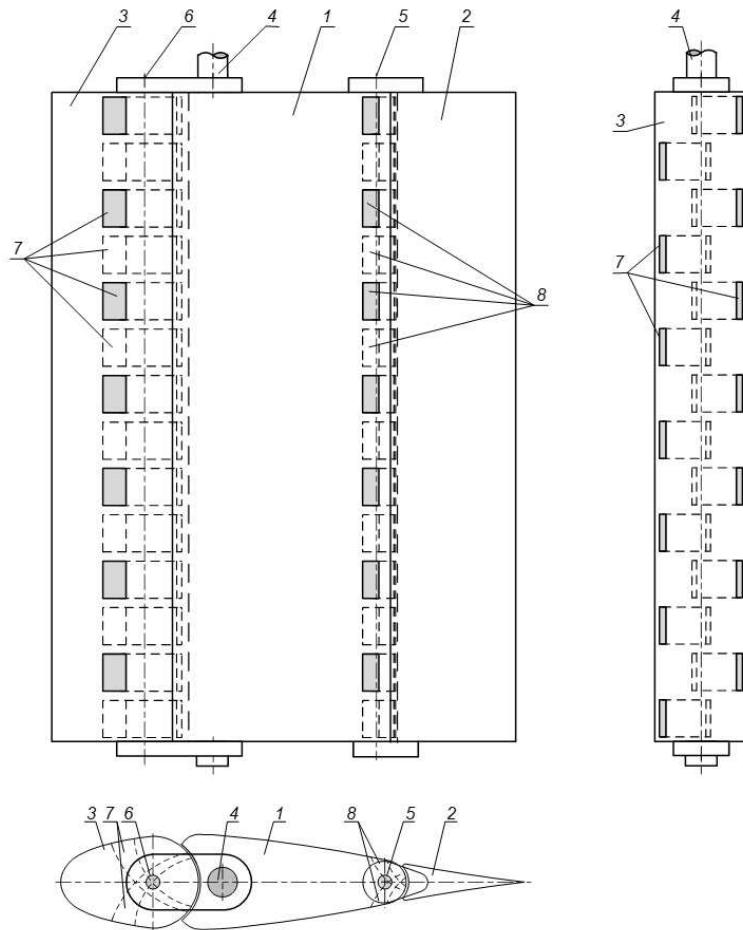


Рис. 13. Общий вид руля в трех проекциях: боковой вид, вид с носа и вид сверху:

1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 4 — баллер; 5 — ось вращения закрылка; 6 — ось вращения предкрылка; 7 — сквозной сужающийся канал в предкрылке; 8 — сквозной сужающийся канал в хвостовой части пера руля

Криволинейными стрелками на рис. 14 показано направление потоков воды, обтекающих руль.

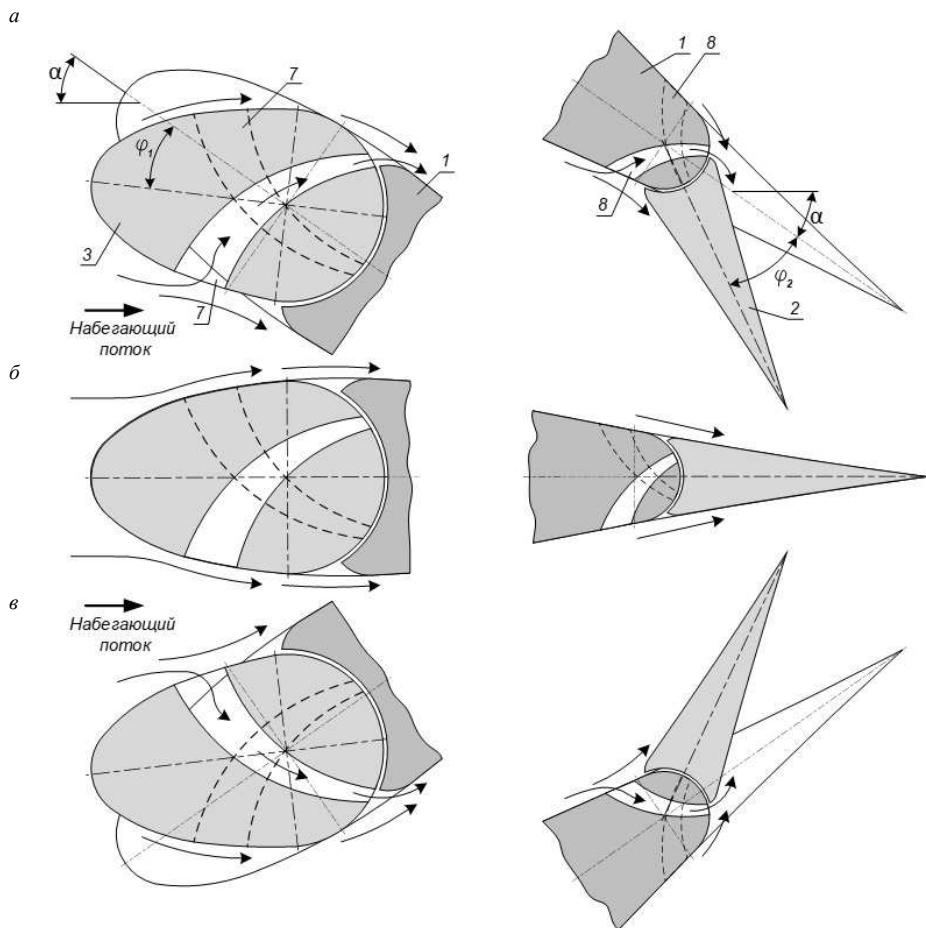


Рис. 14. Положение элементов механизации при движении прямо (б), при повороте влево (а) и повороте вправо (в):
 1 — перо руля; 2 — закрылок; 3 — предкрылок; 7 — сквозной сужающийся канал в предкрыльке;
 8 — сквозной сужающийся канал в хвостовой части пера руля

Для создания эффекта щели в предкрыльке выполнены равномерно распределенные по его высоте сквозные каналы сужающиеся сечения 7. Входы в суживающиеся каналы выполнены с обеих сторон предкрылька, а выходы из них находятся на цилиндрической поверхности, по которой при повороте предкрылька сопряжены его кормовая часть и носовая кромка основной части пера руля. Аналогичные суживающиеся сквозные каналы 8 выполнены в кормовой кромке основной части пера руля. Входы в суживающиеся каналы выполнены с обеих сторон пера руля, а выходы из них находятся на цилиндрической поверхности, по которой при повороте закрылка сопряжены его носовая часть и кормовая кромка основной части пера руля. Каналы по высоте по отношению друг к другу расположены в «шахматном» порядке, что обеспечивает работу руля при перекладке на оба борта.

Устройство работает следующим образом. При прямолинейном движении судна перо руля, закрылок и предкрылок представляют собой единое целое в виде обтекаемого профиля, симметричного относительно диаметральной плоскости (рис. 13, 14б). При этом каналы закрыты.

Для обеспечения поворота судна происходит поворот пера на угол атаки α в сторону одного из бортов (рис. 13а, в). Одновременно происходит поворот закрылка и предкрылька на углы φ_2 и φ_1 соответственно. При угле атаки, близком к критическому акр, предкрылок и закрылок поворачиваются настолько, что открывают выходы из суживающихся каналов (рис. 14а, в).

При этом потоки воды с вогнутой стороны руля с повышенным давлением перетекают по каналам на выпуклую сторону руля с пониженным давлением. При движении воды по суживающемуся каналу возрастает скорость потока, и после выхода из канала ускоренный поток предотвращает отрыв потока, повышая тем самым C_y , то есть подъемную силу, и увеличивая критический угол атаки α_{kp} , улучшая, таким образом, управляемость судна.

Предлагаемым устройством могут быть снабжены рули с любой конфигурацией их механизации (только предкрылок, только закрылок или предкрылок и закрылок одновременно) и при любых известных принципах действия приводов поворота предкрылка и закрылка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные технические решения устраниют ряд недостатков, свойственных известным конструкциям рулей изменяемого профиля, а также улучшают их гидродинамические характеристики, повышая тем самым эффективность рулей и, следовательно, улучшая управляемость судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории корабля: в 3 т. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 540 с.
2. Атлас гидродинамических характеристик судовых рулей // Труды НИИВТ. — 1972. — Вып. 72. — 87 с.
3. Сутуло С.В. О нормировании маневренных качеств морских судов / С.В. Сутуло // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 1996. — Вып. 19. — С. 109 — 121.
4. Шмырев А.Н. Успокоители качки судов / А.Н. Шмырев, В.А. Мореншильд, С.Г. Ильина. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 516 с.
5. Чекризов Г.В. Справочник по успокоителям качки с бортовыми рулями / Г.В. Чекризов, М.С. Темкин, В.О. Воробьев. — Л.: Судостроение, 1979. — 255 с.
6. Патент на изобретение № 2551948. Судовое рулевое устройство: заявл. 08.04.2014: опубл. 10.06.2015, БИ № 16 / Аносов А.П.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
7. Патент на изобретение № 2592706. Судовое рулевое устройство: заявл. 09.07.2015, опубл. 27.07.2016, БИ № 21 / Аносов А.П., Шаринкова О.С., Герман А.П.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
8. Патент на полезную модель № 153733. Судовое рулевое устройство: заявл. 22.01.2015, опубл. 27.07.2015, БИ № 21 / Аносов А.П., Шаринкова О.С., Герман А.П.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
9. Патент на изобретение № 2721804. Судовое рулевое устройство: заявл. 13.11.2019, опубл. 22.05.2020, БИ № 15 / Аносов А.П., Восковщук А.П., Козырев Д.В.; заявитель ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)».
10. Аносов А.П. Рулевые устройства с пером руля изменяемого профиля / А.П. Аносов, А.П. Герман, О.С. Шаринкова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2015. — Вып. 89.2 (273.2). — С. 197 — 202.
11. Шаринкова О.С. Противоледовая конструктивная защита винторулевого комплекса судов ледового плавания: дисс. ... канд. техн. наук / О.С. Шаринкова; ДВФУ. — Владивосток, 2022. — 23 с.
12. Шаринкова О.С. Сравнительная оценка гидродинамических характеристик руля изменяемого профиля в составе винторулевого комплекса судна ледового класса / О.С. Шаринкова, А.П. Аносов, И.А. Новосельцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 66/67. — С. 49 — 57. — EDN GELNOD.
13. Румянцев А.Г. Расчетно-экспериментальное исследование обтекания механизированных профилей / А.Г. Румянцев, В.А. Сильтантьев // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 3. — С. 291 — 306.

REFERENCES

1. Spravochnik po teorii korablya: v 3 t. / pod red. Ya.I. Voitkunskogo [Handbook in ship theory: in 3 vols. Vol. 3: Controllability of displacement vessels. Hydrodynamics of vessels with dynamic principles of maintenance / Ya.I. Voitkunskii (ed.)]. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 540 p.
2. Atlas gidrodinamicheskikh kharakteristik sudovykh rulei [Atlas of hydrodynamic characteristics of ship rudders]. Trudy NIIVT [Transactions of the Novosibirsk Institute of Water Transport Engineers]. 1972. Issue 72. 87 p.
3. Sutuло S.V. O normirovaniи maneuvrennykh kachestv morskikh sudov [On the normalization of maneuverability qualities of marine vessels]. Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. 1996. Issue 19. P. 109 — 121.
4. Shchmyrev A.N., Morenshild V.A., Ilyina S.G. Uspokoiteli kachki sudov [Calming agents for pitching ships]. Leningrad: Sudpromgiz, 1961. 516 p.
5. Chekriзов G.V., Temkin M.S., Vorobyev V.O. Spravochnik po uspokoitelyam kachki s bortovymi rulyami [Handbook of pitching dampers with side rudders]. Leningrad: Sudostroenie, 1979. 255 p.
6. Shipboard steering gear: Patent for invention No. 2551948, dated 08.04.2014, publ. on 10.06.2015, bul. No. 16 / Anosov A.P.; applicant Far Eastern Federal University.
7. Shipboard steering device: Patent for invention No. 2592706, dated 09.07.2015, publ. on 27.07.2016, bul. No. 21 / Anosov A.P., Sharinkova O.S., German A.P.; applicant Far Eastern Federal University.
8. Ship steering device: Utility Model Patent No. 153733, dated 22.01.2015, publ. on 27.07.2015, bul. No. 21. / Anosov A.P., Sharinkova O.S., German A.P.; applicant Far Eastern Federal University.

9. Ship steering device: Patent for invention No. 2721804, dated 13.11.2019, publ. on 22.05.2020, bul. No. 15 / Anosov A.P., Voskovchuk A.P., Kozyrev D.V; applicant Far Eastern Federal University.
10. Anosov A.P., German A.P., Sharinkova O.S. Steering devices with a variable-profile rudder. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2015. Issue 89.2 (273.2). P. 197 — 202. (In Russ.)
11. Sharinkova O.S. Protivoledovaya konstruktivnaya zashchita vintorulevogo kompleksa sudov ledovogo plavaniya [Anti-ice structural protection of the rotary steering complex of ice navigation vessels: PhD thesis] / Far East Federal Univ. Vladivostok, 2022. 23 p.
12. Sharinkova O.S., Anosov A.P., Novoseltsev I.A. Comparative evaluation of hydrodynamic characteristics of variable profile rudder as a part of ice class ship propulsion complex. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. No. 66/67. 2022. P. 49 — 57. EDN GELNOD. (In Russ.)
13. Rumyantsev A.G., Silantyev V.A. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie obtekaniya mekhanizirovannykh profilei [Computational and experimental study of the flow of mechanized profiles]. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2010. Vol. 17, No. 3. P. 291 — 306.

УДК 629.5.017
EDN EIPDXD

О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ КРИТЕРИЕВ ОСТОЙЧИВОСТИ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ ИМО В СИСТЕМУ КОМПЛЕКСНОГО НОРМИРОВАНИЯ МОРЕХОДНОСТИ

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург,
ул. Миллионная, 7А, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

При формировании комплексной системы оценки и нормирования мореходности частные показатели являются базовой составляющей, позволяющей учесть характеристики поведения судна на волнении. В этой связи набор частных показателей должен быть достаточно широким. С другой стороны, для дальнейшего формирования на их базе краткосрочных показателей мореходности как интегральной характеристики поведения судна на волнении данной интенсивности необходима возможность учитывать влияние интенсивности волнения, скорости хода и курсового угла на значения выбранных показателей, что позволяет перейти к краткосрочной и затем долговременной оценке мореходных качеств. В статье рассмотрены особенности формирования критерии остойчивости ИМО первого и второго поколения, имеющиеся исследования этих критерии. Отмечены особенности критерии, позволяющие или не позволяющие использовать их в качестве показателей мореходности. Делается вывод о перспективности использования критерии остойчивости второго поколения и вновь разрабатываемых ИМО экологических мер в комплексной системе оценки и нормирования мореходности.

Ключевые слова: мореходность, остойчивость, показатели мореходности, критерии остойчивости, оценка уязвимости, опасные динамические явления, энергоэффективность.

Для цитирования: Кутейников М.А. О возможности интеграции критерии остойчивости второго поколения ИМО в систему комплексного нормирования мореходности / М.А. Кутейников // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 64 — 74. — EDN EIPDXD.

POSSIBILITY OF INTEGRATING IMO SECOND-GENERATION STABILITY CRITERIA IN COMPLEX SEAWORTHINESS NORMS SYSTEM

М.А. Кутейников, DSc, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

Specific indices are forming the basis allowing to consider ship's behavior characteristics in complex seaworthiness verification and regulation system. In this regard the set of specific indices is to be wide enough. On the other hand, for future formulating of short-term seaworthiness indices characterizing ship's behavior in a particular sea state on the basis of specific indices there is to be a possibility to consider the intensity of sea wave, ship's speed and course angle. That possibility allows to perform short-term and long-term seaworthiness assessment. Peculiarities of first- and second-generation IMO stability criteria and connected research works are considered in the article. Criteria's peculiarities allowing or not allowing to use them as specific seaworthiness indices are marked. It is concluded that using IMO second-generation stability criteria and ecological regulations in complex seaworthiness assessment and regulation is promising.

Keywords: seaworthiness, stability, seaworthiness indices, stability criteria, vulnerability assessment, stability failure modes, energy efficiency.

For citation: Kuteynikov M.A. Possibility of integrating IMO second-generation stability criteria in complex seaworthiness norms system. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 64 — 74. EDN EIPDXD. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное нормирование мореходности подробно рассмотрено в работе [1]. В частности, отмечается, что в основу оценки и нормирования мореходных качеств судна должна быть положена система показателей. Такая система включает несколько уровней: частные, краткосрочные и долговременные показатели. Именно частные показатели являются базовой составляющей, позволяющей учесть в комплексном подходе различные конкретные характеристики поведения судна на волнении путем их расчета по соответствующим методикам и сравнения с установленными обоснованными ограничивающими значениями (критериями). В этой связи представляется важным отметить, что для целей полноты оценки мореходных качеств судна набор частных показателей должен быть достаточно широким. С другой стороны, для дальнейшего формирования на базе выбранных частных показателей краткосрочных показателей мореходности как интегральной характеристики поведения судна на волнении данной интенсивности, необходимо выделить показатели с учетом их «важности» с точки зрения обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации. Также обязательным является наличие возможности учета влияния интенсивности волнения, скорости хода и курсового угла на значения выбранных показателей поскольку именно такая возможность позволяет перейти к краткосрочной и затем долговременной оценке мореходных качеств. Вышесказанное может быть проиллюстрировано рис. 1, показывающим укрупненно схему формирования краткосрочных показателей мореходности.

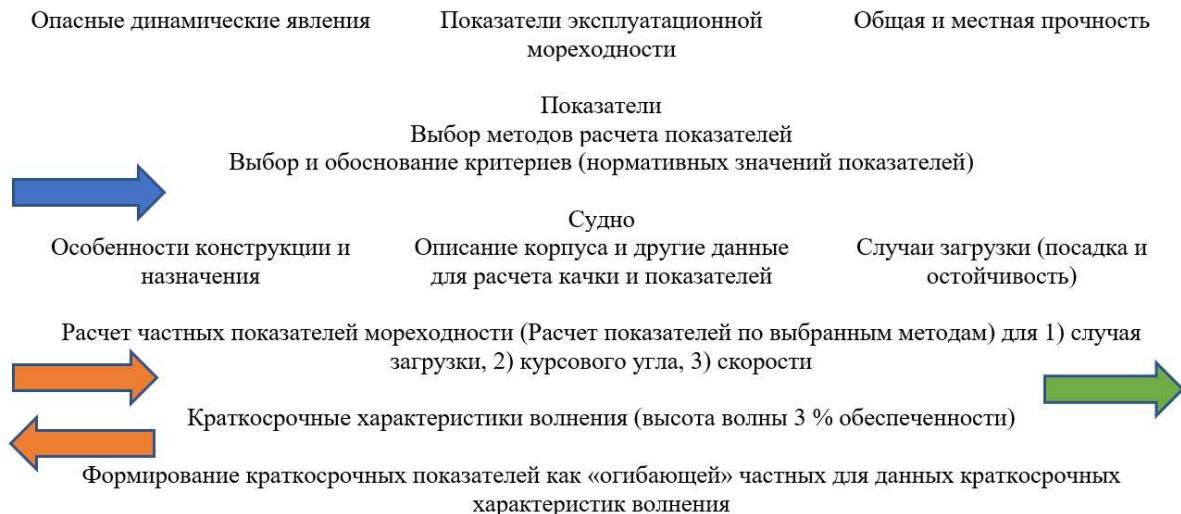


Рис. 1. Схема формирования краткосрочных показателей мореходности

В связи с принятием Международной морской организацией (ИМО) критерииов остойчивости неповрежденных судов второго поколения [11], основанных на учете эксплуатационных характеристик судна для установленных опасных динамических явлений, таких как изменение плеча восстанавливющего момента на волнении, резонансная бортовая качка, а также броцинг и другие явления, связанные с маневрированием, представляется интересным оценить возможность их включения в систему комплексной оценки и нормирования мореходности с учетом обозначенных требований к входящим в систему показателям.

ОСОБЕННОСТИ КРИТЕРИЕВ ОСТОЙЧИВОСТИ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ МОРЕХОДНОСТИ

Термин «мореходность» в общем виде включает вопросы обеспечения остойчивости судна, его прочности и способность выполнять свои основные функции на морском волнении определенной для требуемого района эксплуатации интенсивности. При нормировании мореходности на первом месте стоит задача предотвращения опрокидывания судна под воздействием ветра и морского волнения, сохранения

достаточной общей, местной и усталостной прочности его корпусных конструкций. Соответствующие требования приведены в нормативных документах Российского морского регистра судоходства (РС) и Международной морской организации (ИМО) [2, 3]. В Правилах [2] также могут быть приняты ограничения, назначаемые судам, не удовлетворяющим тем или иным требованиям, предъявляемым к судам «неограниченного» района плавания для обеспечения решения вышеперечисленных задач.

Отметим, что при формировании, например, так называемых критериев остойчивости ИМО первого поколения, вошедших в Международный кодекс по остойчивости неповрежденных судов (2008 IS Code) [3], разработчики опирались на подход Я. Рахолы [4], предполагающий использование сравнительного анализа параметров остойчивости судов, хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации и потерпевших аварию. Анализа и расчета кренящих моментов, действовавших на судно во время аварии, при таком подходе не делается, поэтому метод не имеет надежной теоретической базы и является, по существу, эмпирико-статистическим. Однако, учитывая, что данный метод приводит к очень удобным для практического использования критериям остойчивости, он получил широкое распространение в нормах. На базе метода сформулированы требования к параметрам диаграммы статической остойчивости (минимальные значения плеч, протяженность и т.п.), начальной метацентрической высоте. При этом непосредственная связь нормируемых параметров с характеристиками действующих на судно внешних сил отсутствует. Дальнейшее дополнение критериев остойчивости условно динамическими критериями, базирующимися на построении упрощенной механической модели, учитывающей физические факторы, влияющие на остойчивость в опасных условиях плавания (критерий погоды, критерий ускорения), принципиально не изменило сути подхода к нормированию остойчивости. Для критерия погоды предусмотрена четко регламентированная физическая схема, рассматривающая динамическую остойчивость судна, расположенного лагом к ветру и нерегулярным волнам, вызывающим бортовую качку. Ветер считается устойчивым порывистым, когда его скорость содержит стационарную, мало меняющуюся со временем составляющую, определяемую некоторой средней величиной, и достаточно сильные флюктуации, характеризуемые средним коэффициентом порывистости, равным 1,23. Под действием постоянного кренящего момента от давления ветра, определяемого средней скоростью, судно получает статический крен в подветренную сторону и качается под действием волн вокруг наклоненного положения. В момент наибольшего наклонения на наветренный борт на угол, равный максимальной за 50 колебаний амплитуде нерегулярной качки, на судно действует динамически приложенный кренящий момент от давления порывистого ветра, величина которого в полтора раза больше статического. Таким образом, непосредственный учет действующих на судно в определенный момент времени ветра и волнения в данной схеме не предусматривается.

При рассмотрении задачи выбора показателей мореходности судна важно отметить, что критерии, подобные критериям остойчивости ИМО первого поколения, не предполагают их расчета для различных условий плавания судна при его эксплуатации и, следовательно, на их основе не могут быть сформированы краткосрочные показатели мореходности (рис. 1).

Иная ситуация складывается с показателями эксплуатационной мореходности. В основу количественной расчетной оценки эксплуатационной мореходности изначально положена система частных показателей, предполагающих их зависимость от конкретных текущих условий эксплуатации судна:

- днищевой слеминг: среднее число ударов волн в днище носовой оконечности судна за фиксированное время, характерные вертикальные ускорения в расчетных точках;
- бортовой слеминг: среднее число ударов волн в развал борта за фиксированное время, характерные вертикальные ускорения в расчетных точках;
- заливание палубы: среднее число превышения уровнем воды высоты защищенного надводного борта в расчетном сечении за фиксированное время;
- оголение гребного винта: среднее число оголений верхних кромок лопастей гребного винта за фиксированное время;
- интенсивная качка и вызванные ей ускорения: характерные амплитуды абсолютных вертикальных ускорений в расчетных точках;
- заливаемость и забрызгивание палубы и надстроек: среднее число заливаний и брызговых всплесков воды над палубой за фиксированное время;
- разгон гребного винта и двигателя: среднее число срабатываний защиты двигателя по частоте вращения вследствие разгона винта при качке за фиксированное время;
- снижение остойчивости судна на волнении: характеристики остойчивости судна при движении на попутном волнении, возможность возникновения и интенсивность бортовой качки с учетом параметрического возбуждения;
- снижение управляемости, явления серфинга и брочинга (захвата судна волной с последующим разворотом и опрокидыванием) при движении на попутном волнении;

- возрастание сопротивления движению судна: потеря скорости на волнении, увеличение требуемой мощности и расхода топлива.

Некоторые источники в дополнение к этим основным показателям приводят и другие. Вопросы частных критерии мореходности, связанных с воздействием на человека, судно и вынужденным снижением скорости судна, достаточно подробно рассмотрены в работе [7].

Важность учета этих показателей для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации судна была отмечена достаточно давно [5, 6]. Подход к оценке безопасности судна и назначению эксплуатационных ограничений только на базе критерии остойчивости и прочности не охватывает существенные особенности эксплуатационной мореходности судов и влияние опасных динамических явлений, что может приводить в ряде случаев и к необоснованному завышению параметров волнения, при которых допускается эксплуатация судна.

Например, полное удовлетворение требованиям Правил, обеспечивающих безопасность судна, не может гарантировать приемлемые условия обитания (с точки зрения умеренности (плавности) качки) экипажа и пассажиров [8]. Так, избыточная остойчивость приводит к резкой качке, что отражается в ее малом периоде и, как следствие, вызванных ею значительных вертикальных ускорениях. Развитие безэкипажной навигации для некоторых типов судов может в перспективе исключить необходимость обеспечения приемлемых условий нахождения экипажа на судне. При этом, однако, полное исключение пребывания человека на борту морского судна вряд ли возможно, а пребывание на борту пассажиров требует обеспечения определенного уровня комфорта. Для учета дополнительных ограничений с точки зрения мореходности в мировой практике рекомендуется использовать стандарты NORDFORSK (для морских судов, кораблей и катеров), NATO STANAG 4154 (для морских судов и кораблей) и USCGC (для катеров), в которых приведены критерии по амплитуде бортовой и кильевой качки, вертикальным и поперечно-горизонтальным ускорениям, частоте заливания верхней палубы, слеминга и оголения гребных винтов; специально разработанные критерии MSI и MII.

Для целей проектирования, безопасной и эффективной эксплуатации, обоснованного назначения эксплуатационных ограничений по погоде и району плавания судов необходимо использовать комплексный подход к нормированию мореходности. Несмотря на изложенные соображения, до появления критерии остойчивости ИМО второго поколения [11] не было предпосылок для интеграции требований к остойчивости в комплексную модель поведения судна на волнении, и критерии (критериальные значения показателей) эксплуатационной мореходности рассматривались независимо от требований нормативных документов к остойчивости и прочности судна.

Только переход к показателям, чувствительным к эксплуатационным условиям судна, и последующему использованию методов теории вероятностей позволяет осуществить комплексную оценку безопасности судна на волнении. Это также обеспечивает исключение из практики нормирования метода выделения и рассмотрения одного либо нескольких наихудших вариантов сочетаний опасных факторов, что может приводить к заданию слишком строгих случаев, которые на практике могут не встречаться [9]. Оптимальным для целей нормирования является метод, основанный на разбивке задачи на: 1) определение вероятности появления заданных внешних условий и 2) определение вероятности нарушения критерии в заданных условиях. Вероятность появления заданных условий может быть определена из статистических данных по ветру и волнению, например [10]. Физическая модель поведения судна в заданных условиях эксплуатации может быть разная. При постановке судна лагом к волнению опрокидывание может произойти непосредственно от действия ветра и волн, при ходе на попутном и косом попутном волнении может произойти брочинг, параметрический резонанс или потеря остойчивости на попутной волне, от избыточных ускорений при качке может произойти укачивание и травмирование экипажа или смещение и потеря груза и т.д. В связи с этим нужно ограничить выбор условий заранее установленными наиболее опасными ситуациями и оценивать в них значения показателей поведения судна при различных внешних условиях. Именно таким путем пошли при разработке и утверждении критерии остойчивости ИМО второго поколения.

КРИТЕРИИ ОСТОЙЧИВОСТИ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Комитет по безопасности на море ИМО на 102-й сессии (04 — 11 ноября 2020 г.) одобрил Временное руководство по критериям остойчивости неповрежденных судов второго поколения [11], основанных на эксплуатационных характеристиках судна. При рассмотрении движущегося на волнении судна как динамической системы для обеспечения единого международного уровня безопасности предлагаются критерии, ориентированные на эксплуатационные характеристики. Критерии приведены для установленных опасных динамических явлений, таких как изменение плеча восстанавливающего момента на волнении,

резонансная бортовая качка, а также броунинг и другие явления, связанные с маневрированием. Такой подход является базовым отличием от критериев первого поколения [3], являющихся детерминированными критериями, связанными с типами и размерами судов, имеющих положительный опыт эксплуатации. Суда, которые выходят за рамки тех размерений и характеристик типовых судов, для которых были разработаны эти критерии, например имеющие новую геометрию корпуса, режимы эксплуатации и случаи загрузки, могут не попадать в пределы применимости критериев первого поколения. Некоторые суда, полностью соответствующие критериям первого поколения, также могут подвергаться различным не учтенным в нормах сценариям потери остойчивости. Таким образом, целью критериев остойчивости неповрежденного судна второго поколения является составление рекомендаций по проектированию судов, применимых ко всем типам судов, подверженных основным динамическим сценариям потери остойчивости (опасным динамическим явлениям). В настоящее время проверка подверженности судна основным динамическим сценариям потери остойчивости рассматривается ИМО как дополнительная оценка и не предполагает ее использования в качестве альтернативы основным критериям (первого поколения). Можно, однако, ожидать, что дальнейшее развитие норм пойдет по пути, выбранному при принятии критериев второго поколения, то есть в направлении более полного учета особенностей конструкции и условий эксплуатации судов.

Критерии остойчивости неповрежденного судна второго поколения включают в себя оценку остойчивости с использованием методов, согласованных с физикой рассматриваемых явлений. Для оценки подверженности судна тем или иным опасным динамическим явлениям используют «Критерии уязвимости». Критерии ориентированы на оценку пяти ситуаций, связанных с возможной потерей судном динамической остойчивости на волнении. Эти ситуации включают штормование судна с неработающей энергетической установкой, развитие чрезмерных ускорений, чистую потерю остойчивости, параметрическую бортовую качку и серфинг/броунинг судна.

В отличие от обязательных критериев остойчивости неповрежденного судна, сформулированных, когда поведение судна и методы его оценки в этих пяти опасных ситуациях не были хорошо изучены, критерии динамической остойчивости учитывают успешный опыт применения передовых научных инструментов и основаны на учете физики явлений. При разработке критериев второго поколения также было признано, что подход, объединяющий методы, применяемые как на стадии проектирования, так и при эксплуатации, является наиболее эффективным способом повышения безопасности. Логика применения показана в обобщенном виде на рис. 2.

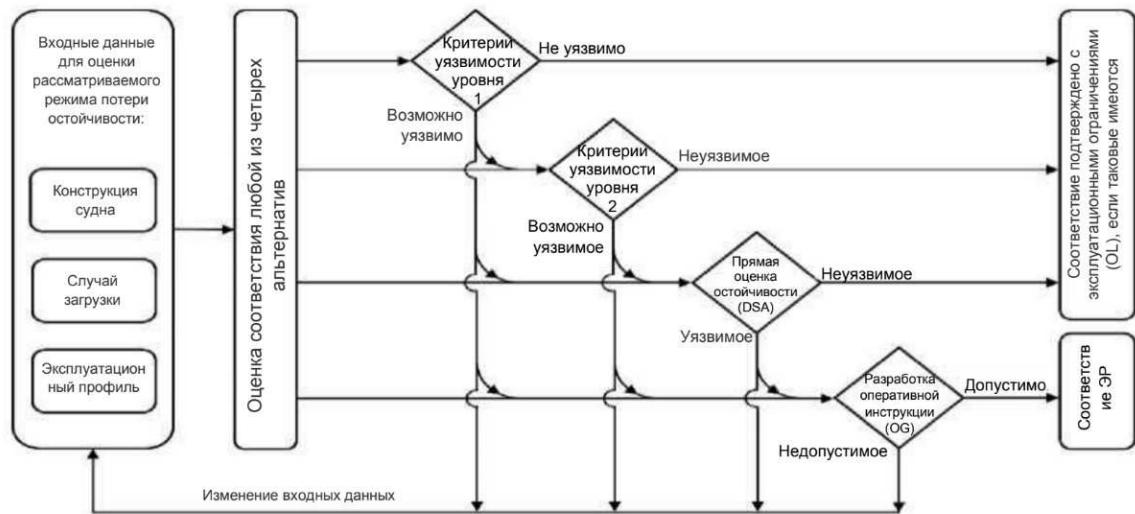


Рис. 2. Упрощенная схема структуры применения критериев остойчивости неповрежденного судна второго поколения

Последовательность применения критериев второго поколения можно описать следующим образом. Простейшие критерии уязвимости представлены двумя уровнями: уровень 1 и уровень 2. Оценка пяти сценариев потери остойчивости должна начинаться с использования этих уровней. Уровень 1 является начальной проверкой: если судно при рассматриваемом случае загрузки оценивается как неподверженное опрокидыванию в проверенном сценарии потери остойчивости, оценка для этого сценария потери остойчивости может быть завершена; в противном случае проверка переходит на уровень 2. Если судно при рассматриваемом случае загрузки оценивается как неподверженное опрокидыванию в проверенном

сценарии на уровне 2, то оценка будет завершена; в противном случае применяется прямая оценка остойчивости, вводятся эксплуатационные ограничения, изменяется конструкция судна или этот случай загрузки исключается. Как видно из этой информации о критериях ИМО второго поколения, на результаты оценки уязвимости судна непосредственно влияют не только его конструктивные особенности, но и условия эксплуатации.

Рассмотрим более подробно принятые ИМО сценарии потери остойчивости [11].

Оценка уязвимости судна режиму потери остойчивости с выведенной из строя энергетической установкой.

Для целей оценки уязвимости уровня 1 в сценарии потери остойчивости судна с выведенной из строя энергетической установкой используется метод оценки, включенный в раздел 2.3 Кодекса [3], но коэффициент крутизны s заменяется приведенным в таблице 4.5.1 из [12]. Оценка уязвимости уровня 2 представляет собой упрощенную консервативную вероятностную меру уязвимости судна к потере остойчивости при выведенной из строя энергетической установке для рассматриваемого случая загрузки, основанную на следующих основных предположениях:

- судно имеет неработающую энергетическую установку на нерегулярном волнении и при порывистом ветре в течение определенного времени;
- ветер дует и волны распространяются в одном и том же направлении, а глубина воды достаточно большая (глубина воды больше половины длины волны), чтобы можно было сделать предположение о бесконечной глубине воды;
- судно расположено лагом к ветру и волнам;
- состояние ветра характеризуется средней скоростью ветра и спектром порывистости;
- состояние моря характеризуется спектром высот волн, и волны имеют длинный гребень;
- бортовую качку судна можно смоделировать как систему с одной степенью свободы.

Мера, обозначенная как C , является долгосрочным индексом вероятности в диапазоне от 0,0 (низкая) до 1,0 (высокая), который определяется как средневзвешенное значение краткосрочных индексов C_S .

Краткосрочный индекс потери остойчивости судна с выведенной из строя энергетической установкой C_S зависит от характеристик судна в рассматриваемом случае загрузки и от краткосрочных условий окружающей среды заданной продолжительности. Он получается с помощью упрощенной методики расчета, которая учитывает характеристики качки в рассматриваемом краткосрочном состоянии окружающей среды.

Таким образом, несмотря на используемую регламентированную физическую схему положения судна по отношению к ветру и волнению из [3], в расчете критерия присутствуют параметры, характеризующие условия окружающей среды и характеристики качки в этих условиях. Это создает предпосылки к формированию на базе рассмотренного критерия соответствующего показателя мореходных качеств судна и разработке метода его расчета для последующей интеграции в комплексную систему оценки.

Оценка уязвимости судна к чрезмерному ускорению.

Критерий уязвимости уровня 1 для сценария потери остойчивости по чрезмерному ускорению предложен в следующем виде:

$$\varphi \cdot k_L \cdot (g + 4\pi^2 h_r / T_r^2) \leq R_{EA1},$$

где $R_{EA1} = 4,64 \text{ м/с}^2$;

T_r — собственный период бортовой качки;

k_L — коэффициент учета одновременного действия разных видов качки;

h_r — высота над предполагаемой осью бортовой качки в месте, где могут находиться пассажиры или экипаж (м), для определения которой ось крена можно принять расположенной посередине между ватерлинией и вертикальной координатой центра тяжести;

φ — характерная амплитуда бортовой качки (рад.).

Характерная амплитуда бортовой качки определяется в предположении, что дисперсия бортовой качки преимущественно определяется частотами, близкими к собственной частоте бортовой качки.

Критерий уязвимости уровня 2:

$$C = \sum_{i=1}^N W_i C_{S,i}.$$

С представляет собой долгосрочный индекс вероятности в диапазоне от 0,0 (низкая) до 1,0 (высокая), который получается как средневзвешенное значение краткосрочных индексов $C_{S,i}$ развития чрезмерных ускорений для случая загрузки, местоположения людей в рассматриваемых краткосрочных условиях ветра и волнения.

W_i — весовой коэффициент, учитывающий вероятность появления тех или иных краткосрочных погодных условий;

N — общее количество краткосрочных условий окружающей среды.

В работе [13] описаны основные современные критерии мореходности, использующие в качестве основы ускорения в характерных точках корпуса судна и позволяющие количественно оценивать воздействие качки. В том числе внимание уделено и критерию ИМО второго поколения. Отмечено, что за последние два десятилетия сформировался набор хорошо апробированных международных критериев мореходности (NORDFORSK-1987 и STANAG 4154, индекс укачивания MSI, индекс эффективности работы экипажа MII), к сожалению, не получивших должного распространения в отечественной практике проектирования морских судов. Из сравнения критериев ускорения, применяемого РС [2] и ИМО (в составе критериев динамической остойчивости второго поколения [11]), можно сделать вывод, что формулы РС и ИМО определяют взаимно-перпендикулярные составляющие ускорения в принципиально разных местах судна, а назначенные пределы ускорений существенно отличаются, и критерии ускорений ИМО и РС должны дополнять друг друга. При рассмотрении вопроса определения краткосрочного показателя чрезмерных ускорений, следует учитывать выводы работы [14] о влиянии курсовых углов и скорости хода на наибольшие амплитуды поперечных, продольных и вертикальных составляющих ускорений.

Оценка уязвимости судна к чистой потере остойчивости.

Оценка уязвимости судна к чистой потере остойчивости выполняется только для судов с относительно высокой эксплуатационной скоростью. Если скорость низкая, то период времени, в течение которого судно подвергается воздействию пониженной остойчивости (уменьшенному плечу восстановливающего момента), является, как правило, слишком коротким для развития большого угла крена. Критерий уровня 1 является упрощенным вариантом критерия уровня 2, оценивающего уязвимость с использованием кривой плеча восстановливающего момента на волнении. Критерий уровня 1 оценивает уязвимость по исправленной метацентрической высоте. Оценка уровня 1 уязвимости к чистой потере остойчивости выполняется с использованием консервативной аппроксимации наименьшего значения GM во время прохождения волны.

Для оценки уровня 2 требуется оценка по двум критериям в условиях уменьшенного плеча восстановливающего момента от действия волны.

$$\max(CR_1, CR_2) \leq R_{PL0},$$

где $R_{PL0} = 0,06$;

CR_1, CR_2 — каждый из двух критериев представляет собой средневзвешенное значение параметров остойчивости судна, статически поставленного на волну заданной высоты и длины.

Оценка уязвимости уровня 2 для чистой потери остойчивости основана на расчете взвешенных критериев CR_1 и CR_2 , исходя из определяющих их средневзвешенных критериев C_{1i} и C_{2i} , рассчитываемых для каждой расчетной волны. Должна применяться поправка на свободную поверхность, соответствующая рассматриваемому случаю загрузки. Расчеты проводятся для 11 положений гребня волны: при гребне волны, находящемся у миделя и на расстояниях $0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L$ и $0,5L$ носовее и $0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L$ и $0,5L$ кормовее миделя. Учитывая вышеизложенное влияние параметров эксплуатации судна на значения критерия и возможность формирования на его основе соответствующего показателя мореходности представляются очевидными.

Оценка уязвимости судна к параметрической бортовой качке.

Критерий уязвимости для сценария потери остойчивости при параметрической бортовой качке как уровня 1, так и уровня 2 требует тщательного анализа физических основ параметрической бортовой качки. Напомним, что параметрическая бортовая качка (сокращенное название официального термина «резонанс параметрической бортовой качки») — это явление динамической остойчивости, при котором усиление бортовой качки вызвано периодическим изменением поперечной остойчивости на волнении. Явление параметрической бортовой качки наблюдается в основном на встречных волнах, попутных и на волнах под углом к носу или корме, когда частота столкновения судна приблизительно вдвое больше собственной частоты бортовой качки судна, а демпфирование бортовой качки судна является недостаточным для рассеивания дополнительной энергии (накопленной вследствие параметрического резонанса). Частота встреч с волнами изменяется, когда судно находится в движении. Когда судно идет на попутном волнении или на волнении под углом к корме, направление волн и курс судна одинаковы (см. рис. 3а). В результате относительная скорость мала, и судно сталкивается с меньшим количеством волн в течение одного и того же периода времени (в сравнении со случаем нулевой скорости); период встреч увеличивается (а частота встреч уменьшается). Когда судно идет на встречном волнении или на волнении под углом к носу, направление волнения и курс судна противоположны (см. рис. 3б). В результате относительная скорость большая, и судно сталкивается с большим количеством волн за то же время (в сравнении со случаем нулевой скорости); период встречи уменьшается (а частота встречи увеличивается).

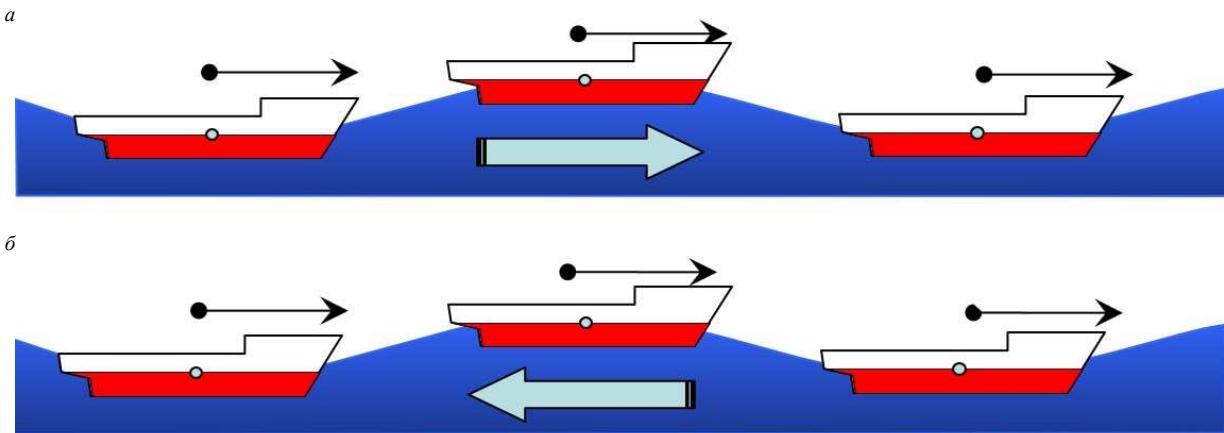


Рис. 3. Влияние скорости и направления волны на параметрический резонанс:

а — попутное волнение и волнение под углом к корме: период встречи более продолжительный, чем период волны;
 б — встречное волнение и волнение под углом к носу: период встречи короче, чем период волны

Начало параметрической бортовой качки зависит от частоты встречи, находящейся в диапазоне частот, где возможна параметрическая бортовая качка. Следовательно, развитие параметрической бортовой качки зависит от скорости и курса.

Оценка уязвимости судна к серфингу/брочингу.

Критерий и норматив для числа Фруда в критерии уровня 1 были приняты в составе циркуляра MSC/Circ.707 в 1995 г. и затем заменены циркуляром MSC.1/Circ.1228. В настоящее время сделан вывод о том, что при соответствующих условиях волнения может возникнуть серфинг, когда скорость судна превышает

$$V_s \geq 1,8\sqrt{L} / \cos(180^\circ - \beta),$$

где V_s — скорость судна в узлах;
 β — угол встречи с волной в градусах.

Допуская, что при попутных волнах $\beta = 180^\circ$, и преобразуя формулы так, чтобы они были основаны на числе Фруда, получаем:

$$F_n \geq 1,8 \cdot 0,5144 / \sqrt{g} = 0,296 \approx 0,3.$$

Это считается нижним пределом порога для серфинга при любых начальных условиях для обычных судов на наихудшем волнении. Наихудшая длина волны для серфинга сопоставима с длиной судна. Это означает, что для более длинных судов требуются более длинные волны для серфинга. Длина крутых океанских волн имеет определенные ограничения, поэтому вероятность серфинга длинных судов небольшая. Таким образом, критерии уязвимости уровня 1 также устанавливают порог длины судна 200 м.

Поскольку критерий уровня 1 представляет собой простую оценку числа Фруда, данные по сопротивлению или тяге не требуются. Однако критерии уязвимости уровня 2 требуют использования надежных оценок сопротивления и тяги. До завершения строительства судна и проведения морских испытаний эти данные берутся из модельных испытаний или других методов оценки сопротивления.

Предлагаемый ИМО критерий риска потери остойчивости вследствие брочинга при движении судна на гребне попутной волны может быть модифицирован с учетом уточнения диапазона чисел Фруда, при которых реализуется захват судна попутной волной, и корректировки условия захвата попутной волной исходя из предположения об известности значения частоты вращения гребного винта [15].

Особо следует отметить предлагаемые [11] эксплуатационные меры. Общие принципы применения эксплуатационных мер приведены в таблице.

Применимость эксплуатационных мер для пяти сценариев потери остойчивости

Таблица

Сценарий потери остойчивости	Эксплуатационные меры		
	Эксплуатационные ограничения, связанные с районами или маршрутами и временем года	Эксплуатационные ограничения, связанные с максимальной значительной высотой волны	Эксплуатационная инструкция
Судно с выведенной из строя энергетической установкой	применимо	не применимо	не применимо
Чрезмерное ускорение	применимо	применимо	применимо
Чистая потеря остойчивости	применимо	применимо	применимо
Параметрическая бортовая качка	применимо	применимо	применимо
Серфинг/брочинг	применимо	применимо	применимо

По данным таблицы, для четырех сценариев потери остойчивости (чрезмерное ускорение, чистая потеря остойчивости, параметрическая бортовая качка и серфинг/брочинг) может использоваться любая эксплуатационная мера. Для режима потери остойчивости судном с выведенной из строя энергетической установкой эксплуатационные ограничения, связанные с максимальной значительной высотой волны, и эксплуатационная инструкция не применяются, поскольку этот сценарий потери остойчивости предполагает наличие неработоспособной главной двигательной установки и вспомогательных устройств. Такие суда не могут избежать штормовой погоды и, попав в штормовую погоду, не могут контролировать скорость и курс, чтобы следовать эксплуатационным рекомендациям.

Требуемый объем информации для подготовки эксплуатационных мер различен:

- эксплуатационные ограничения, связанные с районами или маршрутами и временем года, основаны на проектной оценке в сочетании с таблицей вероятностей волн и соответствующей статистике по ветру, которые соответствуют указанному району или маршруту в течение указанного времени года, поэтому для применения этих эксплуатационных ограничений не требуются данные о погоде при эксплуатации судна;
- эксплуатационные ограничения, связанные с максимальной допускаемой высотой волн 3 % обеспеченности, основаны на проектной оценке в сочетании с таблицей вероятностей волн, которая рассматривается до указанной допускаемой высоты волн. Поэтому для применения этих эксплуатационных ограничений требуется прогноз погоды, содержащий как минимум данные о волнении и план рейса, в котором учитывается прогноз погоды и фактический случай загрузки. Для обеспечения того, что судно не столкнется с ситуацией, когда допустимые условия плавания превышены, следует предусмотреть план рейса на ближайшие три дня, чтобы иметь достаточно времени для корректировки маршрута;
- эксплуатационная инструкция определяет для каждого состояния моря допустимые и недопустимые комбинации скорости хода судна и направления волны относительно курса судна, поэтому для них требуется подробная прогнозная информация об энергетическом спектре волн и характеристиках ветра. Для обеспечения того, что судно не столкнется с ситуацией, когда допустимые условия плавания превышены, следует предусмотреть план рейса на ближайшие три дня, чтобы иметь достаточно времени для корректировки маршрута.

Как видно, разработка эксплуатационных мер предполагает всесторонний учет условий плавания вне зависимости от выбранного варианта этих мер и отвечает общим принципам построения комплексной системы оценки и нормирования мореходных качеств.

В заключение остановимся на еще одном аспекте — мерах по энергоэффективности морских перевозок, принимаемых ИМО. Задачи, решаемые для повышения энергоэффективности, в судоходстве гораздо сложнее, чем в промышленности и стационарной энергетике [16]. Основным способом повышения энергоэффективности судов на сегодня остается уменьшение потребления топлива путем экономии и более рационального использования. Технологии получения энергии с нулевыми или околонулевыми выбросами CO₂ не находят существенного применения на судах, и их широкое использование не просматривается в обозримом будущем. Уменьшение и рационализация расхода топлива могут достигаться за счет планирования и корректировки маршрута, параметров движения судна (курс, скорость) в зависимости от внешних условий. Таким образом, в систему показателей мореходности может быть добавлен показатель экологичности движения судна. Такой показатель может быть как краткосрочным для конкретных текущих внешних условий, так и долговременным при учете характерных маршрутов грузоперевозок на судах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на результатах рассмотрения структуры и правил применения критерииов остойчивости второго поколения и вновь разрабатываемых ИМО экологических мер, можно сделать общий вывод о перспективности их интеграции в структуру комплексной системы оценки и нормирования мореходности. Перспективной также представляется и возможность дополнения критерииов мореходности, ориентированных на безопасность эксплуатации судна, критериями, учитывающими фактор защиты окружающей среды через оптимизацию параметров движения и возможный выход на включение в систему критерииов экономических параметров, учитывая, прежде всего, их тесную связь с экологичностью эксплуатации и влияние принимаемых ИМО мер по устойчивому судоходству.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутейников М.А. Вопросы мореходности транспортных судов / М.А. Кутейников. — СПб.: Бионт. — 2014. — 182 с.
2. MSC.1/Circ.1627.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Части II, IV / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
4. 2008 IS Code — International Code on Intact Stability, 2008. 4th ed. — London: International Maritime Organization, 2020. — V, 167 p.
5. Ruponen P. Rahola criterion revised: an overview of Jaakko Rahola's research and career / P. Ruponen // Proceedings of the 17th International Ship Stability Workshop (ISSW 2019). — Otakaari: Aalto University, 2019. — P. 15 — 20.
6. Живица С.Г. Теория и практическая оценка мореходности судов / С.Г. Живица. — СПб.: Крыловский гос. науч. центр, 2025. — 332 с.
7. Липис В.Б. Безопасные режимы штормового плавания судов / В.Б. Липис, Ю.В. Ремез. — М.: Транспорт, 1982. — 117 с.
8. Кутейников М.А. О методологии назначения эксплуатационных ограничений для транспортных судов по условиям мореходности в Правилах РС / М.А. Кутейников, В.Б. Липис // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 1997. — № 20. — С. 40 — 50.
9. Часовников Н.Ю. Краткий обзор критерииов мореходности и результаты проверки удовлетворения некоторым из них проектами судов АО «ЦМКБ «АЛМАЗ» / Н.Ю. Часовников, М.О. Франк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 52 — 60. — EDN HVQQRH.
10. Кутейников М.А. Обзор вероятностных методов оценки остойчивости / М.А. Кутейников, В.Р. Самойлов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 16 — 21.
11. IACS Rec. No. 34. Standard Wave Data, 2001.
12. MSC.1/Circ.1200.
13. Живица С.Г. Ускорения от качки и их учет при оценке мореходности судна / С.Г. Живица // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 68/69. — С. 20 — 33.
14. Семенова В.Ю. Определение ускорений в произвольных точках судна на основании нелинейной теории в условиях регулярного волнения / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 36 — 46.
15. Кутейников М.А. Предложения по модификации критерия риска потери остойчивости при движении судна на гребне волны (брочинге), предложенного ИМО / М.А. Кутейников, В.В. Макарова, Ю.П. Потехин, В.Р. Самойлов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 70/71. — С. 37 — 45.
16. Шурпяк В.К. Анализ потребления топлива и энергоэффективности на российских морских судах (2019 — 2024) / В.К. Шурпяк, А.Е. Чугаева, А.О. Березин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 148 — 163. — EDN YYPHNHE.

REFERENCES

1. Kuteynikov M.A. Voprosy morekhodnosti transportnykh sudov [Issues of seaworthiness of transport vessels]. St. Petersburg: Biont, 2014. 182 p.
2. MSC.1/Circ.1627.
3. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Parts II, IV / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
4. 2008 IS Code — International Code on Intact Stability, 2008. 4th ed. London: International Maritime Organization, 2020. V, 167 p.
5. Ruponen P. The revised Rahola Criterion: A review of Jaakko Rahola's research and career. *Proceedings of the 17th International Seminar on Ship Stability (ISSW 2019)*. Otakaari: Aalto University, 2019. P. 15 — 20.
6. Zhivitsa S.G. Teoriya i prakticheskaya otsenka morekhodnosti sudov [Theory and practical assessment of seaworthiness of ships]. St. Petersburg: Krylov State Research Center, 2025. 332 p.
7. Lipis V.B., Remez Yu.V. Bezopasnye rezhimy shtormovogo plavaniya sudov [Safe modes of stormy navigation of ships]. Moscow: Transport, 1982.
8. Kuteynikov M.A., Lipis V.B. On the methodology of assigning operational restrictions for transport vessels according to seaworthiness conditions in RS rules. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 1997. No. 20. P. 40 — 50. (In Russ.)
9. Chasovnikov N.Yu., Frank M.O. A brief overview of the seakeeping criteria and the results of checking the satisfaction of some of them by the projects of the vessels of JSC CMDB ALMAZ. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 52 — 60. (In Russ.)
10. Kuteynikov M.A., Samoilov V.R. Review of probabilistic methods of stability assessment. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 16 — 21. (In Russ.)

11. IACS Recommendation. № 34. Standard wave data, 2001.
12. MSC.1/Circ.1200.
13. Zhivitsa S.G. Accelerations due to ship motion in waves and their consideration in ship seakeeping assessment. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2022. No. 68/69. P. 20 — 33. (In Russ.)
14. Semenova V.Yu., Albaev D.A. Determination of accelerations at arbitrary points of a ship based on nonlinear theory in regular waves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 36 — 46. (In Russ.)
15. Kuteynikov M.A., Makarova V.V., Potekhin Yu.P., Samoilov V.R. Proposal for modification of vulnerability criterion for surf-riding (broaching) stability failure suggested by IMO. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 37 — 45. (In Russ.)
16. Shurpyak V.K., Chugaeva A.E., Berezin A.O. Analysis of energy efficiency and fuel consumption on Russian sea-going ships (2019 — 2024). *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 148 — 163. EDN YYPHHE. (In Russ.)

УДК 629.12.073.243.4
EDN FOCKTX

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕМПФИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАЧКИ ДЛЯ НАКРЕНЕННЫХ ШПАНГОУТНЫХ КОНТУРОВ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Д.А. Альбаев, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: albaevdaniel@gmail.com

А.И. Динцер, ассистент кафедры, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: cassraps19@gmail.com

В статье представлен численный подход (CFD) для определения коэффициентов демпфирования бортовой качки судового контура, находящегося в положении с начальным креном, что моделирует аварийную ситуацию. На основе гипотезы плоских сечений решаются осредненные уравнения Навье — Стокса (RANS) с моделью турбулентности $k-\omega$ SST и методом VOF для учета свободной поверхности. Численная реализация в пакете OpenFOAM использует динамическую сетку типа «Overset» для моделирования вынужденных колебаний двух характерных шпангоутных контуров в широком диапазоне частот. Ключевым результатом является демонстрация хорошего согласования рассчитанных безразмерных коэффициентов демпфирования (μ'_{44}) с экспериментальными данными для прямого положения (0°). Полученные результаты подтверждают адекватность и практическую применимость предложенного CFD-метода для точного прогнозирования гидродинамических характеристик качки судов из кренованного положения, что критически важно для оценки остойчивости и безопасности в нештатных условиях.

Ключевые слова: качка судна, коэффициенты демпфирования, CFD, вынужденные колебания, шпангоутный контур, угол крена, бортовая качка.

Для цитирования: Альбаев Д.А. Определение коэффициентов демпфирования бортовой качки для накрененных шпангоутных контуров численными методами / Д.А. Альбаев А.И. Динцер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 75 — 81. — EDN FOCKTX.

DETERMINATION OF DAMPING COEFFICIENTS OF ROLL FOR HEELED FRAME SECTIONS USING NUMERICAL METHODS

Д.А. Al'baev, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: albaevdaniel@gmail.com

А.И. Dintser, Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: cassraps19@gmail.com

This paper presents a numerical (CFD) approach for determining roll damping coefficients of ship frame contours at an initial heel angle, modeling emergency scenarios. The method employs the strip theory hypothesis, solving Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations with the SST $k-\omega$ turbulence model and VOF method for free-surface tracking. Implemented in OpenFOAM using an Overset dynamic mesh, forced oscillations of two characteristic frame contours are simulated across a wide frequency range. Key results demonstrate good agreement between calculated dimensionless damping coefficients (μ'_{44}) and experimental data for upright (0°) positions. The findings validate the proposed CFD method's adequacy and practical applicability for accurately predicting ship motion hydrodynamic characteristics from inclined positions — crucial for stability and safety assessment in off-design conditions.

Key words: ship roll motion, damping coefficients, CFD, forced oscillations, frame contour, heel angle, rolling.

For citation: Al'baev D.A., Dintser A.I. Determinations of damping coefficients of roll for heeled frame sections using numerical methods. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 75 — 81. EDN FOCKTX. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Точное определение коэффициентов демпфирования критически важно для прогнозирования остойчивости и безопасности судна в условиях морского волнения, особенно в нештатных ситуациях, таких как аварийный начальный крен. Хотя методы, основанные на потенциальной теории [1, 2], получили широкое распространение для расчета гидродинамических коэффициентов, их применимость к случаю судна с креном ограничена. Эти подходы недостаточно учитывают влияние значительного начального угла и демонстрируют погрешность, связанную с зависимостью от амплитуды качки. Например, экспериментально неоднократно подтверждалось, что линейная аппроксимация коэффициента демпфирования бортовой качки ошибочна. Значимость учета качки для безопасности и мореходности судна подчеркивается в работах, посвященных критериям мореходности [3].

Исследования демпфирования для положений с изначальным углом крена остаются недостаточно разработанными. Работы Я.М. Элиса [1, 2] систематизировали расчеты демпфирования для накрененных шпангоутов, но в рамках линейной постановки, что может не отражать реальную нелинейность аварийных сценариев. Расчет нелинейных дифракционных сил второго порядка для накрененных контуров, выполненный в [4], также указывает на существенную зависимость гидродинамических характеристик от угла крена. Исследования Н.Р. Piehl [5] с помощью CFD-симуляций подтвердили существенное влияние геометрии корпуса на вязкостное демпфирование, выявив ограничения как потенциальных, так и полуэмпирических методов. Однако расчеты вязкостного демпфирования для судов с начальным креном требуют дальнейшего углубленного изучения.

Перспективным направлением для учета сложных нелинейных эффектов, возникающих при начальном крене, являются численные методы, основанные на теории вязкой жидкости (CFD). Их ключевое преимущество перед потенциальными методами — прямой учет вязкости и турбулентности, что особенно важно для демпфирования. Методы CFD также успешно применяются для решения смежных задач, таких как оценка волнового сопротивления и картин волнообразования [6]. Например, в работе [7] с использованием CFD-кода MARIN ReFRESCO было проанализировано взаимодействие жидкости и корпуса при бортовой качке. Хотя исследование показало хорошее соответствие с экспериментами и данными CFX для различных амплитуд крена и периодов качки на симметричных контурах (с острой и закругленной скулой), оно не фокусировалось особо на влиянии начального (аварийного) крена на гидродинамические характеристики.

Таким образом, существует явная потребность в надежных методах расчета гидродинамических коэффициентов, прежде всего демпфирования, для реалистичного аварийного сценария — судна, совершающего бортовую качку из положения с начальным креном. Полученные данные могут быть использованы для последующего нелинейного анализа поведения судна на нерегулярном волнении, включая расчет ускорений в произвольных точках [8], что критически важно для оценки мореходности и безопасности. Целью настоящей работы является определение коэффициентов демпфирования бортовой качки при вынужденных колебаниях контура, имеющего начальный крен, с использованием современных методов CFD, и апробация полученных результатов.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

С целью снижения вычислительной сложности гидродинамические коэффициенты определяются в рамках гипотезы плоских сечений, предполагающей независимое рассмотрение обтекания характерных шпангоутов судна. В основе метода лежит система уравнений, основанная на подходе осреднения уравнений Навье — Стокса по Рейнольдсу (1) с использованием гипотезы Буссинеска (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_j} (\bar{u}'_i \bar{u}'_j); \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где F_i — массовые силы, включающие компоненту силы тяжести, зависимую от начального крена ($i=j=1, 2$).

$$-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \rho v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k; \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (2)$$

Система замыкается с помощью модели турбулентности $k-\omega$ SST:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\omega 1} P + C_{\omega 3} G) - (C_{\omega 2} - 1) \omega^2 + \frac{v_t}{\sigma_\omega k} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j}; \\ \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P + G - \varepsilon. \end{cases} \quad (3)$$

Для создания двухфазной жидкости применен метод «Volume of Fluid» (VOF):

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \alpha_m}{\partial x_j} = 0. \quad (4)$$

В начальный момент времени полагаются известными компоненты вектора скорости, давления, кинетическая энергия турбулентности и скорость диссипации турбулентной кинетической энергии. Свободная поверхность спокойна.

Условия на гранях расчетной области, используемые для разрешения задачи, и более подробное описание расчетного метода приведены в работе [9].

Численный эксперимент проводился при вынужденных колебаниях двух плоских контуров (рис. 1) с помощью динамической сетки типа «Overset» [9] с геометрией, принятой в соответствии с экспериментом [9].

№ 1. $B=0,4$ м; $T=0,2$ м; $R=0,025$ м

№ 2. $B=0,5$ м; $T=0,3$ м; $H=0,5$ м

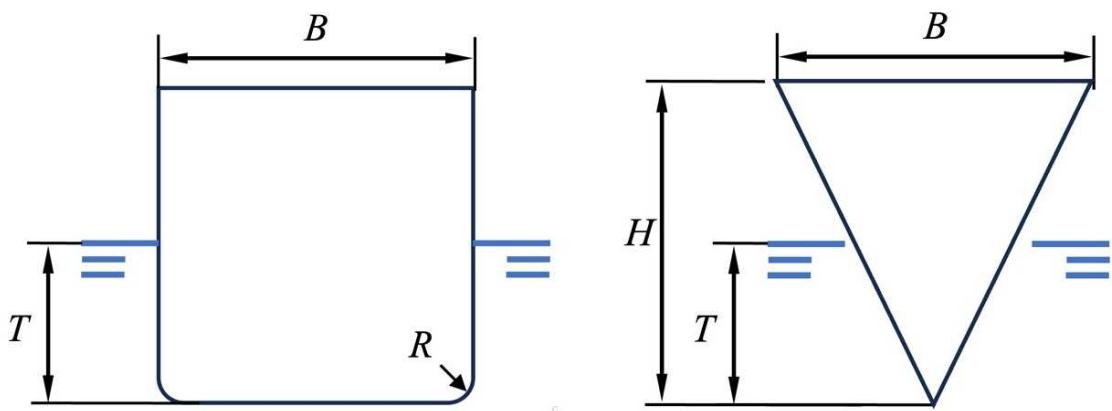


Рис. 1. Плоский контур, использующийся при расчете

На рис. 2 представлен окончательный вид расчетной сетки.

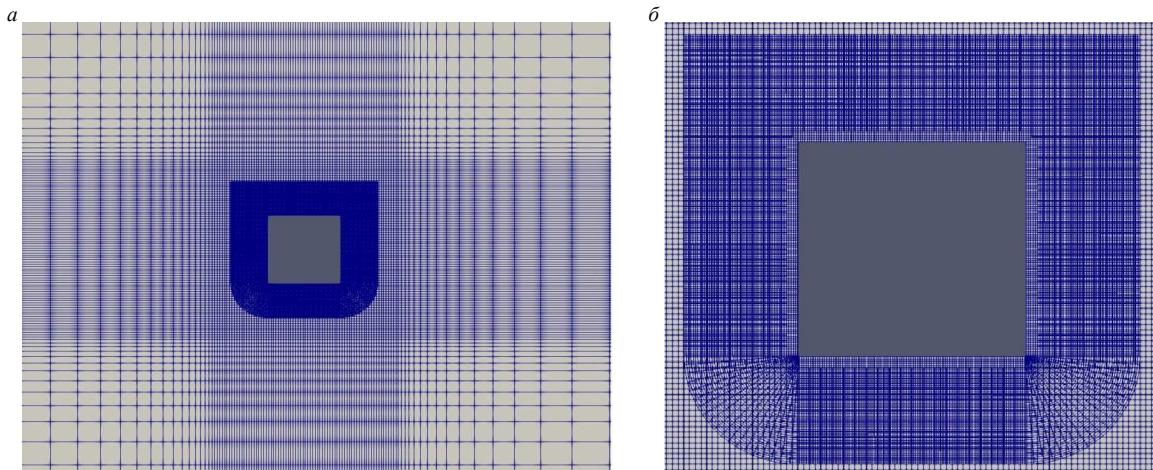


Рис. 2. Вид сетки, используемой при расчетах: *a* — расчетная область; *б* — область «Overset»

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчет бортовой качки был произведен при частотах вынужденных колебаний, приведенных в таблице:

№	ω , 1/c
1	0,5; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,4; 2,7; 3,1; 3,4
2	1,3; 1,6; 1,8; 2,1; 2,3; 2,6; 2,8; 3,1; 3,4; 3,6

Для четырех частот при 3 — 4 полных периодах колебаний приведены результаты момента, действующего на контуры, во временной области. Приведенные частоты аналогичны значениям из экспериментальных данных [9].

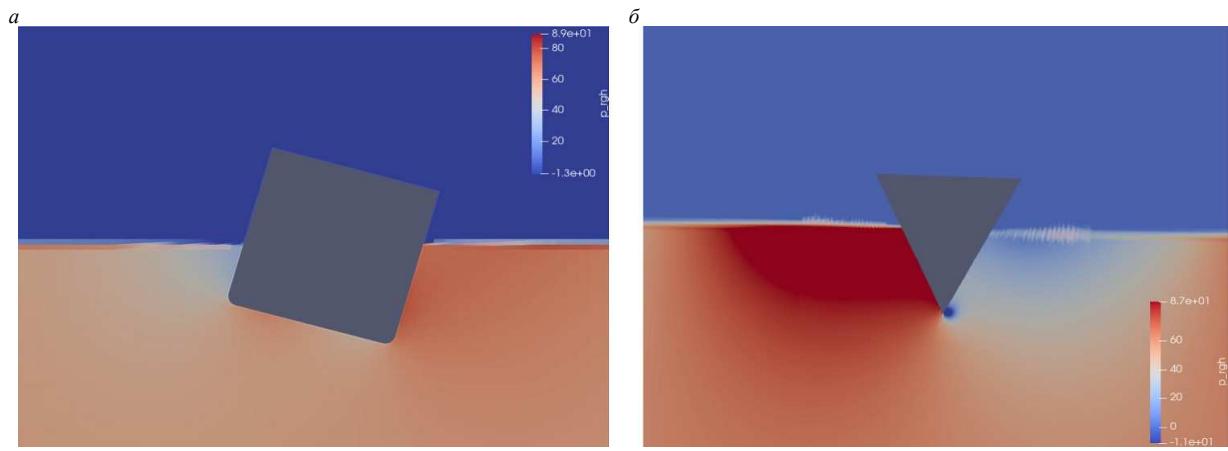


Рис. 3. Распределение давления вокруг контура: *а* — контур 1, $\theta = 10^\circ$; *б* — контур 2, $\theta = 0^\circ$

По этим данным построены графики. Анализ сигнала момента для каждой частоты включал сравнение его исходной записи с версией, обработанной методом дискретного преобразования Фурье (рис. 4).

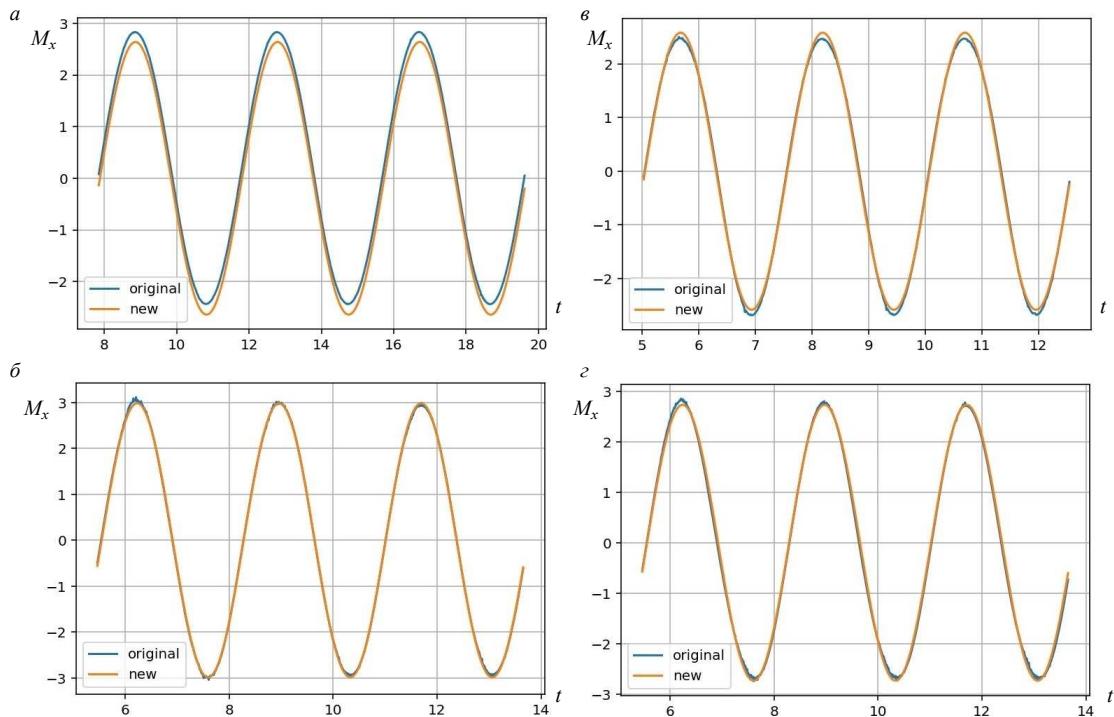


Рис. 4. Момент M_x , действующий на корпус при различных частотах:
а — $\omega = 1,6$ 1/c, контур 1, $\theta = 0^\circ$; *б* — $\omega = 3,1$ 1/c, контур 2, $\theta = 0^\circ$; *в* — $\omega = 2,5$ 1/c, контур 1, $\theta = 10^\circ$; *г* — $\omega = 2,3$ 1/c, контур 2, $\theta = 10^\circ$

По полученным амплитудам сил (моментов) M_x можно получить значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования, рассчитав их с помощью формул, описанных для экспериментальных методов, при этом преобразовав их для соответствующего вида колебаний:

$$\lambda_{44}\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta = M_A \sin(\omega t + \varepsilon); \quad (5)$$

$$\theta = \theta_A \sin(\omega t); \quad \dot{\theta} = \theta_A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t); \quad \ddot{\theta} = -\theta_A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t); \quad (6)$$

$$\theta_a \{-\lambda_{44} \cdot \omega^2 + Dh_0\} \sin(\omega t) + \theta_a \mu_{44} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = M_A \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin(\omega t) + M_A \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos(\omega t). \quad (7)$$

Из (7) при $\omega t = 0$:

$$\mu_{44} = \frac{M_A \cdot \sin \varepsilon}{\omega \theta_a}. \quad (8)$$

В данной работе результаты расчета гидродинамических сил и значения частот приведены в виде, аналогичной работе J. Vugts [10]:

$$\mu'_{44} = \frac{\mu_{44}}{\rho A B^2} \sqrt{B/2g}. \quad (9)$$

По формуле (9) рассчитываются гидродинамические коэффициенты и сравниваются с экспериментом на рис. 5.

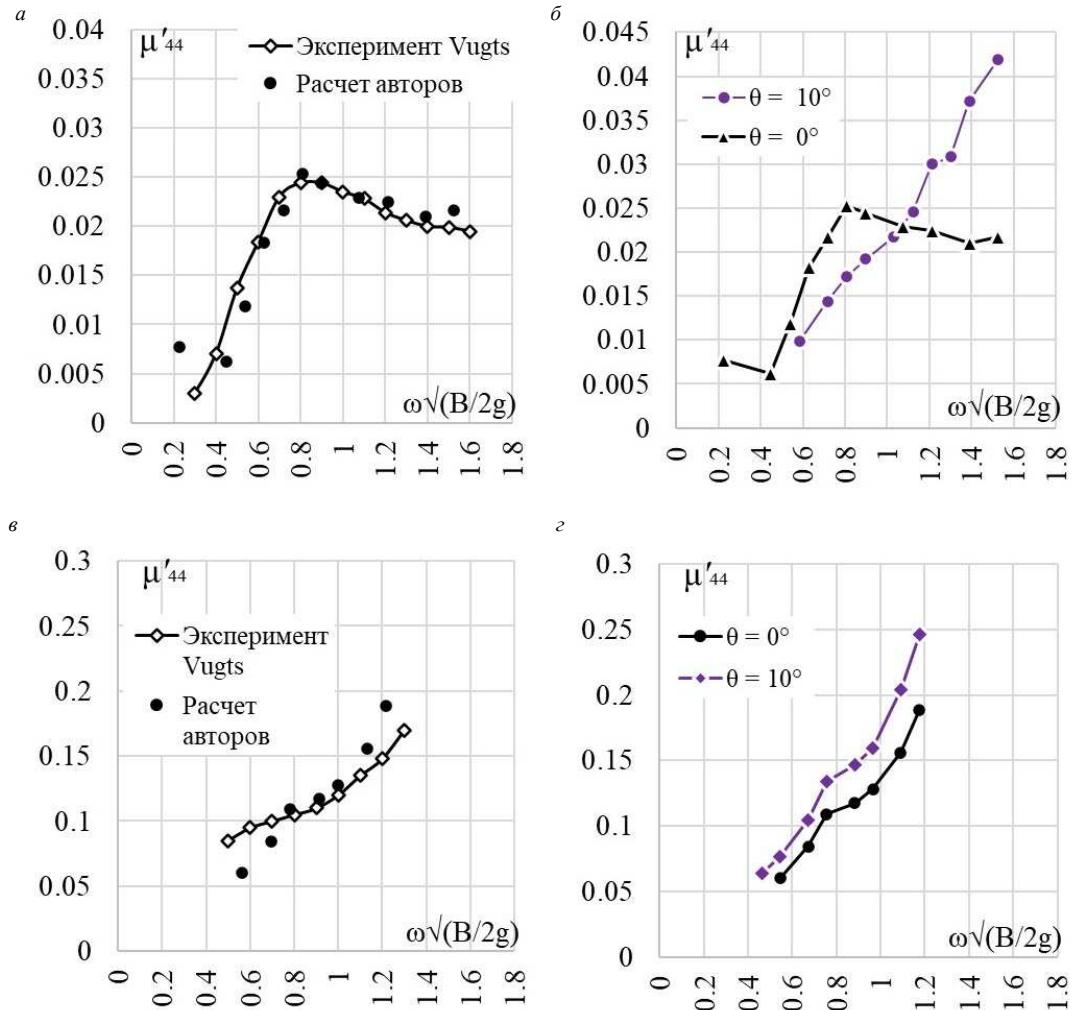


Рис. 5. Сравнение коэффициентов демпфирования: *а* — контур 1, $\theta = 0^\circ$; *б* — контур 1, расчеты авторов $\theta = 0^\circ, 10^\circ$; *в* — контур 2, $\theta = 0^\circ$; *г* — контур 2, расчеты авторов $\theta = 0^\circ, 10^\circ$

Для коэффициентов демпфирования в случае вынужденных бортовых колебаний (рис. 5 a , b) наблюдается хорошее согласование с экспериментальными данными [5, 10].

В то же время наблюдается значительное влияние начального крена на величины коэффициентов демпфирования. Так, для прямоугольного контура (рис. 5 δ) происходит не только количественное изменение значений, но и качественное. Для треугольного контура (рис. 5 ε) наличие крена увеличивает коэффициент демпфирования на всем диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе успешно решена актуальная задача по определению коэффициентов демпфирования бортовой качки для судового контура, находящегося в положении с начальным (аварийным) креном, с использованием современных методов вычислительной гидродинамики (CFD). Применение двумерной постановки (гипотеза плоских сечений) в сочетании с решением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS) и моделью турбулентности k - ω SST, а также методом VOF для учета свободной поверхности позволило достичь удовлетворительной точности при приемлемых вычислительных затратах. Численные эксперименты с вынужденными колебаниями двух характерных контуров при различных частотах продемонстрировали хорошее согласование расчетных значений коэффициента демпфирования μ'_{44} с известными экспериментальными данными [10]. Полученные коэффициенты демпфирования являются ключевым входным параметром для динамических моделей качки, используемых при оценке мореходности по критериям, аналогичным рассмотренным в [3]. Полученные результаты подтверждают эффективность и адекватность предложенного CFD-подхода для моделирования нелинейных гидродинамических эффектов, возникающих при бортовой качке из кренованного положения, что имеет ключевое значение для повышения точности прогнозирования остойчивости и безопасности судов в аварийных сценариях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элис Я.М. Присоединенные массы и демпфирование поперечных сечений накрененного судна / Я.М. Элис // Труды КТИРПиХ. 1980. Вып. 90.
2. Элис Я.М. Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при продольной качке судна с креном / Я.М. Элис // Труды КТИРПиХ. 1978. Вып. 54.
3. Часовников Н.Ю. Краткий обзор критерии мореходности и результаты проверки удовлетворения некоторым из них проектами судов АО «ЦМКБ «АЛМАЗ» / Н.Ю. Часовников, М.О. Франк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 52 — 61. — EDN HVQQRH.
4. Семенова В.Ю. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на накрененные шпангоутные контура / В.Ю. Семенова, А.И. Динцер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 51 — 61. — EDN AJDKJE.
5. Piehl H.P. Ship roll damping analysis: Doktors der Ingenieurwissenschaften / H.P. Piehl. — Universität Duisburg-Essen zur Erlangung, 2016.
6. Чебан Е.Ю. Оценка параметров волн при движении некоторых тел простой формы в свободном потоке численными методами / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников, Д.В. Никущенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 39 — 51. — EDN GIZBFY.
7. Jaouen F. Predicting roll added mass and damping of a ship hull section using CFD / F. Jaouen, A. Koop, G. Vaz // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2011. — Vol. 44397. — P. 105 — 115.
8. Семенова В.Ю. Определение ускорений в произвольных точках судна на основании нелинейной теории в условиях нерегулярного волнения / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 25 — 32. — EDN XIIMGW.
9. Альбаев Д.А. Вычисление гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при колебаниях шпангоутного контура численными методами / Д.А. Альбаев, Р.Р. Фахурдинов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3, ч. 1. — С. 200 — 209. — DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020.
10. Vugts J.H. The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface / J.H. Vugts. — Delft, 1968. (Technische Hogeschool Delft. Laboratorium voor Scheepsbouwkunde. Report no. 194).

REFERENCES

1. Elis Ya.M. Prisoedinennye massy i dempfirovaniye poperechnykh secheniy nakrenennogo sudna. [Added mass and damping of heeled ship cross-sections]. *Trudy KTIRPiKh*. 1980. Vyp. 90.
2. Elis Ya.M. Gidrodinamicheskie davleniya, prisoedinennye massy i koeffitsienty dempfirovaniya priprodol'noy kachke sudna s krenom [Hydrodynamic pressures, added masses and damping coefficients during longitudinal ship motions with list]. *Trudy KTIRPKh*. 1978. Vyp. 54.
3. Chasovnikov N.Yu., Frank M.O. A brief overview of the seakeeping criteria and the results of checking the satisfaction of some of them by the projects of the vessels of JSC CMDB ALMAZ. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 52 — 61. EDN HVQQRH. (In Russ.)
4. Semenova V.Yu., Dincer A.I. Calculation of second-order non-linear diffraction forces acting on heeled frame sections. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 51 — 61. EDN AJDKJE. (In Russ.)
5. Piehl H.P. Ship roll damping analysis: Doktors der Ingenieurswissenschaften. Universität Duisburg-Essen zur Erlangung, 2016.
6. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Nikushchenko D.V. A study of some simple-shape bodies wave generation during motion in the unrestricted flow. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 39 — 51. EDN GIZBFY. (In Russ.)
7. Jauen F., Koop A., Vaz G. Predicting roll added mass and damping of a ship hull section using CFD. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2011. Vol. 44397. P. 105 — 115.
8. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. Determination of accelerations at arbitrary points of a ship based on nonlinear theory in irregular waves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 25 — 32. EDN XIIMGW. (In Russ.)
9. Al'baev D.A., Fahurdinov R.R. Determination of hydrodynamic coefficients of added masses and damping due to motions of the frame contour by computational methods. *Marine Intellectual Technologies*. 2023. № 3 part 1. P. 200 — 209. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020. (In Russ.)
10. Vugts J. H. The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface. Delft, 1968. (Technische Hogeschool Delft. Laboratorium voor Scheepsbouwkunde. Report no. 194.)

УДК 629.5.017
EDN FOJTIH

ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ НАБОРА ДИАГРАММ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ АВТОНОМНОГО СУДНА

С.В. Шульц, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: svsch9@yandex.ru

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

В.Ю. Шульц, канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: vysch@yandex.ru

Актуальность выбранной темы исследования объясняется активным развитием автономного судовождения и необходимостью решения задач, возникающих в процессе эксплуатации морских автономных надводных судов. Разрабатываемая в рамках диссертационного исследования математическая модель экспресс-оценки характеристик качки судна на нерегулярном морском волнении предполагает наличие метода для вычисления плеча остойчивости в зависимости от угла крена и осадки. В данной работе рассмотрены математические методы аппроксимации поверхности, применимые для обработки неравномерно распределенных данных; построены аппроксимации поверхности, образованной набором диаграмм статической остойчивости, соответствующих различным случаям нагрузки масс судна, проведено сравнение полученных результатов. Сделан вывод, что наилучшими для данной задачи аппроксимационными способностями обладают методы, основанные на кубических и бигармонических сплайнах.

Ключевые слова: автономное судно, аппроксимация поверхности, бигармонический сплайн, кубический сплайн, тонкий пластиначатый сплайн, диаграмма статической остойчивости.

Для цитирования: Шульц С.В. Построение пространственной аппроксимации набора диаграмм статической остойчивости автономного судна / С.В. Шульц, М.А. Кутейников, В.Ю. Шульц // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 82 — 93. — EDN FOJTIH.

CONSTRUCTION OF A SPATIAL APPROXIMATION OF A SET OF DIAGRAMS OF STATIC STABILITY OF AN AUTONOMOUS SHIP

S.V. Shults, PhD student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: svsch9@yandex.ru

М.А. Кутейников, DSc, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

V.Yu. Shults, PhD, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vysch@yandex.ru

The relevance of the chosen research topic is explained by the active development of autonomous navigation and the need to solve tasks arising during the operation of marine autonomous surface ships. The mathematical model developed as a part of the research for the operational assessment of ship motion characteristics in irregular seas suggests a method for calculating the righting arm depending on the angle of roll and draft. In this paper, mathematical methods of surface approximation are considered, applicable for processing nonuniformly distributed data; approximations of the surface formed by a set of static stability diagrams corresponding to different cases of vessel mass loading are constructed, and the results obtained are compared. It is concluded that the methods based on cubic and biharmonic splines have the best approximation capabilities for this task.

Keywords: autonomous vessel, surface fitting, biharmonic spline, cubic spline, thin-plate spline, static stability diagram.

For citation: Shults S.V., Kuteynikov M.A., Shults V.Yu. Construction of a spatial approximation of a set of diagrams of static stability of an autonomous ship. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 82 — 93. EDN FOJTIH. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие автономных навигационных систем предвещает новую эру в морских перевозках, обещая повышение экономической эффективности и снижение влияния человеческого фактора на безопасность мореплавания [1, 2].

Безопасная эксплуатация автономного судна предъявляет жесткие требования к бортовым системам принятия решений: автономная система не может полагаться на интуицию и должна основывать свои решения на надежных вычислительных моделях, работающих в режиме реального времени.

Важными задачами являются предотвращение потери остойчивости (опрокидывания, брочинга) [3], навала на другие суда. Таким образом, разработка надежного и высокопроизводительного метода оценки и предсказания параметров качки судна на нерегулярном волнении является важным и актуальным направлением исследований.

Как было показано ранее [4], недостатком существующих нейросетевых методов оценки и предсказания параметров качки является то, что результаты расчетов, получаемые с их помощью, имеют существенную погрешность прогнозирования параметров качки судна вблизи экстремумов кривой углов бортовой и кильевой качки, что обусловлено тем, что данные модели не содержат в себе физики процесса качки, а потому дают недостоверные результаты, когда параметры входного процесса выходят за границы аппроксимационных возможностей модели или за границы «изученного» материала.

Разрабатываемая в рамках диссертационного исследования математическая модель экспресс оценки характеристик качки судна на нерегулярном морском волнении предполагает наличие метода для вычисления плеча остойчивости в зависимости от угла крена и осадки судна. Взаимосвязь между этими переменными в своей сути сложна и нелинейна.

Таким образом, практическая задача, решаемая в данном исследовании, состоит в построении непрерывной, эффективной с вычислительной точки зрения функции $l(\theta, T)$, которая с достаточной точностью представляет весь массив дискретных, предварительно рассчитанных данных о статической остойчивости судна.

В данной работе рассмотрены математические методы аппроксимации поверхностей, широко используемые для решения практических задач, связанных с обработкой нерегулярных, неравномерно распределенных данных; проведено моделирование и сравнение результатов построения аппроксимирующей поверхности, образованной набором диаграмм статической остойчивости, соответствующих различным типовым случаям загрузки железнодорожного парома, оснащенного техническими средствами автономного судовождения.

1. МЕТОДЫ АППРОКСИМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

В рамках данного исследования для построения аппроксимации поверхности были выбраны следующие математические методы:

- кусочно-линейная интерполяция. Широко применяется в задачах обработки изображений [5], лазерных проекционных системах [6, 7];
- полиномиальная аппроксимация. Данный метод используется в медицине для реконструкции в высоком разрешении изображений, полученных в результате проведения магнитно-резонансной томографии [8, 9];
- кубическая сплайн-интерполяция. Данный метод применяется для решения задач в нефтегазовой отрасли [10], геофизике [11] для моделирования природных резервуаров углеводородов;
- тонкопластинчатая сплайн-интерполяция. Данный метод нашел применение в задачах обработки изображений для учета нелинейных искажений [12], для моделирования деформаций антенн космических аппаратов [13];
- бигармоническая сплайн-интерполяция. Успешно используется для решения самых различных задач в области геодезии и батиметрии [14], изучения приливных течений [15] и солнечной радиации [16], моделирования характеристик фотоэлектрических модулей [17].

1.1 Кусочно-линейная интерполяция.

Линейная интерполяция позволяет построить поверхность по заданному набору точек путем нахождения коэффициентов соответствующего линейного многочлена. На исходном множестве точек выполняется построение триангуляции Делоне, затем для каждой тройки вершин строится свой линейный многочлен. В m -мерном случае он может выглядеть следующим образом:

$$\sum_{i=0}^1 f(\vec{x}_i) \prod_{k=1}^m \begin{cases} \vec{t}_k, \vec{t}_k = 0 \\ 1 - \vec{t}_k, \vec{t}_k \neq 0 \end{cases}$$

$$\vec{t} = \frac{\vec{x} - \vec{x}_0}{\vec{x}_1 - \vec{x}_0},$$

где векторные индексы означают выбор дискретных точек, скалярные — выбор компоненты вектора, $\vec{1}$ — вектор единиц, $\vec{0}$ — вектор нулей.

Пусть каждой тройке точек из исходного набора сопоставлены радиус-векторы $\vec{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $\vec{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$, $\vec{r}_3 = (x_3, y_3, z_3)$, тогда положение любой точки внутри данного треугольника может быть вычислено с помощью барицентрической интерполяции [18]:

$$\vec{r} = t_1 \vec{r}_1 + t_2 \vec{r}_2 + t_3 \vec{r}_3$$

$$f(\vec{r}) = \gamma_1 f(\vec{r}_1) + \gamma_2 f(\vec{r}_2) + \gamma_3 f(\vec{r}_3)$$

$$\gamma_1 = \frac{(\vec{r} - \vec{r}_3) \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_3)}{(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_3)}$$

$$\gamma_2 = \frac{(\vec{r} - \vec{r}_3) \times (\vec{r}_1 - \vec{r}_3)}{(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_3)}$$

$$\gamma_3 = \frac{(\vec{r} - \vec{r}_3) \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_3)}$$

Быстрый и вычислительно простой метод. Результирующая поверхность C^0 непрерывна (не имеет разрывов, но не является гладкой).

1.2. Полиномиальная аппроксимация.

Полиномиальная аппроксимация позволяет построить гладкую поверхность по заданному набору точек путем построения аппроксимирующего многочлена степени n следующего вида [19]:

$$z = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 y + a_5 x y^2 + a_6 x^2 y^2 + \dots + a_{(2n+2)} x^n y^n.$$

Определение коэффициентов многочлена может быть выполнено с помощью линейного метода наименьших квадратов, то есть путем минимизации суммы квадратов остатков:

$$\sum_{i=0}^n (a + \beta x_i + \varepsilon_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min.$$

Данный метод позволяет получить элегантное решение в виде единого аналитического выражения для вычисления значения z в любой точке (x, y) .

Кроме того, полиномы бесконечно дифференцируемы, поэтому результирующая поверхность C^∞ непрерывна (бесконечно дифференцируемая).

1.3. Кубическая сплайн-интерполяция.

Кубическая сплайн-интерполяция позволяет построить гладкую поверхность [20, 21] по заданному набору точек путем нахождения коэффициентов соответствующего кубического многочлена. На исходном множестве точек выполняется построение триангуляции Делоне, затем для каждой тройки вершин строится свой кубический многочлен. Получаемая поверхность удовлетворяет бигармоническому уравнению и, как следствие, имеет минимальную кривизну [22]. Интерполирующий многочлен может быть записан в следующем виде [23]:

$$f_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3,$$

$$a_i = f_i(x_i),$$

$$b_i = f'_i(x_i),$$

$$c_i = 3 \frac{f_i(x_{i+1}) - f_i(x_i)}{a_i^2} - 2 \frac{f'_i(x_i)}{a_i} - \frac{f'_i(x_{i+1})}{a_i},$$

$$d_i = 2 \frac{f_i(x_i) - f_i(x_{i+1})}{a_i^3} - \frac{f'_i(x_i)}{a_i^2} - \frac{f'_i(x_{i+1})}{a_i^2},$$

$$a_i = x_{i+1} - x_i.$$

В отличие от полиномиальной интерполяции, когда строится один многочлен высокой степени, сплайн-интерполяция использует комбинацию полиномов более низкой (в данном случае третьей) степени с дополнительным условием равенства производных этих полиномов на границах промежутка, которое обеспечивает гладкость функции. Такой подход позволяет решить проблему ограниченной локальной гибкости полиномов.

Результирующая поверхность C^2 непрерывна (непрерывны первая и вторая производные).

1.4. Тонкопластинчатая сплайн-интерполяция.

Тонкопластинчатая сплайн-интерполяция (англ. thin-plate spline) позволяет построить гладкую поверхность по заданному набору точек путем минимизации «энергии изгиба» тонкого металлического листа (тонкой пластины), «прижатого» к точкам этого набора.

Для заданного набора из N точек данных дифференциальное уравнение, моделирующее тонкую пластину (англ. thin plate), выглядит следующим образом:

$$f_i = \iint \left(\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \right) d_x d_y,$$

где $i \in \{1 \dots N\}$, f_i — сила прижима в i -й точке.

При построении аппроксимации вводится функция полной энергии системы E , минимизация которой позволяет контролировать отклонение построенной поверхности от исходного набора точек [24]:

$$E^2 = \sum (z_i - f(x_i, y_i))^2 + \beta^2 \iint \left(\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \right) d_x d_y,$$

где β — регуляризующий параметр, используемый для достижения более или менее гладкого решения в зависимости от задачи. Выбор малого значения β приводит к хорошему приближению данных, тогда как выбор большого значения β приводит к более гладкому решению.

В отличие от кубической сплайн-интерполяции в данном случае не требуется предварительное выполнение триангуляции на исходном наборе точек. Результирующая поверхность C^∞ непрерывна.

1.5. Бигармоническая сплайн-интерполяция.

Бигармоническая сплайн-интерполяция позволяет построить поверхность минимальной кривизны по заданному набору точек, представляя эту поверхность в виде линейной комбинации бигармонических функций Грина с центром в каждой точке набора данных.

Амплитуды функций Грина определяются путем решения линейной системы, которая гарантирует, что результирующая поверхность проходит через исходные точки [14].

Функция Грина для сплайна в одном измерении удовлетворяет бигармоническому уравнению:

$$\frac{d^4 \varphi}{dx^4} = 6\delta(x). \quad (1)$$

Частным решением для (1) является:

$$\varphi(x) = |x|^3. \quad (2)$$

Когда данная функция Грина используется для интерполяции N точек данных w_i , расположенных в x_i , уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \sum_{j=1}^N 6a_j \delta(x - x_j), \quad (3)$$

$$w(x_i) = w_i, \quad (4)$$

$$w(x) = \sum_{j=1}^N a_j |x - x_j|^3, \quad (5)$$

$$w_i = \sum_{j=1}^N a_j |x_i - x_j|^3. \quad (6)$$

Частным решением (3) и (4) является линейная комбинация функций Грина, центрированных в каждой точке набора данных. Коэффициенты a_j определяются путем решения линейной системы (6). Как только они определены, бигармоническая функция $w(x)$ может быть вычислена в любой точке с помощью уравнения (5).

В более общем случае с m измерениями и N точками задача выглядит следующим образом:

$$\nabla^4 w(x) = \sum_{j=1}^N a_j \delta(x - x_j),$$

$$w(x_i) = w_i,$$

где ∇^4 — бигармонический оператор,
 x — позиция в m -мерном пространстве.

Общее решение можно записать в виде:

$$w(x) = \sum_{j=1}^N a_j \varphi_m(x - x_j),$$

$$w_i(x) = \sum_{j=1}^N a_j \varphi_m(x_i - x_j).$$

Функция Грина φ_m и ее градиент $\nabla \varphi_m$ для m -мерного пространства задаются следующими выражениями:

$$\varphi_m = |x|^{4-m},$$

$$\nabla \varphi_m = (4-m)x|x|^{2-m}.$$

Метод не требует предварительного построения триангуляции на исходном наборе точек. Результирующая поверхность C^2 непрерывна [25].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. Описание исходных данных.

Набор данных для построения аппроксимации состоял из 2455 точек (рис. 1), соответствующих плечам остойчивости при различных сочетаниях осадки и угла крена железнодорожного парома, оснащенного техническими средствами автономного судовождения.

Данные получены путем оцифровки диаграмм статической остойчивости для всех типовых случаев загрузки.

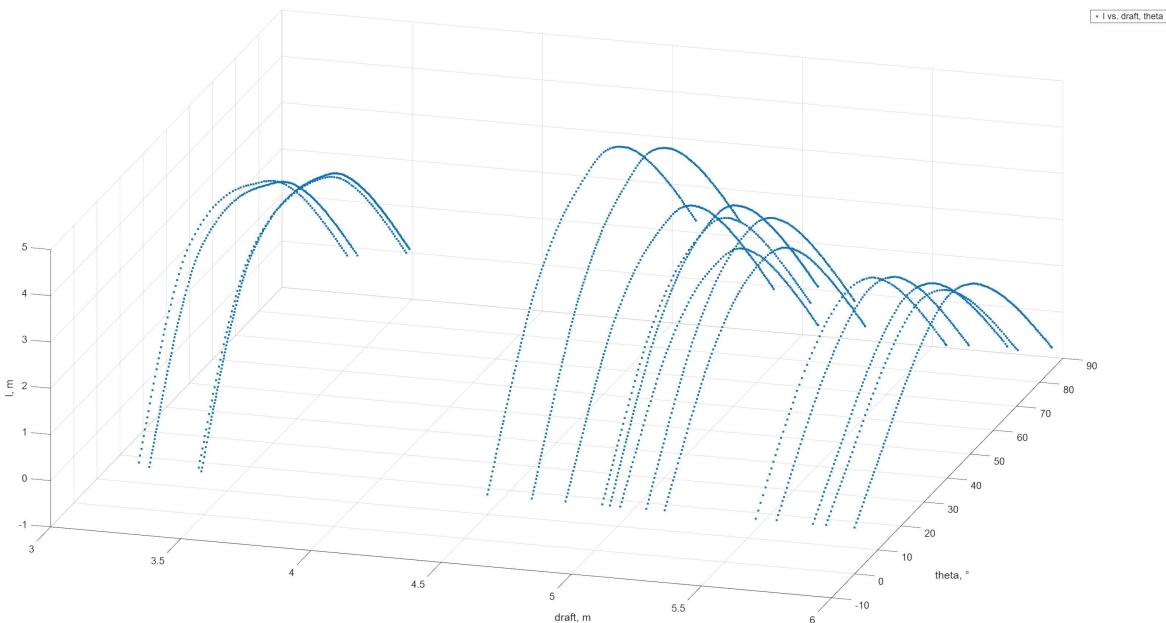


Рис. 1. Распределение точек в исходном наборе данных для построения аппроксимирующей поверхности. Зависимость плеча остойчивости от осадки и крена. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось l — плечо остойчивости [м]

2.2. Метрики оценки аппроксимаций.

Оценка точности каждого метода выполнялась на основании двух метрик: коэффициента детерминации R_2 и суммы квадратов ошибок (SSE).

Коэффициент детерминации отражает меру качества регрессионной модели $f: X \rightarrow Y$, описывающей связь между зависимой и независимыми переменными модели, и определяется как доля дисперсии зависимой переменной, объясненная регрессионной моделью с данным набором независимых переменных.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2},$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_i y_i}{n},$$

$$\hat{y}_i = f(x_i),$$

где: $SSE = \sum_i (y_i - \hat{y})^2$ — сумма квадратов ошибок (англ. sum square of errors),
 $SST = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$ — сумма квадратов отклонений от среднего (англ. sum square total).

Значение метрики R^2 лежит на отрезке $[0,1]$, причем аппроксимация тем качественнее, чем ближе значение метрики к единице. В случае, когда $R^2=1$, между переменными X и Y существует линейная функциональная зависимость, а в случае $R^2=0$ вариация зависимой переменной обусловлена исключительно неучтенными факторами.

2.3. Кусочно-линейная интерполяция.

На рис. 2 показана поверхность, построенная с помощью кусочно-линейной интерполяции, а на рис. 3 — ее контурное изображение.

Построенная поверхность является простейшей геометрической интерполяцией между исходными точками, поэтому значения $R^2=1,0$ и $SSE=0,0$ абсолютно ожидаемы.

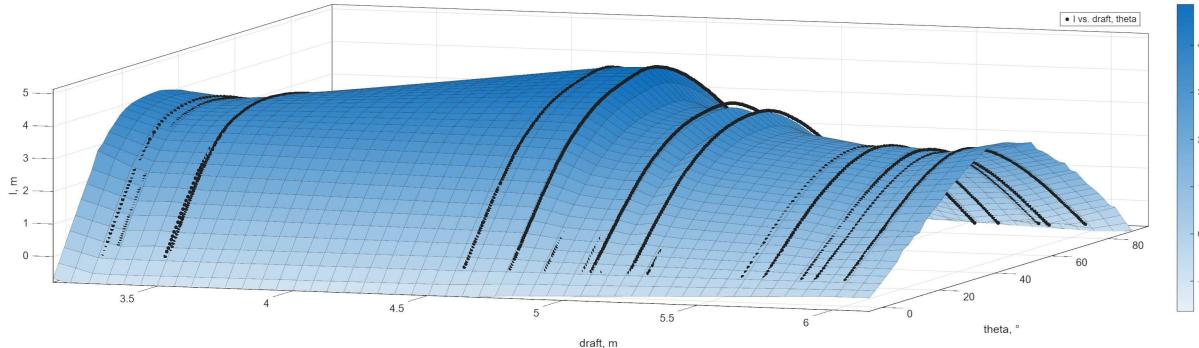


Рис. 2. Вид поверхности, построенной кусочно-линейной интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I. Черным отражены точки исходного набора данных

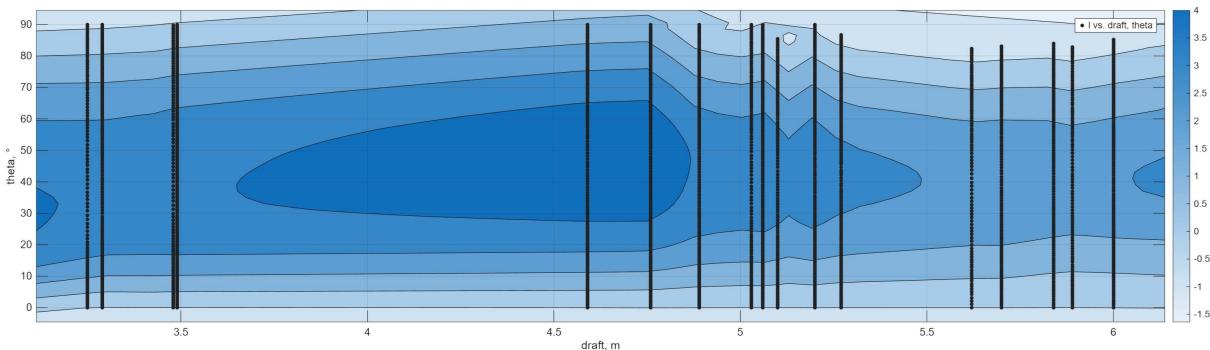


Рис. 3. Контурное изображение поверхности, построенной кусочно-линейной интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I

Основным недостатком метода в рамках решаемой задачи является то, что первая производная терпит разрыв на границах треугольников, составляющих аппроксимирующую поверхность, что затрудняет дальнейшее практическое применение полученного результата.

2.4. Полиномиальная аппроксимация.

На рис. 4 показана поверхность, построенная с помощью полиномиальной аппроксимации с полиномом третьего порядка, а на рис. 5 — ее контурное изображение.

Очевидно, что характер исходных данных не позволяет с помощью полинома третьего порядка построить сколь-нибудь качественное приближение поверхности к исходным точкам, $R^2=0,93475$ и $SSE=255,800$.

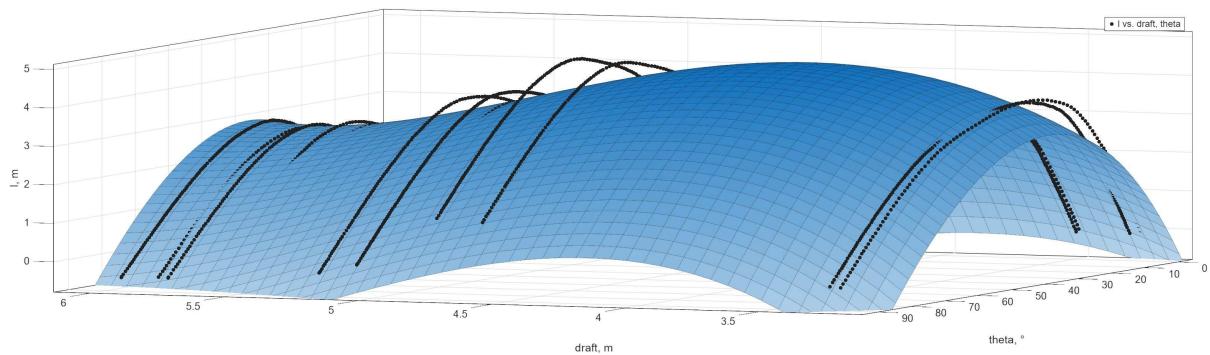


Рис. 4. Вид поверхности, построенной полиномиальной аппроксимацией с полиномом третьего порядка. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось l — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси l. Черным отражены точки исходного набора данных

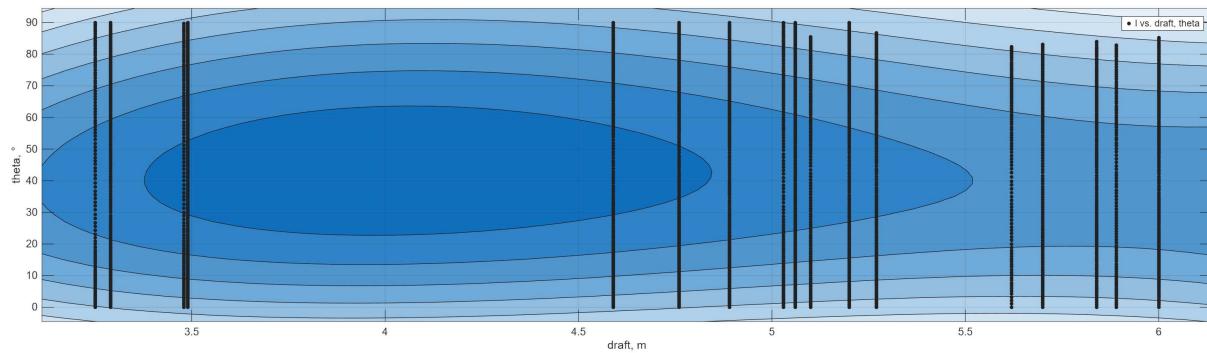


Рис. 5. Контурное изображение поверхности, построенной полиномиальной аппроксимацией с полиномом третьего порядка. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось l — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси l

Применение полинома более высокого порядка улучшает точность, но не дает качественно другого результата. На рис. 6 показана поверхность, построенная с помощью полиномиальной аппроксимации с полиномом пятого порядка, а на рис. 7 — ее контурное изображение. По-прежнему заметны существенные отклонения от данных, $R^2=0,97127$ и $SSE=112,640$.

Полиномиальная аппроксимация не позволяет учитывать сложные локальные особенности исходных данных, так как локальные отклонения не могут быть учтены без резкого изменения формы всей поверхности.

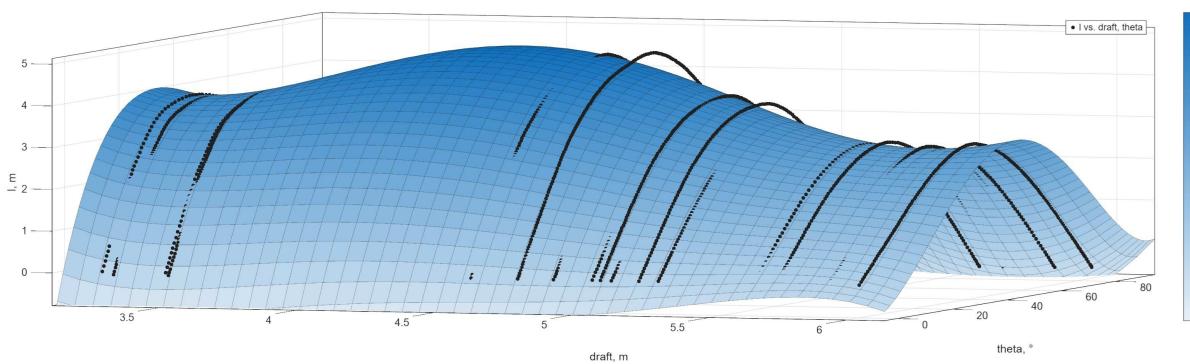


Рис. 6. Вид поверхности, построенной полиномиальной аппроксимацией с полиномом пятого порядка. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I. Черным отражены точки исходного набора данных

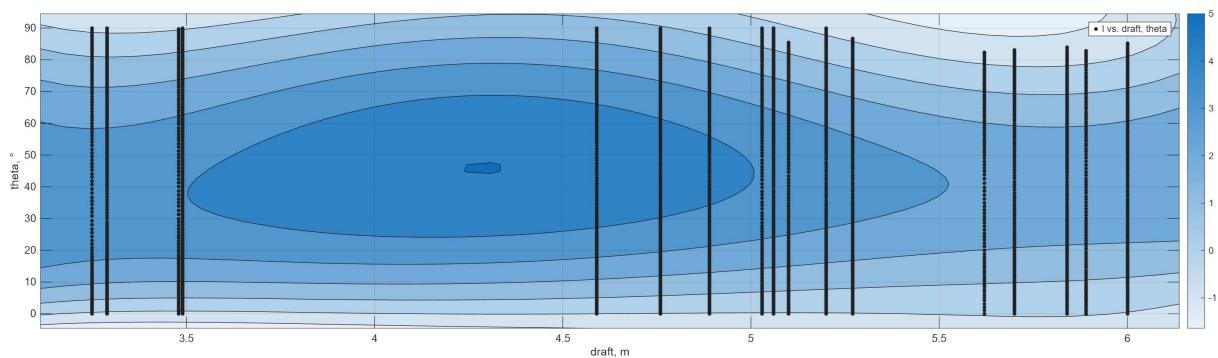


Рис. 7. Контурное изображение поверхности, построенной полиномиальной аппроксимацией с полиномом пятого порядка. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I

2.5. Кубическая сплайн-интерполяция.

На рис. 8 показана поверхность, построенная с помощью кубической сплайн-интерполяции, а на рис. 9 — ее контурное изображение.

Заметно намного более качественное приближение и учет локальных особенностей исходных данных по сравнению с полиномиальной аппроксимацией, $R^2=1,0$ и $SSE=4,454 \cdot 10^{-29}$.

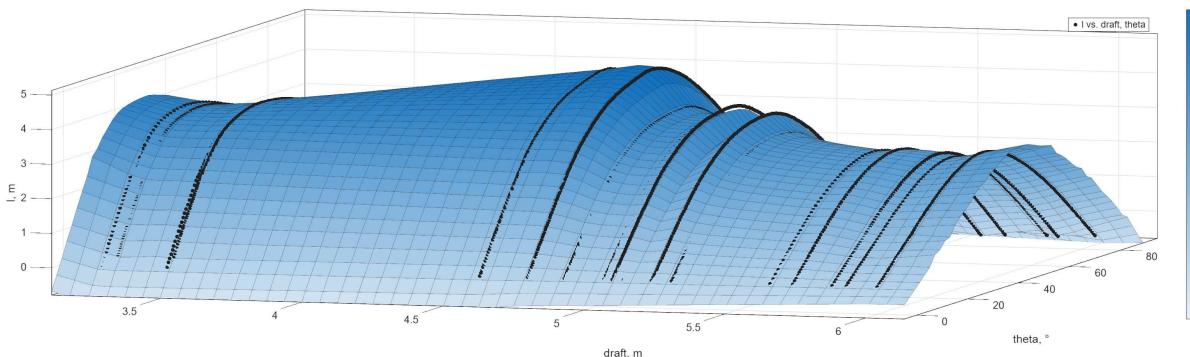


Рис. 8. Вид поверхности, построенной кубической сплайн-интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I. Черным отражены точки исходного набора данных

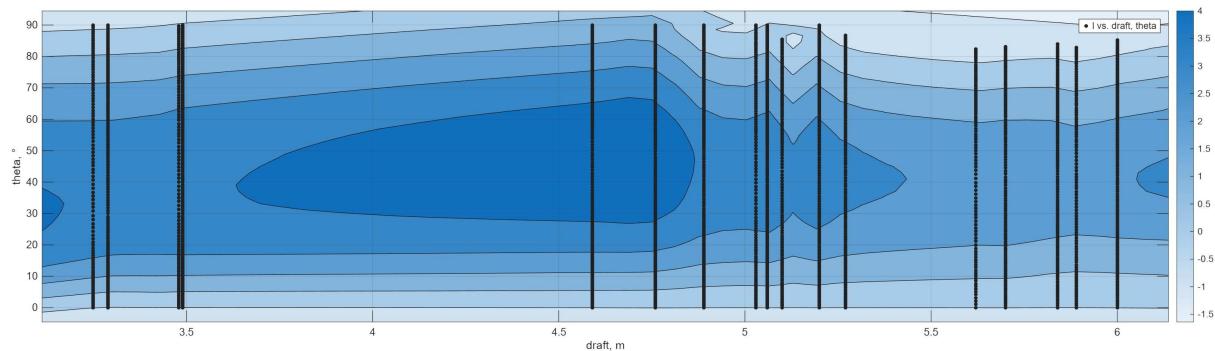


Рис. 9. Контурное изображение поверхности, построенной кубической сплайн-интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I

2.6. Тонкопластинчатая сплайн-интерполяция.

На рис. 10 показана поверхность, построенная с помощью тонкопластинчатой сплайн-интерполяции, а на рис. 11 — ее контурное изображение.

Данный метод показал точность аппроксимации, существенно уступающую полученной с помощью кубической сплайн-интерполяции, $R^2 = 0,93648$ и $SSE = 249,030$.

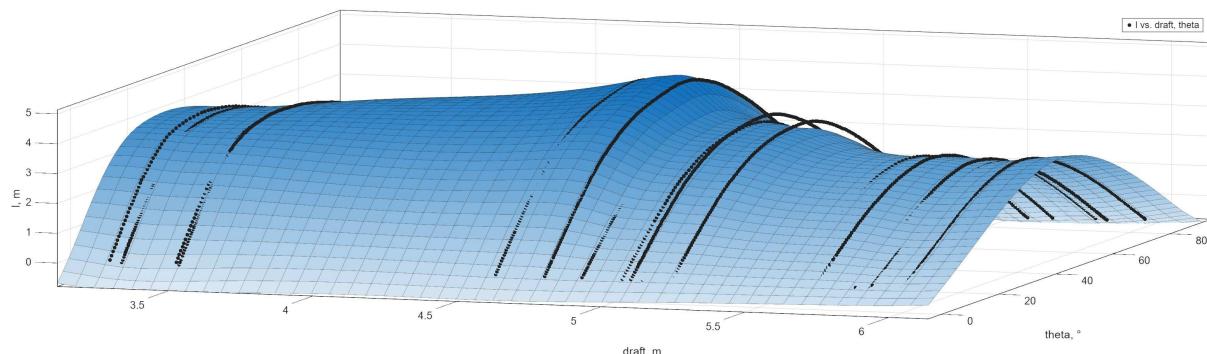


Рис. 10. Вид поверхности, построенной тонкопластинчатой сплайн-интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I. Чёрным отражены точки исходного набора данных

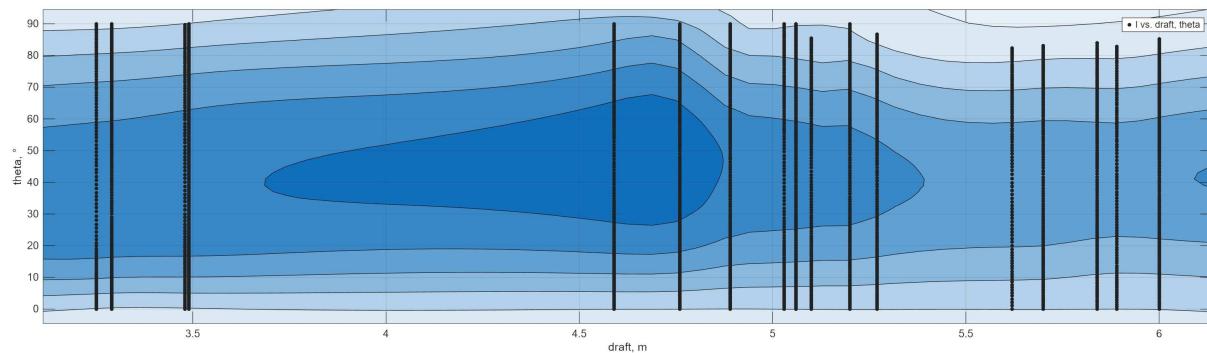


Рис. 11. Контурное изображение поверхности, построенной тонкопластинчатой сплайн-интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I

Тонкопластинчатая сплайн-интерполяция была разработана специально для аппроксимации разрозненных (англ. scattered) облаков точек, однако нечувствительность метода к данному конкретному распределению исходных данных не позволяет использовать его для решения данной задачи.

2.7. Бигармоническая сплайн-интерполяция.

На рис. 12 показана поверхность, построенная с помощью бигармонической сплайн-интерполяции, а на рис. 13 — ее контурное изображение.

Данный метод показывает наилучшую точность наравне с кубической сплайн-интерполяцией, $R^2=1,0$ и $SSE=4,742\cdot10^{-21}$.

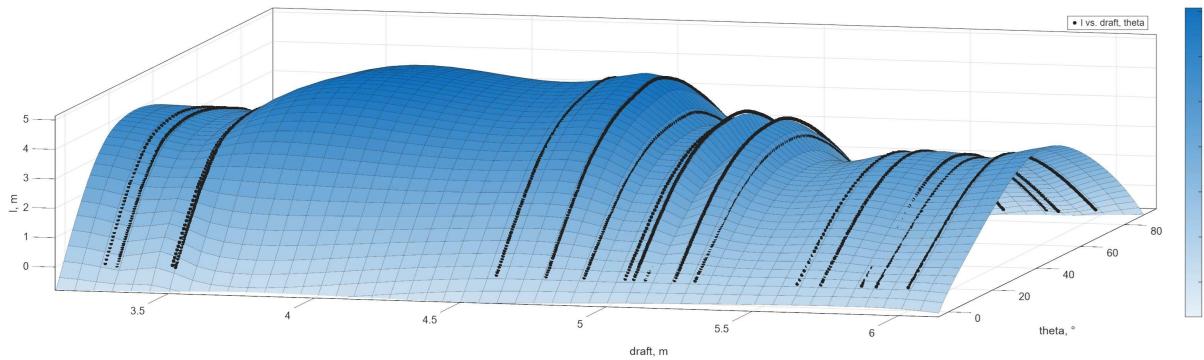


Рис. 12. Вид поверхности, построенной бигармонической сплайн-интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I. Черным отражены точки исходного набора данных

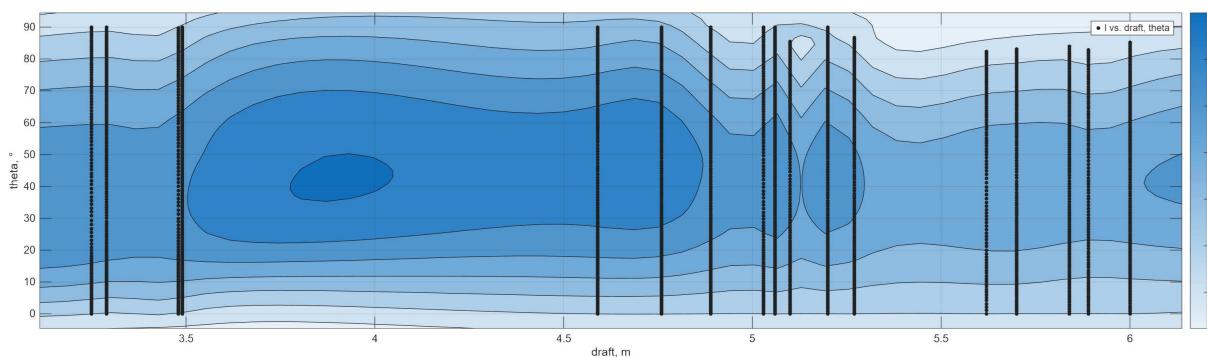


Рис. 13. Контурное изображение поверхности, построенной бигармонической сплайн-интерполяцией. Ось draft — осадка [м], ось theta — угол крена [град.], ось I — плечо остойчивости [м], цветовая шкала по оси I

Сводная таблица с оценками точности примененных методов

Метод	R^2	SSE
Кусочно-линейная интерполяция	1,00000	0,000
Полиномиальная аппроксимация, полиномом порядка 3	0,93475	255,800
Полиномиальная аппроксимация, полиномом порядка 5	0,97127	112,640
Кубическая сплайн-интерполяция	1,00000	$4,454\cdot10^{-29}$
Тонкопластинчатая сплайн-интерполяция	0,93648	249,03
Бигармоническая сплайн-интерполяция	1,00000	$4,742\cdot10^{-21}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была изучена эффективность различных математических методов построения непрерывной аппроксимации сложной поверхности, определяемой набором диаграмм статической остойчивости железнодорожного парома, при различных условиях загрузки. Сложностью явилось то, что исходные данные для построения аппроксимирующей поверхности представлены нерегулярным, неравномерно распределенным набором точек.

Кусочно-линейная интерполяция продемонстрировала высокую точность аппроксимации исходных данных благодаря своей локальной адаптивности. Однако присущий результирующей поверхности недостаток гладкости делает ее малопригодной для практического применения в дальнейшем.

Полиномиальная аппроксимация (полиномами третьего и пятого порядка) принципиально не подходит для решения данной задачи. Неспособность метода учесть локальные особенности исходных данных привела к низкому качеству аппроксимирующей поверхности.

Тонкопластинчатая сплайн-интерполяция была разработана для аппроксимации неравномерно распределенных исходных данных, однако обеспечила неожиданно низкую точность, сопоставимую с полиномиальной аппроксимацией. Нечувствительность метода к данному конкретному распределению исходных данных не позволяет использовать его для решения данной задачи.

Кубическая и бигармоническая сплайн-интерполяция оказались наиболее эффективными методами решения поставленной задачи. Оба метода успешно сочетают в себе конкурирующие требования высокой точности и гладкости аппроксимирующей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasyk L. The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents / L. Kasyk, A.E. Wolnowska, K. Pleskacz, T. Kapuściński // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, Issue 11. — P. 6780. — DOI 10.3390/app13116780.
2. Гомзяков М.В. Обзор аварийности морских транспортных судов Дальневосточного региона / М.В. Гомзяков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 4 — 10.
3. Кутейников М.А. Критерии риска потери остойчивости судна без хода / М.А. Кутейников, В.Р. Самойлов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 40 — 50.
4. Шульц С.В. Обзор применения искусственных нейронных сетей в задачах моделирования качки автономного судна / С.В. Шульц, М.А. Кутейников, В.Ю. Шульц // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 44 — 50. — EDN UFKSYW.
5. Jimenez-Fernandez V.M. Exploring the use of two-dimensional piecewise-linear functions as an alternative model for representing and processing grayscale-images / V.M. Jimenez-Fernandez, H. Vazquez-Leal, U.A. Filobello-Nino, M. Jimenez-Fernandez et al. // Journal of Applied Research and Technology. — 2016. — Vol. 14, No. 5. — P. 311 — 318. — DOI 10.1016/j.jart.2016.09.001.
6. Jimenez-Fernandez V.M. A parametric piecewise-linear approach to laser projection / V.M. Jimenez-Fernandez, H.H. Cerecedo-Nunez, H. Vazquez-Leal, L. Beltran-Parrazal et al. // Computational and Applied Mathematics. — 2014. — Vol. 33, Issue 3. — P. 841 — 858.
7. Jimenez-Fernandez V.M. A comparative study between piecewise-linear and point-based methodologies for galvanometer mirror systems / V.M. Jimenez-Fernandez, H. Vazquez-Leal, U.A. Filobello-Nino, H.H. Cerecedo-Nunez et al. // Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. — 2014. — Vol. 73. — P. 124 — 133.
8. Zhang Z.G. High-resolution reconstruction of human brain MRI image based on local polynomial regression / Z.G. Zhang, S.C. Chan, X. Zhang, E.Y. Lam et al. // 4th International IEEE/EMBS conference on neural engineering. — 2009. — P. 245 — 248.
9. Zhang Z.G. A new two-stage method for restoration of images corrupted by Gaussian and impulse noises using local polynomial regression and edge preserving regularization / Z.G. Zhang, S.C. Chan, Z. Y. Zhu // IEEE international symposium on circuits and systems. — 2009. — P. 948 — 951.
10. Karim S.A.A. Cubic spline interpolation for petroleum engineering data / S.A.A. Karim, M.A.M. Rosli, M.I.M. Mustafa // Applied Mathematical Sciences. — 2014. — Vol. 8. — P. 5083 — 5098.
11. Karim S.A.A. Seabed logging data curve fitting using cubic splines / S.A.A. Karim, N. Yahya // Applied Mathematical Sciences. — 2013. — Vol. 7, No. 81. — P. 4015 — 4026.
12. Ross A. A deformable model for fingerprint matching / A. Ross, S. Dass, A. Jain // Pattern Recognition. — 2005. — Vol. 38. — P. 95 — 103. — DOI 10.1016/j.patcog.2003.12.021.
13. Бикеев Е.В. Применение методики аппроксимации сплайном типа «тонких пластин» для определения деформаций крупногабаритного рефлектора / Е.В. Бикеев, Г.И. Калабегашвили // Наука и образование сегодня. — 2017. — № 2 (13). — С. 6 — 8.
14. Douglas B.C. The sea state correction for GEOS 3 and SEASAT satellite altimeter data / B.C. Douglas, R.W. Agreen // Journal of Geophysical Research. — 1983. — Vol. 88 (C3). — P. 1655 — 1661. — DOI 10.1029/JC088iC03p01655.
15. Munchow A. Detiding three-dimensional velocity survey data in coastal waters / A. Munchow // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. — 2000. — Vol. 17, Issue 5. — P. 736 — 748.
16. Feliciano L. Biharmonic spline interpolation for solar radiation mapping using Puerto Rico as a case of study / L. Feliciano, E. Ortiz-Rivera // Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012. — P. 002913 — 002915. DOI 10.1109/PVSC.2012.6318196.
17. Дебрин А.С. Разработка программных продуктов по моделированию характеристик фотоэлектрических модулей для повышения эффективности работы ФСЭС автономных потребителей / А.С. Дебрин, А.Ф. Семенов, А.В. Бастрон, П.Н. Кузьмин // Известия ОГАУ. — 2020. — № 3 (83). — С. 222 — 225.

18. Amidror I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey / I. Amidror // *Journal of Electronic Imaging*. — 2002. — Vol. 11, No. 2. — P. 157 — 176.
19. Ambrosius F. Interpolation of 3D surfaces for contact modeling / F. Ambrosius // *University of Twente Tech. Rep.* — March 2005. — 51 p.
20. Boor C. de. Bicubic spline interpolation / C. de Boor // *Journal of Mathematics and Physics*. — 1962. — Vol. 41, No. 4. — P. 212 — 218. DOI 10.1002/sapm1962411212.
21. Bhattacharyya B.K. Bicubic spline interpolation as a method for treatment of potential field data / B.K. Bhattacharyya // *Geophysics*. — 1969. — Vol. 34. — P. 402 — 423. — DOI 10.1190/1.1440019.
22. Briggs I.C. Machine contouring using minimum curvature / I.C. Briggs // *Geophysics*. — 1974. — Vol. 39, No. 1. — P. 39 — 48. — DOI 10.1190/1.1440410.
23. Turley R. Steven. Cubic interpolation with irregularly-spaced points in Julia 1.4 / R. Steven Turley; Brigham Young University // *Faculty Publications*. — 2018. — 2177.
24. Jain R. Machine Vision / R. Jain, R. Kasturi. B. Schunck. — McGraw-Hill, 1995. — 549 p.
25. Han X. Representation of piecewise biharmonic surfaces using biquadratic B-Splines / X. Han, J. Han // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2015. — Vol. 290. — P. 403 — 411. — DOI 10.1016/j.cam.2015.05.025.

REFERENCES

1. Kasyk L., Wolnowska A.E., Pleskacz K., Kapuściński T. The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, Issue 11. P. 6780. DOI 10.3390/app13116780.
2. Gomzyakov M.V. Overview of maritime transport casualties in the Far East. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 4 — 10. (In Russ.)
3. Kuteinikov M.A., Samoilov V.R. Criteria of risk of stability loss under dead ship condition. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56/57. P. 40 — 50. (In Russ.)
4. Shults S.V., Kuteinikov M.A., Shults V.Yu. An overview of application of artificial neural networks in modeling motions of autonomous ship. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 44 — 50. EDN UFKSYW. (In Russ.)
5. Jimenez-Fernandez V.M., Vazquez-Leal H., Filobello-Nino U.A., Jimenez-Fernandez M. et al. Exploring the use of two-dimensional piecewise-linear functions as an alternative model for representing and processing grayscale-images. *Journal of Applied Research and Technology*. 2016. Vol. 14, No. 5. DOI 10.1016/j.jart.2016.09.001.
6. Jimenez-Fernandez V.M., Cerecedo-Nunez H.H., Vazquez-Leal H., Beltran-Parrazal L. et al. A parametric piecewise-linear approach to laser projection. *Computational and Applied Mathematics*. 2014. Vol. 33, Issue 3. P. 841 — 858.
7. Jimenez-Fernandez V.M., Vazquez-Leal H., Filobello-Nino U., Cerecedo-Nunez H.H. et al. A comparative study between piecewise-linear and point-based methodologies for galvanometer mirror systems. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2014. Vol. 73. P. 124 — 133.
8. Zhang Z.G., Chan S.C., Zhang X., Lam E.Y. et al. High-resolution reconstruction of human brain MRI image based on local polynomial regression. *4th International IEEE/EMBS conference on neural engineering*. 2009. P. 245 — 248.
9. Zhang Z.G., Chan S.C., Zhu Z.Y. A new two-stage method for restoration of images corrupted by Gaussian and impulse noises using local polynomial regression and edge preserving regularization. *IEEE international symposium on circuits and systems*. 2009. P. 948 — 951.
10. Karim S.A.A., Rosli M.A.M., Mustafa M.I.M. Cubic spline interpolation for petroleum engineering data. *Applied Mathematical Sciences*. 2014. Vol. 8. P. 5083 — 5098.
11. Karim S.A.A., Yahya N. Seabed logging data curve fitting using cubic splines. *Applied Mathematical Sciences*. 2013. Vol. 7, No. 81. P. 4015 — 4026.
12. Ross A., Dass S., Jain A. A deformable model for fingerprint matching. *Pattern Recognition*. 2005. Vol. 38. P. 95 — 103. DOI 10.1016/j.patcog.2003.12.021.
13. Brikeev E.V., Kalabegashvili G.I. Primenenie metodiki approksimatsii splainom tipa «tonkikh plastin» dlya opredeleniya deformatsii krugnogabaritnogo reflektora [Application of the thin-plate spline approximation technique to determine the deformations of a large-sized reflector]. *Nauka i obrazovanie segodnya [Science and Education Today]*. 2017. No. 2 (13). P. 6 — 8.
14. Douglas B.C., Agreen R.W. The sea state correction for GEOS 3 and SEASAT satellite altimeter data. *Journal of Geophysical Research*. 1983. Vol. 88 (C3). P. 1655 — 1661. DOI 10.1029/JC088iC03p01655.
15. Munchow A. Detiding three-dimensional velocity survey data in coastal waters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2000. Vol. 17, Issue 5. P. 736 — 748.
16. Feliciano L., Ortiz-Rivera E. Biharmonic spline interpolation for solar radiation mapping using Puerto Rico as a case of study. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2012. P. 002913 — 002915. DOI 10.1109/PVSC.2012.6318196.
17. Debrin A.S., Semenov A.F., Bastron A.V., Kuzmin P.N. Development of software products for modeling the characteristics of photovoltaic modules to increase the FSES operation efficiency of autonomous consumers. *Izvestia. Orenburg State Agrarian University*. 2020. No. 3 (83). P. 222 — 225. (In Russ.)
18. Amidror I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey. *Journal of Electronic Imaging*. 2002. Vol. 11, No. 2. P. 157 — 176.
19. Ambrosius F. Interpolation of 3D surfaces for contact modeling. *University of Twente Tech. Rep.* March 2005. 51 p.
20. Boor C. de. Bicubic spline interpolation. *Journal of Mathematics and Physics*. 1962. Vol. 41, No. 4. P. 212 — 218. DOI 10.1002/sapm1962411212.
21. Bhattacharyya B.K. Bicubic spline interpolation as a method for treatment of potential field data. *Geophysics*. 1969. Vol. 34. P. 402 — 423. DOI 10.1190/1.1440019.
22. Briggs I.C. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*. 1974. Vol. 39, No. 1. P. 39 — 48. DOI 10.1190/1.1440410.
23. Turley, R. Steven. Cubic interpolation with irregularly-spaced points in Julia 1.4 / Brigham Young University. *Faculty Publications*. 2018. 2177.
24. Jain R., Kasturi R., Schunck B. Machine Vision. McGraw-Hill, 1995. 549 p.
25. Han X., Han J. Representation of piecewise biharmonic surfaces using biquadratic B-Splines. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2015. Vol. 290. P. 403 — 411. DOI 10.1016/j.cam.2015.05.025.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 621.74 + 624.012
EDN OGLHSP

КОМПЕНСАЦИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ ПУТЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ИЗГИБА КОРПУСА СУДНА

А.А. Воробьев, аспирант, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: wiay1997@mail.ru

А.П. Аносов, д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: anosov49@mail.ru

Остаточные сварочные напряжения, возникающие при судоремонте в процессе замены изношенных листов обшивки, могут представлять серьезную опасность с точки зрения общей продольной прочности корпуса судна. В работе выполнен анализ напряженного состояния по контуру вваренного в настил прямоугольного листа с учетом предварительного растяжения настила. Рассмотрены напряжения как в материале сварного шва, так и в околосшовных зонах настила и ввариваемого листа. Обоснован и сформулирован технологический способ устранения вызванной геометрическими параметрами выреза концентрации напряжений на контуре ввариваемого листа при компенсации сварочных напряжений путем предварительного растяжения ремонтируемого настила.

Ключевые слова: остаточные сварочные напряжения, концентрация напряжений, компенсация остаточных сварочных напряжений.

Для цитирования: Воробьев А.А. Компенсация сварочных напряжений с учетом их концентрации путем предварительного изгиба корпуса судна / А.А. Воробьев, А.П. Аносов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 94 — 107. — EDN OGLHSP.

COMPENSATION OF WELDING STRESSES TAKING INTO ACCOUNT THEIR CONCENTRATION BY PRELIMINARY BENDING OF THE SHIP'S HULL

A.A. Vorobyeva, PhD student, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: wiay1997@mail.ru

A.P. Anosov, DSc, Professor, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, tel: +7 (914) 697-01-86, e-mail: anosov49@mail.ru

Residual welding stresses that occur in the course of ship repair during the replacement of worn hull plates can pose a serious danger in terms of the overall longitudinal strength of the ship's hull. The paper analyzes the stress state along the contour of a rectangular sheet welded into the flooring taking into account the preliminary stretching of the flooring. Stresses are considered both in the weld material and in the near-seam zones of the flooring and the sheet being welded. A technological method is substantiated and formulated to eliminate the stress concentration on the contour of the welded sheet caused by the geometric parameters of the cutout while compensating for welding stresses by pre-stretching the repaired flooring.

Key words: residual welding stresses, stress concentration, compensation of residual welding stresses.

For citation: Compensation of welding stresses taking into account their concentration by preliminary bending of the ship's hull. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 94 — 107. — EDN OGLHSP. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию остаточных сварочных напряжений посвящено большое количество публикаций. Они касаются как общих, фундаментальных проблем [1, 2], так и вопросов, связанных с влиянием этих напряжений на прочность судовых конструкций (например, [3 — 6]).

Остаточные сварочные напряжения, возникающие при судоремонте в процессе замены изношенных листов обшивки, могут представлять серьезную опасность с точки зрения общей продольной прочности корпуса судна. На опасность высоких остаточных напряжений косвенно указывают вероятные причины аварий судов, сопровождающиеся переломом их корпусов. В работе [7] речь идет об аварии танкера «Находка» 2 января 1997 г. у побережья Японии. В штормовых условиях корпус переломился на расстоянии трети длины от носовой оконечности. Незадолго до аварии судно проходило ремонт, сопровождавшийся заменой большого количества листов обшивки, в том числе в районе излома. По имеющимся данным, часть ремонтных работ выполнялась на плаву, что ведет к неконтролируемому изменению остаточных сварочных напряжений (см. также [8, 9]). Развитие трещин, разрушивших корпус, по ступенчатой траектории, идущей по кромкам листов, можно объяснить обилием сварочных швов и, как следствие, сложным напряженным состоянием конструкций в районе замены листов при высоком уровне остаточных напряжений.

Сюда же можно отнести катастрофы двух танкеров: «Волгограднефть-212» и «Волгограднефть-239», произошедшие 15 декабря 2024 г. в Керченском проливе и сопровождавшиеся переломом корпусов (рис. 1). Танкеры 1969 и 1973 гг. постройки соответственно, то есть имеют возраст, значительно превышающий нормативные 24 года. Процесс их эксплуатации вследствие значительного износа сопровождался периодическими ремонтами с заменой листов и целых блоков, что, несмотря на имеющую место релаксацию, накапливало в корпусе остаточные сварочные напряжения, которые, в свою очередь, не могли не сказаться на прочности корпуса.



Рис. 1. Перелом корпуса танкера «Волгограднефть»: *а* — момент аварии; *б* — оставшаяся часть корпуса

При изгибе корпуса судна в вертикальной плоскости наибольшие напряжения, если не принимать во внимание надпалубные конструкции, действуют в настиле палубы. Ситуация усугубляется наличием прерывистых связей, которые служат источниками концентрации напряжений. Одним из распространенных видов прерывистых связей являются вырезы в палубе. Уровень концентрации напряжений характеризуется ее коэффициентом α_K .

При выполнении штатных вырезов (грузовые люки, шахты, лазы и т.п.) Правилами [10] предусмотрены конструктивные мероприятия, снижающие повышенные напряжения в районе концентраторов до допустимой по соображениям прочности величины. Так, например, в углах грузовых люков, имеющих скругление с регламентируемым Правилами радиусом не менее 0,1 от ширины люка, величина коэффициента концентрации напряжений не превышает $\alpha_K = 2,5$ [11].

Выполнение вырезов при судоремонте либо обусловлено заменой изношенных листов, либо это технологические вырезы для демонтажа (монтажа) подпалубных конструкций или оборудования. При этом вырезы выполняются, как правило, по существующим пазам и стыкам. В этом случае вырезы имеют прямые углы без скруглений, и коэффициент концентрации напряжений достигает величин $\alpha_K = 3 - 8$ в зависимости от ориентации выреза по отношению к направлению действия нагрузки и соотношения длин сторон выреза в диапазоне от 1:5 (вдоль) до 5:1 (поперек) соответственно [12].

В этом случае максимальные напряжения в районе концентратора $\sigma_{max} = \alpha_K \sigma_o$, где σ_o — номинальные напряжения без учета концентрации, не будут представлять опасности, если $\sigma_{max} < [\sigma]$, где $[\sigma]$ — допускаемые напряжения. В противном случае степень опасности разрушения зависит от свойств материала конструкции. Если корпусная сталь обладает высокой пластичностью (малоуглеродистая сталь), то напряжения, достигнув предела текучести, не будут далее расти, пока не будет исчерпана пластичность, а это вряд ли возможно в локальной области реальной судовой конструкции, выполненной из такого материала. Кроме того, возникшая локальная область пластических деформаций становится своего рода деконцентратором, снижающим коэффициент концентрации до величины, определяемой формой пластической области [13]. При этом локальная область пластических деформаций рассматривается как вырез, заполненный абсолютно пластичным материалом при напряжении, равном пределу текучести.

Иначе обстоит дело, если материал обладает низкой пластичностью, не имеет выраженной площадки текучести, а предел текучести по величине близок к пределу прочности (временному сопротивлению). В этом случае возможно быстрое исчерпание пластичности с последующим развитием хрупкой трещины. Для хрупкого материала разрушение неизбежно при $\sigma_{max} = \sigma_B$, где σ_B — предел прочности.

Концентрация напряжений не имеет значения, если судно стоит на стапеле, обеспечивающем прямолинейную килевую линию. При этом с некоторым допущением можно считать, что в связях корпуса отсутствуют напряжения. Данная статья является частью работы, в которой решается задача компенсации сварочных напряжений при замене листов обшивки за счет напряжений, возникающих в связях корпуса при его целенаправленном предварительном продольном изгибе, то есть в этом случае неизбежно необходим учет концентрации напряжений и, по возможности, ее устранение по контуру ввариваемых листов.

Сварочные напряжения при вварке листов в настил возникают вследствие усадки материала сварного шва при его затвердевании и остывании. Зона термического влияния сварного шва, как правило, мала по сравнению с размерами прилегающего к шву настила и ввариваемых в него листов, и при остывании материала шва холодные листы препятствуют его усадке, в результате чего в шве возникают растягивающие напряжения, а в прилегающих к нему областях основного металла — сжимающие напряжения.

На рис. 2 представлен характер распределения нормальных напряжений в поперечном сечении шва и прилегающих областях свариваемых листов [14] из титанового сплава.

Видно, что сварочные напряжения, как растягивающие в материале шва, так и сжимающие в околосшовной зоне свариваемых листов, имеют величину, соизмеримую с прочностными характеристиками материала. При этом сварочные напряжения суммируются с эксплуатационными напряжениями, величина которых в локальных областях зависит от уровня концентрации напряжений. Высокий уровень напряжений в локальных областях с учетом их цикличности при плавании судна в условиях волнения может быстро привести к возникновению трещин вследствие малоцикловой усталости.

Целью работы является обоснование способа устранения зон концентрации напряжений, обусловленной геометрическими параметрами вырезов, по контуру ввариваемых листов обшивки при судоремонте.

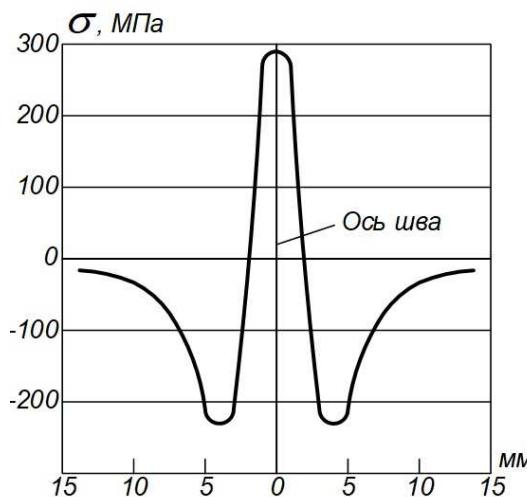


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений по поперечному сечению шва и прилегающих областей свариваемых листов из титанового сплава BT20 [14]

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ВВАРКЕ В НАСТИЛ ЛИСТА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрим качественную картину влияния сварочных напряжений на напряженное состояние предварительно растянутого листа с прямоугольным вырезом после вварки в него вставки и снятия предварительной растягивающей нагрузки. Единственным реальным способом обеспечения необходимых растягивающих напряжений в палубе или днище корпуса судна является его изгиб, который в рамках данной работы предлагается создавать с использованием надувных эластичных оболочек (НЭО). Некоторые аспекты их применения в технологических процессах при судоремонте и испытаниях корпусов представлены в работах [15, 16].

Использован вырез со скругленными углами, так как для него в литературе есть конкретные данные по распределению напряжений в районе концентратора, например в [11].

На рис. 3а показано распределение нормальных напряжений по контуру прямоугольного выреза в растянутой пластине и график, демонстрирующий снижение напряжений по мере удаления от кромки выреза (рис. 3б).

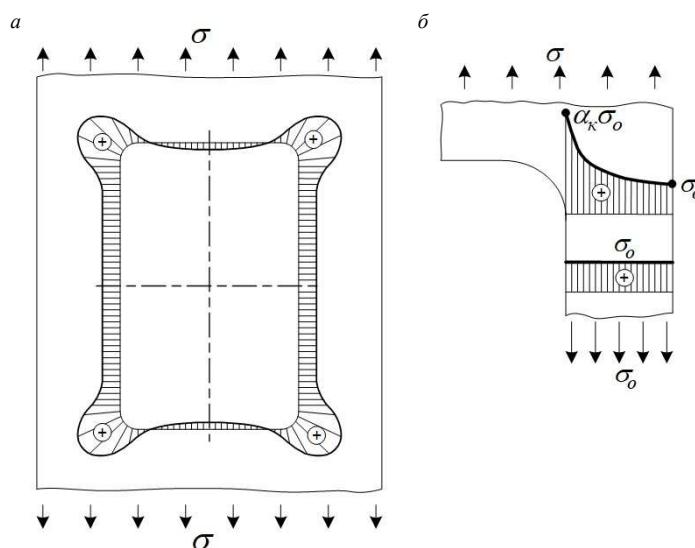


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений по контуру прямоугольного выреза в растянутой пластине (а) и снижение напряжений по мере удаления от кромки выреза (б)

Процедура замены части листа выполняется в следующей последовательности. В пластине делается прямоугольный вырез, после чего она нагружается растягивающей нагрузкой (рис. 4а и 5а).

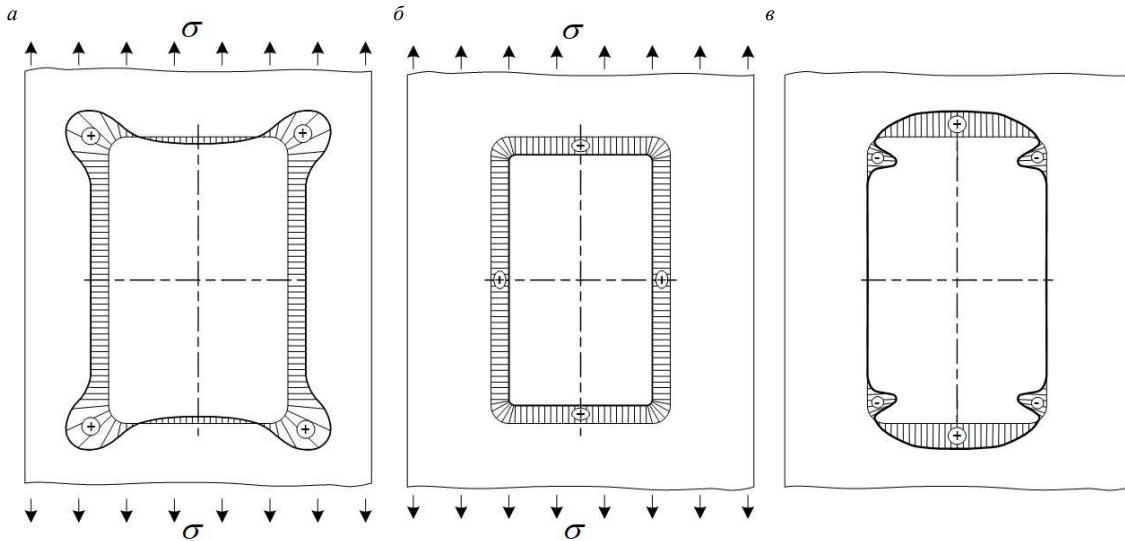


Рис. 4. Компенсация сварочных напряжений в материале сварного шва:
 а — нормальные напряжения по контуру выреза в предварительно растянутом листе;
 б — нормальные напряжения в материале шва после его затвердевания и остывания;
 в — остаточные нормальные напряжения в материале сварного шва после снятия предварительной растягивающей нагрузки

Величина этой нагрузки выбирается такой, чтобы нормальные напряжения на продольных кромках выреза вне зоны концентрации (района углов) равнялись расчетным сварочным напряжениям в материале шва после вварки вставки — листа, повторяющего форму выреза.

После вварки вставки и снятия предварительной нагрузки произойдет следующее (рис. 4в). Нормальные напряжения в сварных швах (рис. 4б) вдоль продольных кромок станут равны нулю. Если бы отсутствовал вваренный лист, то повышенные напряжения и соответствующие им деформации в районе концентратора напряжений при снятии предварительной нагрузки, релаксируя, стали бы равны нулю, но поскольку рядом находится вваренный лист, который препятствует релаксации деформации, то в процессе релаксации напряжения в сварном шве сначала обратятся в ноль, а в конечном итоге станут сжимающими величиной, равной разности сварочных напряжений и повышенных напряжений в районе концентрации. В сварном шве вдоль поперечной кромки вваренного листа по той же логике сжимающие напряжения на кромке выреза в основном металле, возникшие при предварительном нагружении, после снятия нагрузки суммируются со сварочными напряжениями в шве.

Рассуждая аналогичным образом, можно получить картину остаточных сварочных напряжений в околовшовной зоне вварного и основного листов, представленную на рис. 5.

Проведенный анализ не исключает погрешностей, но достаточно наглядно представляет качественную картину возникновения и компенсации сварочных напряжений при замене листов настила палубы.

Таким образом, в результате предварительного растяжения настила палубы при замене листов можно компенсировать растягивающие сварочные напряжения в продольных швах (рис. 4в), которые, не будучи компенсированными и суммируясь с напряжениями от общего продольного изгиба корпуса судна при движении на волнении, могут привести к серьезным повреждениям (усталостным, а затем и хрупким трещинам вплоть до перелома корпуса). При этом повышенные сварочные напряжения вдоль поперечных швов не представляют серьезной опасности для общей прочности корпуса.

Что касается околовшовных зон основного настила и вварного листа, то здесь в результате возникнут повышенные сжимающие напряжения (рис. 5в), которые в сумме с сжимающими напряжениями от общего изгиба корпуса могут достичь значительной величины. Это чревато появлением пластических деформаций или потерей устойчивости листов настила палубы, однако, имея в виду относительно малую ширину околовшовной зоны и быстрое падение напряжений по мере удаления от шва (рис. 2), серьезной опасности ни то, ни другое не представляет. С точки зрения усталости знакопостоянные циклические напряжения, меняющиеся в области сжатия, гораздо менее опасны, чем знакопеременные циклы.

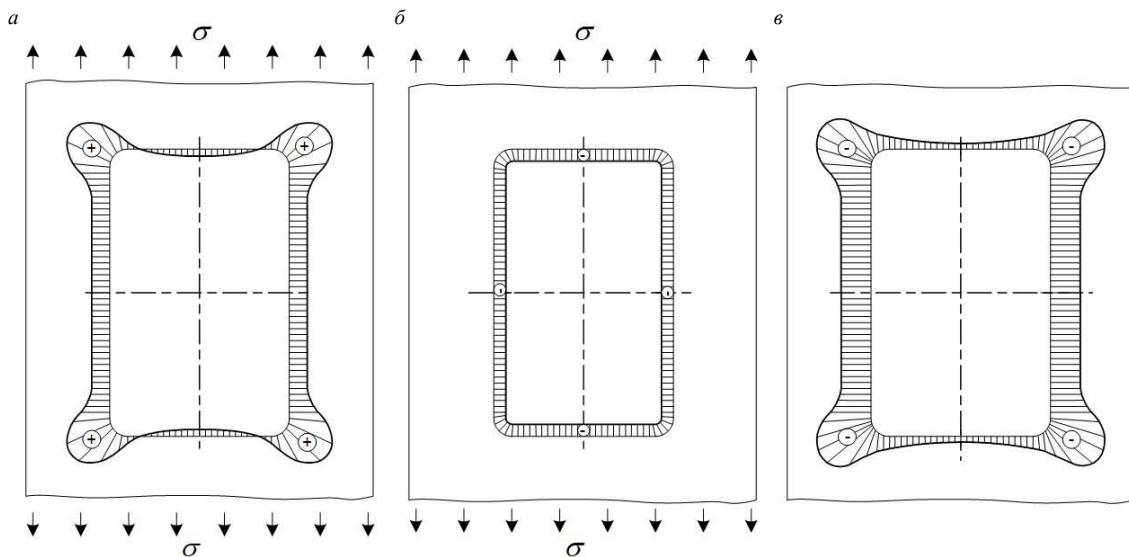


Рис. 5. Сварочные напряжения в основном и вварном листах:
 а — нормальные напряжения по контуру выреза в предварительно растянутом листе;
 б — нормальные сварочные напряжения в окколошовной зоне основного и вварного листов (см. рис. 2);
 в — остаточные нормальные напряжения в окколошовной зоне основного и вварного листов
 после снятия предварительной растягивающей нагрузки

Необходимость учета концентрации напряжений при назначении величины предварительных компенсирующих напряжений обусловлена следующей причиной. Будем исходить из того, что уровень предварительных компенсирующих напряжений в настиле с вырезом не должен приводить к возникновению пластических остаточных деформаций. Иными словами, величина предварительных напряжений должна быть как минимум ниже предела упругости и во всяком случае не превосходить предела текучести во всех точках контура выреза. В то же время величина предварительных компенсирующих напряжений по условиям рассматриваемого способа компенсации сварочных напряжений должна равняться величине последних, то есть $\sigma_0 = \sigma_{\text{РСВ}}$, где $\sigma_{\text{РСВ}}$ — расчетные сварочные напряжения. Исходя из сказанного, для района выреза, где есть концентрация напряжений, должно выполняться условие $\sigma_{\text{max}} = \sigma_0 \alpha_K < \sigma_t$, где σ_t — предел текучести материала. Выполнение или невыполнение этого условия зависит от величины $\sigma_{\text{РСВ}}$, которая определяется технологическими факторами с ограниченными возможностями влияния на них, и от величины коэффициента концентрации напряжений α_K , на который разными способами можно влиять в достаточно широком диапазоне.

При невыполнении указанного условия возможны два варианта дальнейших действий.

1. Снижение начальных компенсирующих напряжений до величины, при которой оговоренное условие будет выполняться. В результате сварочные напряжения в сварном шве будут компенсированы лишь частично.

2. Тем или иным способом снизить уровень концентрации напряжений до величины, при которой будет выполнено оговоренное условие. В литературе есть описание таких способов. Приведем два из них, которые исследованы в [11].

Первый способ основан на использовании усадки наплавленных валиков сварных швов для создания в зоне концентратора предварительных сжимающих напряжений. На рис. 6 приведена схема испытания на разрыв пластины с прямоугольным вырезом. В процессе испытаний определялся предел прочности. Во всех случаях разрыв происходил по линии, идущей от углов выреза к краю пластины. Испытывалась пластина в исходном состоянии, а также аналогичные пластины с разными вариантами наплавки валиков швов, схемы которых приведены на рис. 7а.

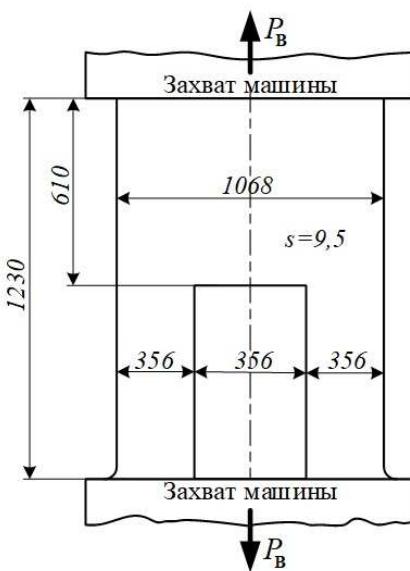
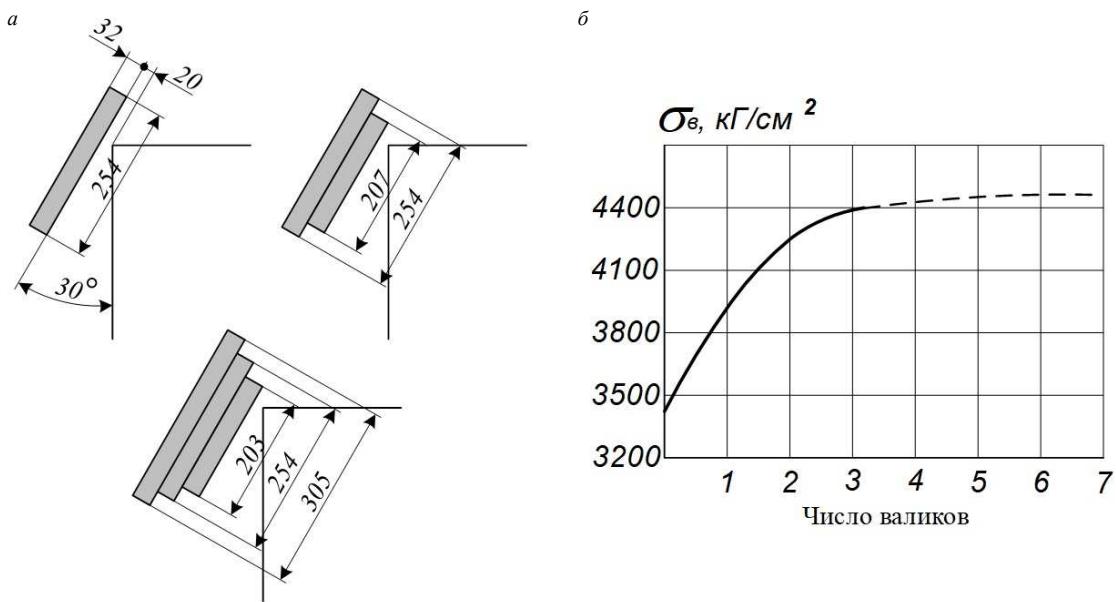


Рис. 6. Схема испытания на разрыв пластины с прямоугольным вырезом [11]

Рис. 7. Наплавка валиков сварных швов с целью создания поля сжимающих напряжений в районе концентратора:
а — варианты схемы наложения валиков швов; б — зависимость предела прочности от числа валиков [11]

В процессе испытаний установлено, что наложенные валики швов увеличивают предел прочности пластины. Надо полагать, что речь идет о пределе прочности именно конструкции, но не материала, то есть возрастает суммарная сила P_B , соответствующая моменту разрушения и, как следствие, увеличиваются расчетные напряжения при делении возросшей силы на неизменную площадь сечения. Это объясняется тем, что при возрастании во время испытания растягивающая нагрузка сначала достигает величины, при которой становятся равны нулю предварительные сжимающие напряжения, а далее от этого уровня возрастает до момента разрыва, при этом фактические растягивающие напряжения увеличиваются от нуля до предела прочности материала. Следуя этой логике, по графику на рис. 7б можно вычислить предварительные сжимающие напряжения при различных вариантах наложения валиков швов. Например, при трех валиках начальные напряжения $\sigma_{\text{нач}} = 4400 - 3400 = 1000 \text{ кГ/см}^2$ или 102 МПа, где $\sigma_B = 4400 \text{ кГ/см}^2$ — предел прочности пластины с тремя наплавленными валиками, а $\sigma_B = 3400 \text{ кГ/см}^2$ — предел прочности пластины в исходном состоянии.

Второй способ состоит в приваривании в районе концентратора предварительно нагретой полосы, которая, остывая и сжимаясь, создает поле сжимающих напряжений, действующих в направлении последующего растяжения (рис. 8а).

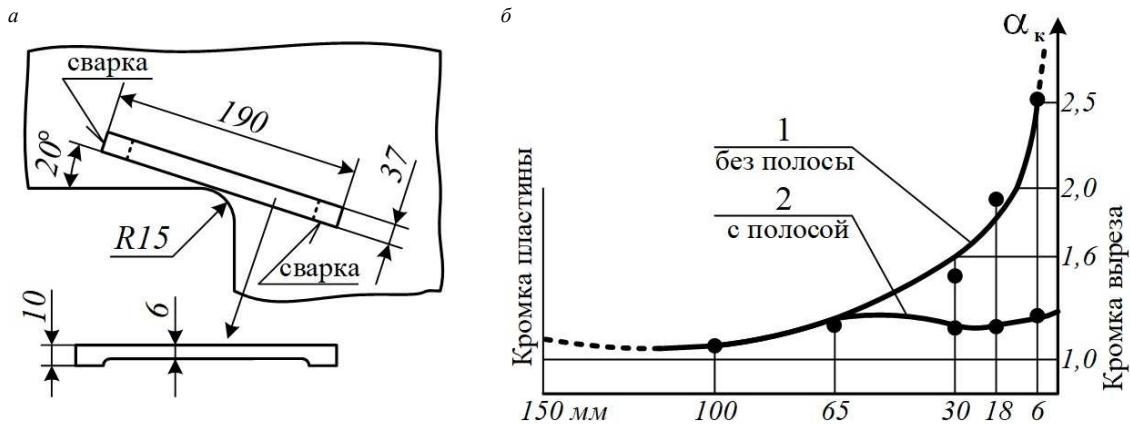


Рис. 8. Снижение коэффициента концентрации напряжений путем создания поля предварительных сжимающих напряжений за счет приварки нагретой полосы: а — схема приварки нагретой полосы; б — изменение коэффициента концентрации напряжений по мере удаления от кромки выреза [11]

По графику (рис. 8б) видно, что данный способ достаточно эффективен: на кромке выреза коэффициент концентрации снизился с величины более 2,5 до 1,3. Однако надо иметь в виду, что приваренная полоса после остывания будет испытывать растяжение, и существует опасность ее разрыва при действии дополнительной эксплуатационной нагрузки. Правда, эту проблему можно решить, используя для изготовления полосы сталь повышенной прочности. Есть и другие отрицательные факторы. Нежелательны любые выступающие над поверхность палубы наварыши. Кроме того, в узкий зазор под полосой будет попадать вода, что при контакте с воздухом неизбежно приведет к интенсивной коррозии.

Наряду со сказанным оба описанных способа «грешат» общим недостатком, связанным с наложением на конструкцию дополнительных сварочных швов. Дело в том, что в то время, когда выполнялась работа [11] (конец 40-х годов прошлого века), преобладало мнение, что причиной имевших место случаев перелома корпусов судов являются хрупкие трещины, распространяющиеся от концентратора напряжений. Это отчасти верно на стадии «долома», когда начальная трещина достигала критической длины. Усталость материала, которая является первопричиной появления начальной трещины, в то время не рассматривалась. Позже было установлено, что сварные швы, одновременно являясь концентраторами напряжений и обладая не лучшей с точки зрения усталости структурой материала, провоцируют зарождение усталостных трещин. В связи с этим следует стремиться к минимальному количеству сварных швов в конструкции, избегая их скученности.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТУРЕ ВЫРЕЗА В РАСТЯНУТОЙ ПЛАСТИНЕ

С целью обоснования способа снижения остаточных напряжений, обусловленных концентрацией напряжений в углах выреза в обшивке, технологическими средствами были выполнены расчеты по исследованию напряженного состояния растянутой пластины с прямоугольным вырезом (рис. 9). Расчеты выполнялись с использованием версии МКЭ в программном продукте SolidWorks.

На рис. 10 показано в цветовой визуализации напряженное состояние исследуемой пластины.

Во всех расчетах к пластине прикладывалась растягивающая сила $P=1$ Мн. При этом напряжения в поперечном сечении части пластины без выреза равны 44,6 МПа, а в боковых полосах сечения по вырезу, ширина которого равна половине ширины пластины, их величина составляет 88,5 МПа, то есть практически в два раза больше, чем в сечении без выреза.

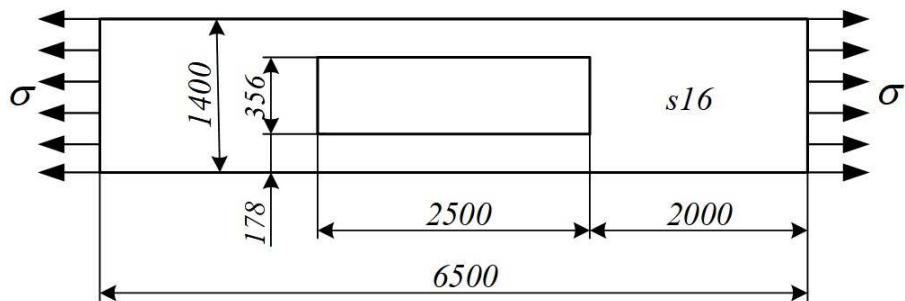


Рис. 9. Размеры исследуемой пластины с вырезом

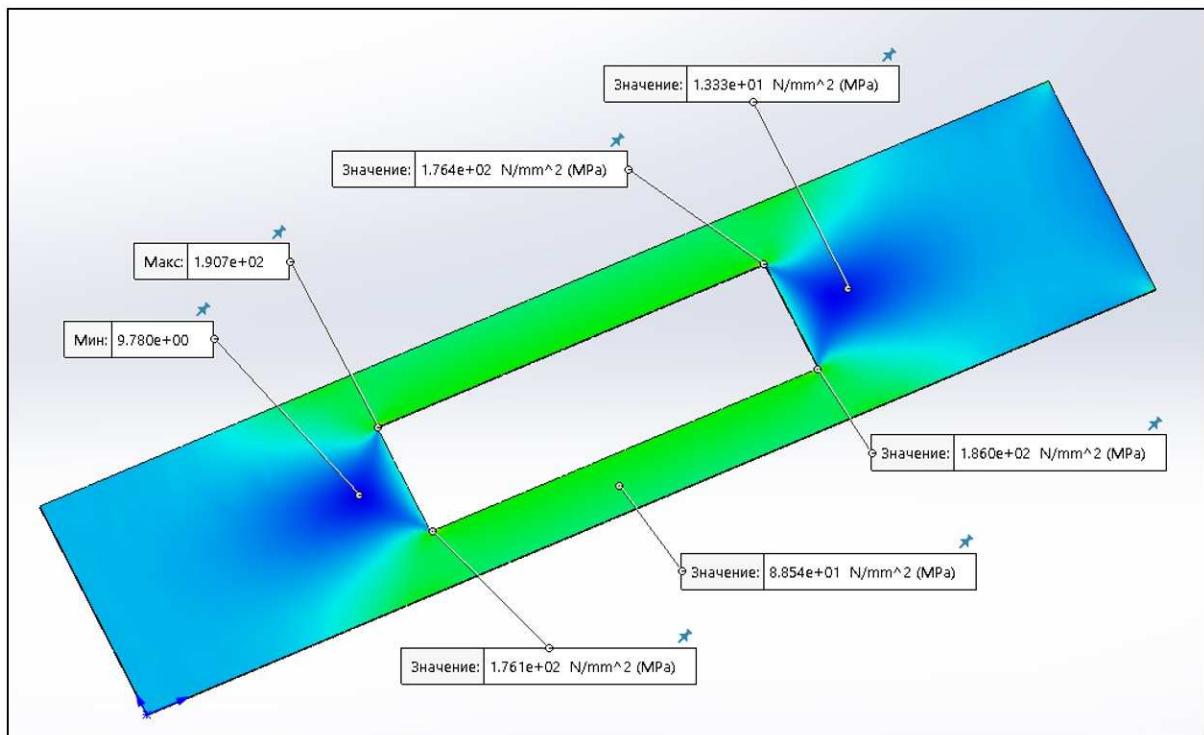


Рис. 10. Напряженное состояние исследуемой пластины

Некоторые различия между значениями напряжений в углах выреза, которые должны быть абсолютно одинаковы, связаны с погрешностями расчета при использовании SolidWorks-версии МКЭ. Среднее значение напряжений в углах выреза $\sigma_{\max} = 182,3$ МПа, то есть коэффициент концентрации напряжений $\alpha_K = 182,3/88,5 = 2,06$, что существенно меньше (в 1,5 раза) значения, указанного в [12]. Фрагмент пластины с углом выреза в увеличенном масштабе приведен на рис. 11.

Полученный результат противоречит общепринятым представлениям: наибольшие напряжения действуют не в вершине угла, а на продольной кромке выреза на некотором расстоянии от вершины. По всей видимости, это опять-таки объясняется погрешностями расчета при использовании SolidWorks-версии МКЭ.

С целью исключения концентрации напряжений в углах выреза вдоль его продольных кромок были выполнены прорези в поле пластины на 500 мм, как показано на рис. 12. В конце одной из прорезей (правой) было просверлено отверстие диаметром 20 мм. Вторая прорезь (левая) осталась в исходном состоянии.

Пластина, как и ранее, была испытана на растяжение силой 1 Мн. Полученное поле напряжений представлено на том же рис. 12, а напряженное состояние в конце прорезей — на рис. 13 и 14.

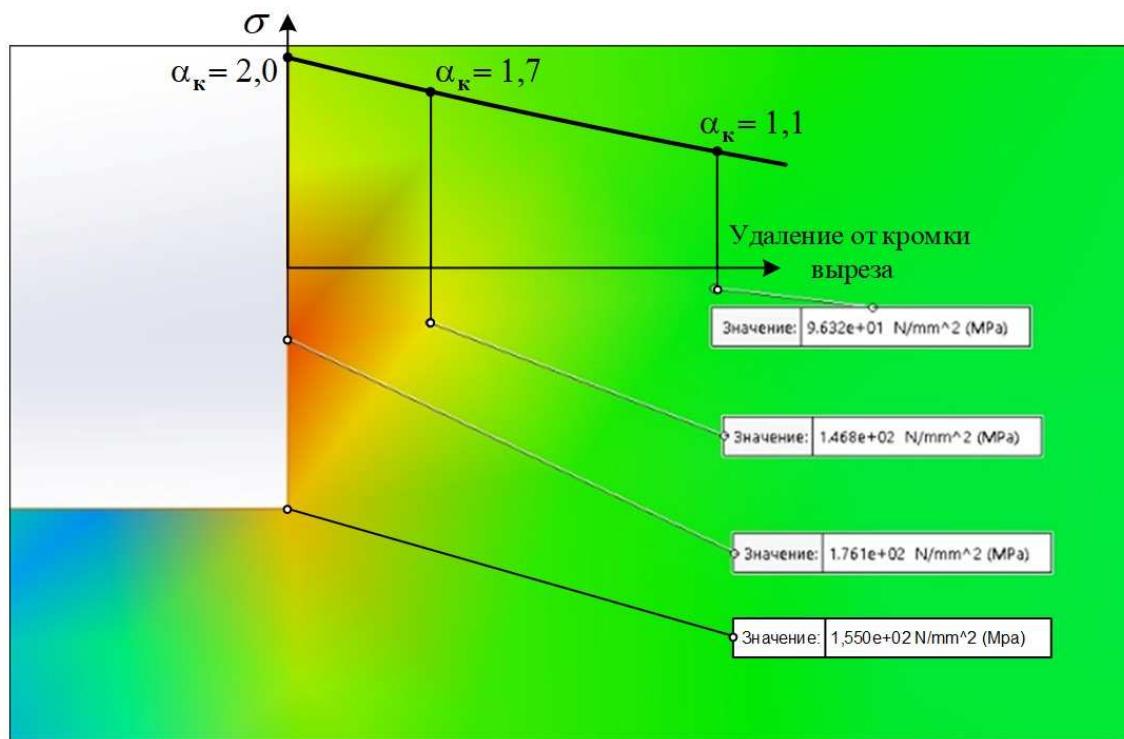


Рис. 11. Напряженное состояние пластины в районе угла выреза

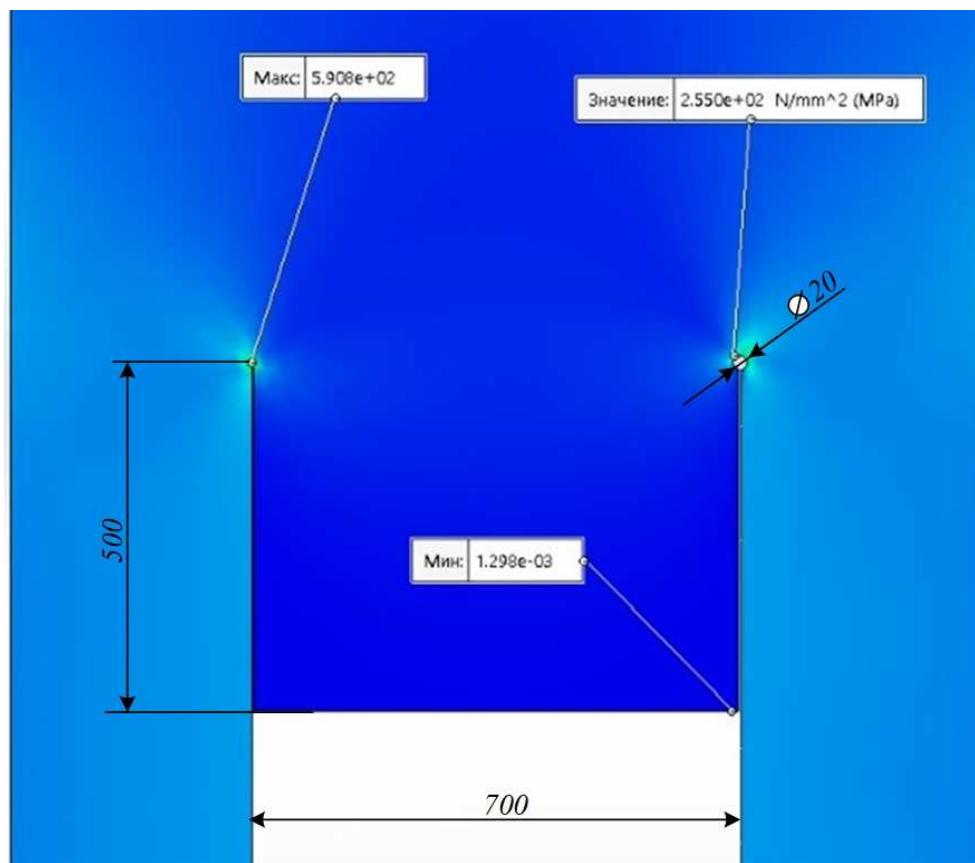


Рис. 12. Напряженное состояние пластины с продольными прорезями за габариты выреза

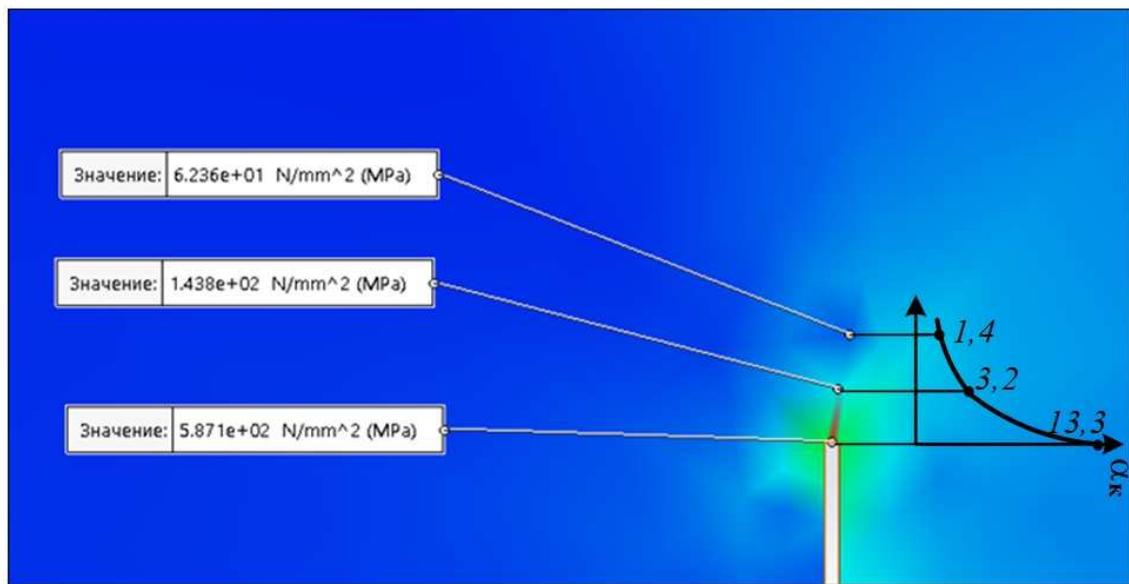


Рис. 13. Напряженное состояние у вершины прорези без круглого деконцентратора

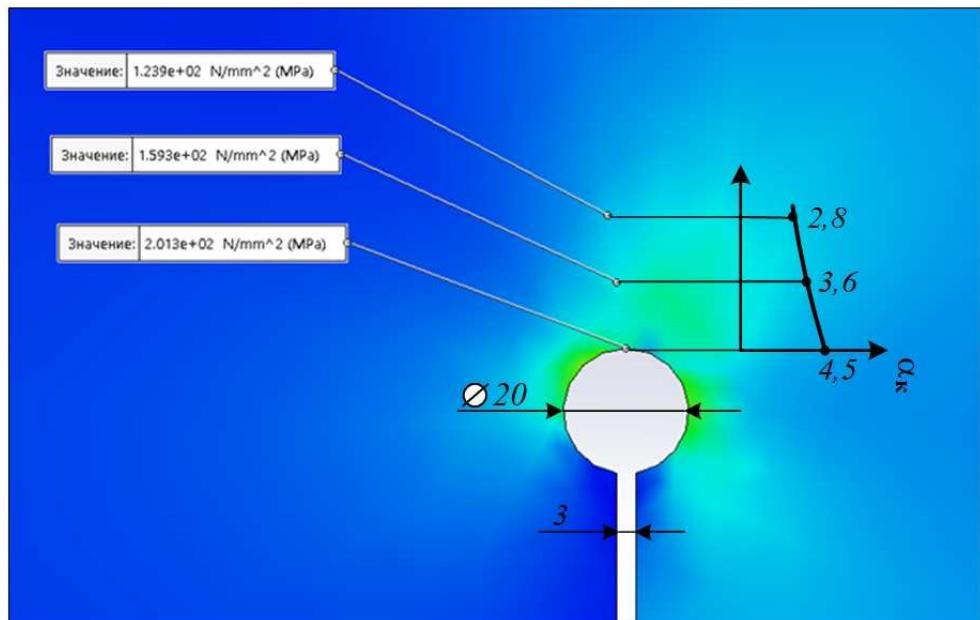


Рис. 14. Напряженное состояние у вершины прорези с круглым деконцентратором

Видно, что в углах прямоугольного выреза исчезла концентрация напряжений, а на его поперечной кромке напряжения практически отсутствуют. В вершине прорези напряжения достигли величины 587 МПа. Это соответствует коэффициенту концентрации $\alpha_K = 587/44,3 = 13,3$, чего практически быть не может, так как максимальное напряжение в 2,5 раза больше предела текучести, при достижении которого у вершины прорези возникнет локальная пластическая область, являющаяся деконцентратором. Наряду с этим важно, что напряжения быстро снижаются по мере удаления от вершины прорези (рис. 13). На расстоянии всего 10 мм величина коэффициента концентрации $\alpha_K = 143,8/44,3 = 3,2$, а на расстоянии 20 мм $\alpha_K = 62,4/44,3 = 1,4$.

Круглое отверстие в конце прорези в три раза снижает максимальный коэффициент концентрации. Как и в случае прорези без деконцентратора, наблюдается его снижение по мере удаления от кромки отверстия, но более медленное, чем в первом случае. Тем не менее размер локальной области повышенных напряжений существенно меньше ширины пластины. В соответствии с опубликованными данными [12], на расстоянии одного радиуса от кромки круглого отверстия коэффициент концентрации напряжений $\alpha_K = 1,22$, а на расстоянии двух радиусов $\alpha_K = 1,07$. Можно констатировать, что вариант прорези, заканчивающейся круглым отверстием, является предпочтительным.

Проведенный анализ позволяет обосновать технологический прием, который предполагает исключение повышенных напряжений в зоне монтажных швов, обусловленных концентрацией напряжений, по контуру выреза при вварке в него вставки. Это обеспечивается следующей последовательностью технологических операций, которая иллюстрируется рис. 15.

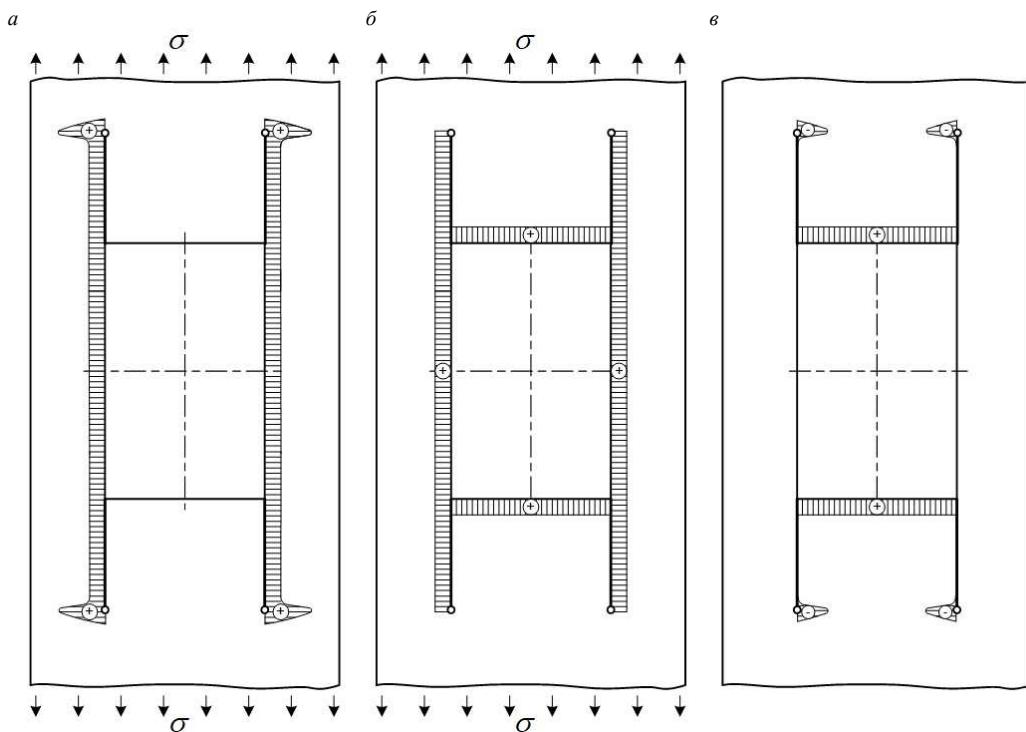


Рис. 15. Компенсация сварочных напряжений в материале продольных сварных швов:

а — нормальные напряжения по линиям реза в предварительно растянутом листе;

б — нормальные напряжения в материале швов после их затвердевания и остывания;

в — остаточные нормальные напряжения в материале сварных швов после снятия предварительной растягивающей нагрузки

1. Выполняется вырез в ненапряженном настиле. При этом от углов выреза в продольном направлении в поле настила делаются прорези определенной длины, измеряемой от поперечной кромки выреза. В конце прорези необходимо просверлить круглое отверстие. Пока нет рекомендации по длине прорези и диаметру отверстия. Эти параметры требуют отдельного исследования, которое не предполагается в рамках данной работы.

2. Изгибом корпуса создаются предварительные растягивающие напряжения в настиле (рис. 15*а*), величина которых определяется величиной сварочных напряжений в сварном шве.

3. В вырез вставляется ввариваемый лист и выполняются поперечные швы, в результате чего в них возникнут растягивающие напряжения (рис. 15*б*).

4. Выполняются продольные швы и заплавляются круглые отверстия, в которых также возникают растягивающие напряжения.

5. Снимается предварительная нагрузка. В результате в продольных швах растягивающие напряжения компенсируются, а в районе бывших круглых отверстий появляются локальные поля сжимающих напряжений. При этом в поперечных швах сохраняются не представляющие опасности для общей продольной прочности растягивающие сварочные напряжения (рис. 15*в*).

Таким образом, в сварных швах по периметру вваренного листа нет опасных остаточных напряжений с точки зрения общей продольной прочности при действии эксплуатационных нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный технологический прием, используемый при замене листов палубного настила, позволяет исключить повышенные остаточные напряжения, возникающие в углах выреза вследствие концентрации напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
2. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. — М.: Высшая школа, 1982. — 272 с.
3. Алферов В.И. О влиянии технологического фактора на напряженно-деформированное состояние и прочность судовых корпусных конструкций / В.И. Алферов, В.М. Шапошников // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2010. — № 53 (337). — С. 5 — 12.
4. Гатовский К.М. Изменение напряженного состояния корпусов судов в процессе эксплуатации и ремонта / К.М. Гатовский, И.А. Гунин // Труды ЛИВТ. — 1965. — Вып. 8.
5. Гунин И.А. Обобщение данных по натурным замерам остаточного прогиба корпуса и установление его влияния на общую прочность судов / И.А. Гунин // Труды ЛИВТ. — 1972. — Вып. 135.
6. Дорожков П.И. Методы снижения напряжений при сварке заделок в жесткий контур / П.И. Дорожков // Судостроение. — 1989. — № 3.
7. Барабанов Н.В. О вероятных причинах гибели танкера «Находка» / Н.В. Барабанов, Г.П. Турмов // Кораблестроение и океанотехника. Проблемы и перспективы: м-лы междунар. конф. — Владивосток: ДГТУ, 1998. — С. 16 — 20.
8. Ганов Э.В. Определение деформации корпуса судна от выполнения сварки на плаву / Э.В. Ганов, В.Д. Мацкевич, А.С. Роганов // Труды института. Юбилейный выпуск / Николаевский кораблестроит. ин-т. — 1970.
9. Кулик Ю.Г. Об учете технологических напряжений при оценке качества ремонта судового корпуса / Ю.Г. Кулик // Труды ГИИВТ. — 1959. — Вып. 17. — С. 116 — 140.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
11. Барабанов Н.В. Проектирование конструкций целиком сварных судов в районе прямоугольных вырезов в палубе: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Н.В. Барабанов; ЛКИ. — Л., 1949.
12. Сегаль А.И. Прикладная теория упругости: уч. пос. / А.И. Сегаль. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 268 с.
13. Аносов А.П. Термодинамические аспекты циклической прочности судостроительных сталей / А.П. Аносов. — Владивосток: Издат. дом Дальневост. федер. ун-та, 2012. — 348 с.
14. Ночовная Н.А. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов / Н.А. Ночовная, П.В. Панин // Труды ВИАМ. — 2014. — № 5.
15. Аносов А.П. Применение надувных эластичных оболочек для выполнения технологических операций при ремонте и испытаниях корпусов судов / А.П. Аносов, Н.И. Восковщук, Ю.К. Шарапов // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 2 (44), т. 2. — С. 29 — 38.
16. Аносов А.П. Экспериментальное определение в доке характеристик поперечного сечения корпуса судна, определяющих его общую продольную прочность / А.П. Аносов, С.О. Климов, Ю.К. Шарапов, О.С. Шаринкова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 66 — 76. — EDN SYAGSP.

REFERENCES

1. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. Teoriya svarochnykh deformatsii i napryazhenii [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 280 p.
2. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. Svarnye konstruktsii. Prochnost' svarnykh soedinenii i deformatsii konstruktsii [Welded structures. The strength of welded joints and structural deformations]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982.
3. Alferov V.I., Shaposhnikov V.M. On the influence of the technological factor on the stress-strain state and strength of ship hull structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2010. No. 53 (337). (In Russ.)
4. Gatovsky K.M., Gunin I.A. Izmenenie napryazhenogo sostoyaniya korpusov sudov v protsesse ekspluatatsii i remonta [Changing the stress state of ship hulls during operation and repair]. *Trudy LIVT* [Transactions of the Leningrad Institute of Water Transport]. 1965. Issue 8.
5. Gunin I.A. Obobshchenie dannyykh po naturnym zameram ostatochnogo progiba korpusa i ustannovlenie ego vliyaniya na obshchuyu prochnost' sudov [Generalization of data on full-scale measurements of the residual deflection of the hull and the establishment of its influence on the overall strength of ships]. *Trudy LIVT* [Transactions of the Leningrad Institute of Water Transport]. 1972. Issue 135.
6. Dorokhov P.I. Metody snizheniya napryazheniya pri svarke zadelok v zhestkii kontur [Methods of voltage reduction when welding seals into a rigid circuit]. *Sudostroenie* [Shipbuilding]. 1989. No. 3.
7. Barabanov N.V., Turmov G.P. O veroyatnykh prichinakh gibeli tankera "Nakhodka" [On the probable causes of the death of the tanker "Nakhodka"]. *Korablenstroenie i okeanotekhnika. Problemy i perspektivy* [Shipbuilding and Ocean Engineering. Problems and Prospects: Materials of the International conf.] 1998. P. 16 — 20.
8. Ganov E.V., Matskevich V.D., Roganov A.S. Opredelenie deformatsii korpusa sudna ot vypolneniya svarki na plavu [Determination of the deformation of the ship's hull from welding afloat]. *Trudy instituta. Yubileinyi vypusk* [Transactions of the Nikolaev Shipbuilding Institute. Jubilee issue]. 1970.

9. Kulik Yu.G. Ob uchete tekhnologicheskikh napryazhenii pri otsenke kachestva remonta sudovogo korpusa [On the consideration of technological stresses in assessing the quality of ship hull repairs]. *Trudy GIIVT [Transactions of the Gorky Institute of Water Transport Engineers]*. 1959. Vol. 17. P. 116 — 140.
10. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
11. Barabanov N.V. Proektirovaniye konstruktsii tselikom svarynykh sudov v raione pryamougol'nykh vrezov v palube [Design of structures of fully welded vessels in the area of rectangular cutouts in the deck: abstract of PhD thesis] / Leningrad Shipbuilding Institute. Leningrad, 1949.
12. Segal A.I. Prikladnaya teoriya uprugosti [Applied theory of elasticity: a textbook]. Leningrad: Sudpromgiz, 1961. 268 p.
13. Anosov A.P. Termodynamicheskie aspekty tsiklicheskoi prochnosti sudostroitel'nykh stalei [Thermodynamic aspects of cyclic strength of shipbuilding steels]. Vladivostok: Publishing House of the Far East Federal University, 2012. — 348 p.
14. Nnochovnaya N.A., Panin P.V. Residual macrostress analysis in welded junctions of different titanium alloys. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*. 2014. No. 5. (In Russ.)
15. Anosov A.P., Voskovchuk N.I., Sharapov Yu.K. The use of inflatable elastic shells for performing technological operations during the repair and testing of ship hulls. *Marine Intellectual Technologies*. 2019. No. 2 (44), vol. 2. P. 29 — 38.
16. Anosov A.P., Klimov S.O., Sharapov Yu.K., Sharinkova O.S. Experimental determination in the dock of the characteristics of the cross-section of the hull of the vessel, determining its overall longitudinal strength. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56 /57. P. 66 — 76. (In Russ.)

УДК 629.123 + 532.583.4
EDN QRJDVJ

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВООРУЖЕННОСТИ ЛЕДОКОЛА НА ВЕЛИЧИНУ РАСЧЕТНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК (МЕТОДИКА УЧЕТА)

В.В. Платонов, канд. физ.-мат. наук, Крыловский государственный научный центр, 196158 Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

В.Н. Тряскин, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

В статье изложены основные положения методики учета влияния энерговооруженности ледокола на величину расчетных ледовых нагрузок. В действующих Правилах РС это реализуется посредством корректировки расчетной интенсивности ледовой нагрузки на носовой район ледового пояса путем введения корректирующего коэффициента, который определяется по упрощенной формуле в зависимости от соотношения фактической суммарной мощности на гребных валах и базового значения мощности. Корректирующий коэффициент принимается постоянным в пределах ледового класса и не зависящим от водоизмещения ледокола. Показано, что при проектировании перспективных ледоколов большой мощности, когда фактическая суммарная мощность на гребных валах существенно больше базового значения для ледового класса, подход, предложенный в действующих требованиях Правил РС, приведет к необоснованному увеличению расчетной интенсивности ледовой нагрузки. Предложены методика и алгоритм исключения этого недостатка требований Правил, основанные на учете статистической информации по энерговооруженности российских ледоколов. Показано, что для отдельных проектов, обладающих существенно увеличенной энерговооруженностью для их класса, переход к разработанным рекомендациям решает проблему избыточности расчетных ледовых давлений.

Ключевые слова: энерговооруженность ледоколов, расчетные ледовые нагрузки, Правила РС.

Для цитирования: Платонов В.В. Влияние энерговооруженности ледокола на величину расчетных ледовых нагрузок (методика учета) / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 108 — 113. — EDN QRJDVJ.

THE EFFECT OF ICEBREAKER POWER CAPACITY ON THE CALCULATED ICE LOAD (METHODOLOGY)

V.V. Platonov, PhD, Krylov State Research Centre, 196158 Russia, St. Petersburg, Moskovskoe sh., 44, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

V.N. Tryaskin, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

The article outlines the main provisions of the methodology for accounting for the effect of icebreaker power capacity on the calculated ice loads. In the current RS Rules, this is implemented by adjusting the calculated intensity of the ice load on the bow area of the ice belt by introducing a correction factor, which is determined by a simplified formula depending on the ratio of the actual total power on the propeller shafts and the base power value. The correction factor is assumed to be constant within the ice class and independent of the displacement of the icebreaker. It is shown that when designing advanced icebreakers of high capacity, where the actual total power on the propeller shafts significantly exceeds the base value for the ice class, the approach proposed in the current requirements of the RS Rules may lead to an unjustified increase in the estimated intensity of the ice load. A methodology and algorithm for eliminating this disadvantage of the requirements of the Rules are proposed, based on the accounting of statistical information on the energy capacity of Russian icebreakers. It is shown that for individual projects with significantly increased energy capacity for their class, the transition to the developed recommendations solves the problem of excess calculated ice pressures.

Keywords: icebreaker's power capacity, calculated ice load, RS Rules.

For citation: Platonov V.V., Tryaskin V.N. The effect of icebreaker power capacity on the calculated ice load (Methodology). *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 108 — 113. EDN QRJDVJ. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В требованиях Правил Российского морского регистра судоходства (далее — Правила РС) к ледовым усилениям ледоколов [1] регламентация ледовых нагрузок основана на использовании системы базовых опасных режимов движения и зависимостей гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом (ГДМ) [2]. В носовом районе ледовых усилий ледовые нагрузки на конструкции корпуса определяются для сценария прямого удара при базовых опасных режимах движения. Такой подход считается обоснованным для ледоколов, опыт эксплуатации которых был в наибольшей степени учтен на момент разработки действующих Правил РС. Для обеспечения проектирования перспективных ледоколов повышенной энерговооруженности¹ принималось во внимание возможное увеличение расчетной скорости движения ледокола в процессе выполнения ледокольных операций, в частности при работе набегами, и, соответственно, увеличение нагрузок на корпус ледокола.

Для учета этого факта в действующих Правилах РС **нормативное** значение расчетной интенсивности ледовой нагрузки на конструкции носового района ледового пояса AI предложено корректировать путем введения коэффициента k_p , величина которого зависит от соотношения фактической суммарной мощности на гребных валах ледокола N_Σ и базового значения мощности для ледового класса ледокола N_0

$$k_p = \begin{cases} 1, & \text{при } N_\Sigma \leq N_0 \\ (N_\Sigma/N_0)^{0.4}, & \text{при } N_\Sigma > N_0 \end{cases} \quad (1)$$

где N_Σ — суммарная мощность на гребных валах ледокола, МВт;
 N_0 — нормативное значение мощности, определяется ледовым классом ледокола (табл. 3.10.3.5.1 [1]).

В связи с этим расчетная интенсивность ледовой нагрузки для ледоколов p_{AI} на конструкции носового района ледового пояса AI определяется по формуле

$$p_{AI} = k_p p_{AI}^0,$$

где p_{AI}^0 — интенсивность ледовой нагрузки в районе AI, определенная согласно п. 3.10.3.2.1 [1] как для судна, номер ледового класса которого совпадает с номером ледового класса ледокола;
 k_p — коэффициент, определяемый зависимостью (1).

Условие (1) было получено на основании известного соотношения между скоростью V и мощностью N ледокола [3]:

$$N \sim V^{2.5},$$

которое, учитывая зависимости параметров ледовой нагрузки от скорости [4], приводит к следующим соотношениям:

$$p \sim V^{0.5}, \quad b \sim V^{0.5}, \quad q \sim V,$$

где p — интенсивность ледовой нагрузки,
 b — высота распределения ледовой нагрузки,
 $q = pb$ — погонная нагрузка.

Поскольку корректировка расчетной высоты распределения ледовой нагрузки при изменении мощности в действующих Правилах РС не предусмотрена, то можно принять

$$N/N_0 \sim (q_{AI}/q_{AI}^0)^{2.5} \sim (p_{AI}/p_{AI}^0)^{2.5} \text{ и, следовательно, } p_{AI} \sim (N/N_0)^{0.4} p_{AI}^0,$$

где p_{AI}^0 и q_{AI}^0 — интенсивность ледовой нагрузки и погонная нагрузка в районе AI ледокола, определенные согласно п. 3.10.3.2.1 [1].

Из этого соотношения вытекает расчетная зависимость (1) для определения параметра k_p .

Базовое значение мощности для класса ледокола N_0 , принимаемое в Правилах РС по таблице 3.10.3.5.1, было назначено на основании данных по существующим ледоколам на момент разработки правил. Такой подход основывался на предположении, что соотношение между мощностью и водоизмещением (энерговооруженность) в пределах ледового класса может изменяться несущественно. Однако при проектировании перспективного ледокола большой мощности, например ледокола проекта 10510 «Лидер», фактическая суммарная мощность на гребных валах которого в два раза больше базового значения для ледового класса

¹ Под энерговооруженностью здесь понимается характеристика N_Σ/Δ , где N_Σ — фактическая суммарная мощность на гребных валах; Δ — водоизмещение ледокола.

Icebreaker9, этот подход будет приводить к существенному и необоснованному увеличению расчетной интенсивности ледовой нагрузки.

В настоящей статье предлагаются методические рекомендации и алгоритм для решения указанной проблемы, основанные на построении расчетной зависимости для определения базового значения N_0 как функции водоизмещения ледокола, учитывающей данные статистики $N_0=f(\Delta)$.

1. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЗОВОГО ЗНАЧЕНИЯ МОЩНОСТИ

Исходной информацией для построения зависимости для определения базового значения мощности ледокола являются статистические данные по существующим российским ледоколам. Результаты обработки указанных статистических данных, представленные в табл. 1, позволяют установить статистическую зависимость, не противоречащую общепроектной связи между мощностью и водоизмещением ледокола (рис. 1).

Таблица 1

Исходная информация по существующим российским ледоколам

Ледовая категория	Проект	Год	Мощность N , МВт	Водоизмещение Δ , т	Ширина В, м	N/B	N/Δ
Icebreaker6	Тип «Москва»	1960	16,2	15 420	24,5	0,661	1,051
Icebreaker6	22740M	—	6	3023	17	0,353	1,985
Icebreaker6	21180	2017	7	4770	20	0,350	1,468
Icebreaker6	21900	2008	16,4	14 300	27,5	0,596	1,147
Icebreaker6	MOSS828	2005	15	9569	19	0,789	1,568
Icebreaker7	1101 «Капитан Сорокин»	1977	16,2	17 281	31,11	0,521	0,937
Icebreaker7	10022	—	15	11 389	22	0,682	1,317
Icebreaker7	ARC-124	2019	12	7613	21,9	0,548	1,576
Icebreaker8	P-1039 «Ермак»	1974	26,46	20 247	26,05	1,016	1,307
Icebreaker8	ARC-130F	2018	22	12 554	25	0,880	1,752
Icebreaker8	10580	1989	35,5	19 000	28	1,268	1,868
Icebreaker8	22600	2016	40	21 900	28,5	1,404	1,826
Icebreaker9	1052 «Арктика»	1972	52,8	23 460	30	1,760	2,251
Icebreaker9	22220	2016	60	33 327	33	1,818	1,800
Icebreaker9	10510 «Лидер»	—	120	68 601	47,7	2,516	1,749

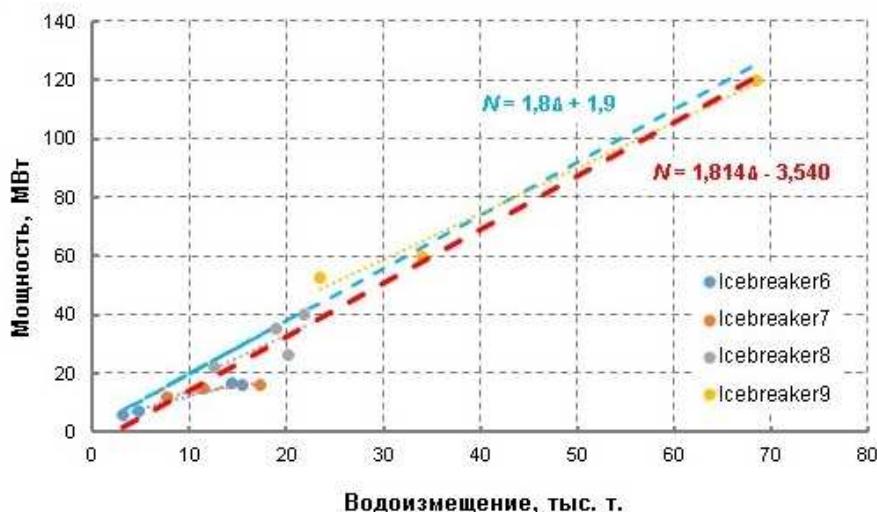


Рис. 1. График зависимости мощности ледоколов от их водоизмещения

Полученные результаты показывают, что может быть принята единая зависимость для ледоколов классов Icebreaker6 и Icebreaker7. Для ледоколов класса Icebreaker8 имеет место существенный разброс точек за счет выпадения из статистики старого ледокола «Ермак», который имеет существенно меньшую энерговооруженность N/Δ , чем остальные ледоколы класса Icebreaker8 (табл. 1). Для ледоколов класса Icebreaker9 может быть предложена линейная зависимость.

На первом этапе в целях упрощения требований можно рекомендовать единую линейную зависимость, связывающую суммарную мощность на валах N с водоизмещением Δ ледокола (рис. 1, красная пунктирная линия):

$$N(\Delta) = 1,814(\Delta/1000) - 3,540. \quad (2)$$

Логично ввести предположение, что базовое значение мощности для класса N_0 должно быть согласовано со статистическими данными. Если принять такую зависимость единой для всех ледовых классов, то она может быть представлена в следующем виде (рис. 1, голубая пунктирная линия):

$$N_{0_new} = N_0(\Delta) = 1,8(\Delta/1000) + 1,9. \quad (3)$$

Такая зависимость получена подбором некоторого значения $\delta N(\Delta)$ таким образом, чтобы эта зависимость перекрывала практически все статистические значения суммарной мощности на валах для ледоколов всех классов и была представлена в виде простой линейной функции. Видно, что только старый ледокол «Арктика-1972» лежит выше этой линии. Энерговооруженность N/Δ этого ледокола существенно (приблизительно на 35 %) выше остальных ледоколов класса Icebreaker9 (табл. 1).

2. ОЦЕНКА И СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ k_p ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЛЕДОКОЛОВ ПО ДЕЙСТВУЮЩИМ ТРЕБОВАНИЯМ ПРАВИЛ И ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ РЕКОМЕНДАЦИЯМ

Базовые значения минимальной мощности для класса по требованиям к ледовым усилениям Правил РС N_0 приведены в табл. 2. Там же указаны значения минимальной мощности по Правилам классификации РС [5]. При этом Правилами классификации минимальная мощность для ледоколов класса Icebreaker6 не регламентируется.

Таблица 2

Требования по минимальной мощности Правил РС

	Icebreaker6	Icebreaker7	Icebreaker8	Icebreaker9
Минимальная мощность для класса по требованиям Правил РС	10	20	40	60
Минимальная мощность по требованиям Правил классификации	—	11	22	48

Значения коэффициентов k_p по требованиям действующих Правил и по предлагаемым рекомендациям приведены в табл. 3.

Анализ значений коэффициентов k_p , полученных по предлагаемым рекомендациям, показывает, что они не приведут к существенному изменению расчетных давлений по сравнению с действующими требованиями Правил. Несколько выделяются требования для ледоколов типа «Капитан Сорокин» и «Ермак», имеющих заниженную энерговооруженность для их класса.

Пропадает проблема избыточных нагрузок для новых перспективных ледоколов типа «Лидер».

Аналогичный подход можно предложить, если ледоколы класса Icebreaker6, Icebreaker7 выделить в отдельную группу. Такие ледоколы занимают промежуточное положение между линейными ледоколами и ледокольными транспортными судами. В связи с этим статистические зависимости $N(\Delta)$ для них имеют несколько иной вид (рис. 2).

В табл. 4 приведены результаты расчета коэффициента k_p по требованиям действующих Правил РС и по предлагаемым рекомендациям для ледоколов категорий Icebreaker6 и Icebreaker7. Анализ приведенных в табл. 4 результатов показывает, что для ледоколов типа «Москва» и пр. 21900, обладающих увеличенной энерговооруженностью N/Δ для категории Icebreaker6, снижение значений коэффициента k_p , полученных по предлагаемым рекомендациям, составит ок. 15 %, а для ледокола проекта MOSS828, изначально спроектированного на класс Правил DNV, снижение коэффициента k_p составит ок. 16 %. Для остальных рассмотренных проектов ледоколов изменение значений коэффициента k_p , полученных по предлагаемым рекомендациям, не приведут к существенному изменению расчетных давлений по сравнению с действующими требованиями Правил.

Таблица 3

Коэффициент k_p по требованиям действующих Правил РС и по предлагаемым рекомендациям

Проект	N , МВт	Δ , тыс.т	N/N_0	$N_{\text{полн.}}$	N_0^{new}	N_0^{new}/N_0	N_0^{new}/N	k_p	$k_p^{\text{new}}(N_0^{\text{new}}/N)$	k_p^{new}/k_p
Тип «Москва»	16,2	15,4	1,62	24,4	29,6	2,96	1,83	1,213	1,273	1,05
22740M	6	3,0	0,60	1,9	7,3	0,73	1,22	1,000	1,000	1,00
21180	7	4,8	0,70	5,2	10,5	1,05	1,51	1,000	1,000	1,00
21900	16,4	14,3	1,64	22,4	27,6	2,76	1,69	1,219	1,232	1,01
MOSS828	15	9,6	1,50	13,9	19,2	1,92	1,28	1,176	1,103	0,94
1101 «Капитан Сорокин»	16,2	17,3	0,81	27,8	33,0	1,65	2,04	1,000	1,330	1,33
10022	15	11,4	0,75	17,1	22,4	1,12	1,49	1,000	1,174	1,17
ARC-124	12	7,6	0,60	10,2	15,6	0,78	1,30	1,000	1,110	1,11
P-1039 «Ермак»	26,46	20,2	0,66	33,1	38,3	0,96	1,45	1,000	1,159	1,16
ARC-130F	22	12,6	0,55	19,3	24,6	0,61	1,12	1,000	1,045	1,05
10580	35,5	19,0	0,89	30,9	36,1	0,90	1,02	1,000	1,007	1,01
22600	40	21,9	1,00	36,2	41,3	1,03	1,03	1,000	1,013	1,01
1052 «Арктика»	52,8	23,5	0,88	39,1	44,2	0,74	0,84	1,000	0,931	0,93
22220	60	34,0	1,00	58,1	63,1	1,05	1,05	1,000	1,020	1,02
10510 «Лидер»	120	68,6	2,00	120,9	125,4	2,09	1,04	1,320	1,018	0,77

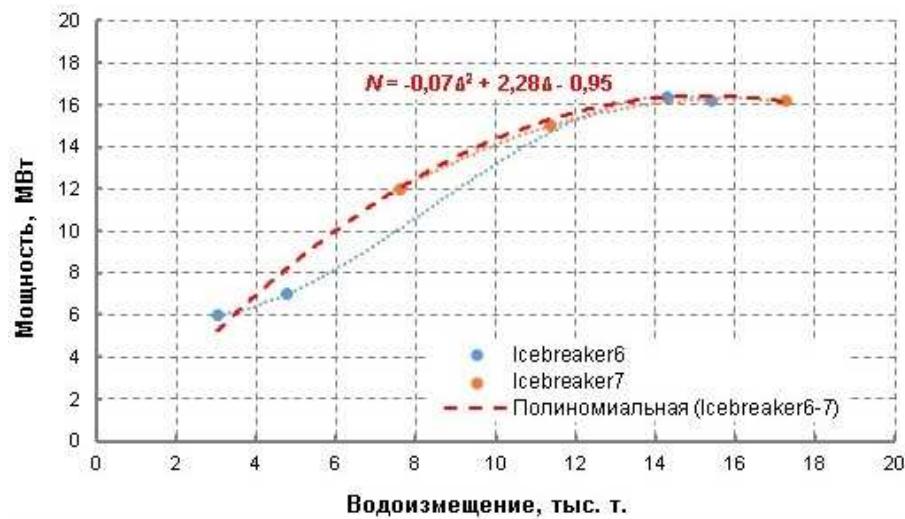


Рис. 2. График зависимости мощности ледоколов категорий Icebreaker6 и Icebreaker7 от их водоизмещения

Таблица 4

Коэффициент k_p по требованиям действующих Правил РС и по предлагаемым рекомендациям для ледоколов категорий Icebreaker6 и Icebreaker7

Проект	N , МВт	Δ , тыс.т	N_0^{new}	N_0^{new}/N_0	N_0^{new}/N	k_p	$k_p^{\text{new}}(N_0^{\text{new}}/N)$	k_p^{new}/k_p
Тип «Москва»	16,2	15,4	17,6	1,756	1,084	1,207	1,033	0,86
22740M	6	3,0	5,3	0,530	0,884	1,000	1,000	1,00
21180	7	4,8	8,3	0,833	1,190	1,057	1,000	0,95
21900	16,4	14,3	17,3	1,734	1,057	1,207	1,023	0,85
MOSS828	15	9,6	14,5	1,446	0,964	1,176	0,985	0,84
1101 «Капитан Сорокин»	16,2	17,3	17,5	0,877	1,083	1,000	1,032	1,03
10022	15	11,4	15,9	0,797	1,062	1,000	1,025	1,02
ARC-124	12	7,6	12,4	0,618	1,029	1,000	1,012	1,01

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика и приведен алгоритм построения расчетной зависимости для определения базового значения мощности ледокола как функции его водоизмещения, учитывающей данные статистики по существующим российским ледоколам. На основании предложенного алгоритма выполнен расчет значений коэффициента k_p и выполнено его сопоставление с требованиями действующих Правил РС. Показано, что для большинства рассмотренных ледоколов существенного изменения расчетных ледовых давлений по сравнению с действующими требованиями Правил РС не происходит. Для отдельных проектов, обладающих существенно увеличенной энерговооруженностью для их класса, переход к разработанным рекомендациям решает проблему избыточности расчетных ледовых давлений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве», <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. 2. Корпус / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
2. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации / Е.М. Апполонов. — СПб.: СПбГМТУ, 2016. — 287 с.
3. Рывлин А.Я. Испытания судов во льдах / А.Я. Рывлин, Д.Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
4. Курдюмов В.А. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов / В.А. Курдюмов, В.Н. Тряскин, Д.Е. Хейсин // Ледопроходимость и ледовая прочность морских судов. — Л.: ЛКИ, 1979. — С. 3 — 12. (Труды ЛКИ.)
5. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. 1. Классификация / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
2. Appolonov E.M. Ledovaya prochnost sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoy arkticheskoy navigatsii [Ice strength of vessels designed for year-round Arctic navigation]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2016. (In Russ.)
3. Ryvlin A.Ya., Kheisin D.E. Ispytaniya sudov vo l'dah [Testing of ships in the ice]. L.: Shipbuilding, 1980. 287 p. (In Russ.)
4. Kurdymov V.A., Tryaskin V.N., Kheisin D.E. Opredelenie ledovoy nagruzki i otseinka ledovoy prochnosti korpusov transportnykh sudov [Determination of ice load and assessment of ice strength of hulls of merchant ships]. *Ice Permeability and Ice Strength of Sea-Going Ships*. L.: LKI, 1979. P. 3 — 12. (Transactions of the Leningrad Shipbuilding Institute.) (In Russ.)
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 669.018.295
EDN SYLLPN

ВЛИЯНИЕ ТИПОРАЗМЕРА ОБРАЗЦОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Г.Д. Мотовилина, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, e-mail: npk3@crism.ru

Е.С. Соколов, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

Е.И. Хлусова, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

С целью решения проблемы достоверной оценки качества листового проката выполнен анализ влияния типоразмера цилиндрических образцов на результаты испытаний механических свойств при одноосном растяжении высокопрочной судостроительной стали марки 09ХН2МД.

Показано, что с учетом неоднородной структуры, формирующейся при закалке с прокатного нагрева листового проката толщиной 24 и 30 мм, выбор типоразмера образцов на растяжение согласно ГОСТ 1497 оказывает определяющее влияние на оценку качества высокопрочной стали.

Ключевые слова: низкоуглеродистая высокопрочная сталь, одноосное растяжение, типоразмер образцов, структура, механические свойства при одноосном растяжении, излом, деформационная способность.

Для цитирования: Мотовилина Г.Д. Влияние типоразмера образцов на механические свойства высокопрочной судостроительной стали при одноосном растяжении / Г.Д. Мотовилина, Е.С. Соколов, Е.И. Хлусова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 114 — 124. — EDN SYLLPN.

INFLUENCE OF SPECIMENS TYPESIZE ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SHIPBUILDING STEEL DURING UNIAXIAL TENSION

G.D. Motovilina, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

E.S. Sokolov, Engineer, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

E.I. Khlusova, DSc, Professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

An analysis of cylindrical specimens typesize influence on mechanical properties during uniaxial tension has been carried out for reliable estimation of high-strength shipbuilding 09CrNi2MoCu steel grade quality.

It is shown that selection of specimens typesize for tension test according to GOST 1497 has a determinant influence on quality estimation of high-strength steel due to heterogeneous structure forming in the quenching process after rolling of the plates with 24 and 30 mm in thickness.

Key words: low-carbon high-strength steel, uniaxial tension, typesize of specimens, structure, mechanical properties during uniaxial tension, fracture, deformation capacity.

For citation: Motovilina G.D., Sokolov E.S., Khlusova E.I. Influence of specimens typesize on mechanical properties of high-strength shipbuilding steel during uniaxial tension. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 114 — 124. EDN SYLLPN. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Нормативной документацией на поставку листового проката высокопрочных марок стали судостроительного назначения регламентируются испытания на одноосное растяжение цилиндрических образцов различных типоразмеров. Выбор типа и размера образцов для проведения испытания на одноосное растяжение зависит от толщины листового проката и возможностей испытательного оборудования.

Для листового проката низкоуглеродистой высокопрочной стали 09ХН2МД толщиной свыше 60 мм регламентировано использовать цилиндрические образцы на одноосное растяжение, тип и размер образцов на растяжение также нормирован в технической документации. При вырезке образцы следует располагать у поверхности или на 1/3 толщины листового проката. Величина диаметра рабочей части образца влияет на положение оси образца относительно поверхности проката: чем больше диаметр рабочей части образца, тем дальше от поверхности проката будет расположена его ось. Следует отметить, что исследования влияния структуры в месте вырезки образца по сечению листового проката на механические свойства, в литературе практически не встречаются.

С целью снижения затрат заводы-изготовители выступают с предложениями изменять типоразмер образцов. При этом не учитывается, что на результатах испытания образцов может оказаться как влияние масштабного фактора (диаметр рабочей части образца), так и расположение оси образца в разных областях по сечению, поскольку после горячей деформации перед ускоренным охлаждением при закалке с прокатного нагрева (ЗПН) с отпуском в листовом прокате может сформироваться неоднородная (по размеру зерна) структура аустенита, которую связывают с неоднородным распределением температурно-деформационных воздействий по толщине листа. В свою очередь, размер зерна аустенита оказывает влияние на устойчивость аустенита при фазовом превращении, определяя состав и морфологию сформированной в результате ЗПН структуры. Для стали марки 09ХН2МД это может быть мартенсит или бейнит в различных соотношениях. Ранее было установлено, что в листах стали подобной композиции после закалки с печного нагрева и последующего высокого отпуска при увеличении толщины проката происходит снижение доли структур реечной морфологии [1, 2]. При охлаждении с прокатного нагрева неоднородность конечной структуры по сечению листового проката после фазового превращения усиливается [3, 4]. Последующий отпуск не может изменить соотношение фаз, мартенсита или бейнита, в структуре, но в зависимости от режима определяет тип, морфологию и распределение в них карбидной фазы [4, 5].

Целью работы являлось определение влияния типоразмера цилиндрических образцов на механические свойства листового проката высокопрочной хромоникельмolibденовой стали марки 09ХН2МД при одноосном растяжении.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования была выбрана низкоуглеродистая высокопрочная сталь 09ХН2МД, фактический химический состав которой представлен в табл. 1 [3].

Таблица 1

Фактический химический состав стали марки 09ХН2МД

Массовая доля элементов, %									
C	Si	Mn	Cr+Mo	Cu+Ni	V	Al	S	P	Ca
							не более		по расчету
0,09	0,19	0,41	0,82	2,60	0,04	0,02	0,010	0,015	0,03

Для исследования были отобраны образцы от листов толщиной 24 и 30 мм, изготовленных на стане «5000» ПАО «Северсталь» с использованием ЗПН и последующего отпуска при температуре 635 — 640 С°. В табл. 2 представлены результаты сдаточных испытаний на одноосное растяжение, определенные согласно требованиям ГОСТ 1497-2023.

Таблица 2

Результаты сдаточных испытаний на одноосное растяжение исследуемых листов высокопрочной стали марки 09ХН2МД толщиной 24 и 30 мм после закалки с прокатного нагрева

Место отбора проб	24 мм				30 мм			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_s , %	KV^{-40} , Дж	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_s , %	KV^{-40} , Дж
«Голова» листа	710	630	19,5	303; 282	690	610	22,5	276; 267
«Хвост» листа	720	630	26,0	294; 288	710	630	22,5	246; 261

Для определения и сравнительного анализа прочностных и пластических характеристик представленного листового проката были проведены испытания на растяжение цилиндрических образцов типа III № 6 с диаметром рабочей части 6 мм (\varnothing 6 мм), типа II № 4 — \varnothing 10 мм и типа III № 3 — \varnothing 15 мм при комнатной температуре по ГОСТ 1497-2023 на универсальной разрывной машине «Zwick Z250». Схема вырезки образцов приведена на рис. 1.

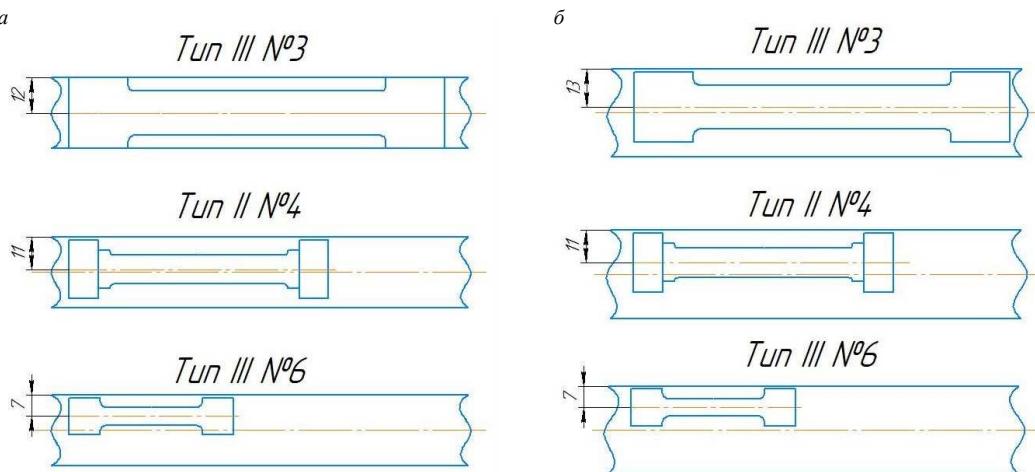


Рис. 1. Расположение образцов по толщине проката: *а* — толщина проката 24 мм; *б* — толщина проката 30 мм

На образцах типа II № 4 и типа III № 3, отобранных от листового проката толщиной 24 мм, ось рабочей части совпадает с серединой листа. Для образцов типа III № 6 от листов толщиной 24 мм, образцов типа II № 4 и типа III № 6 от листа толщиной 30 мм центр рабочей части расположен ближе к поверхности листа. Образцы вырезали от каждого конца листа (обозначение «Г» и «Х»).

Исследование структуры по сечению листов и деформированной рабочей части образцов после испытаний на одноосное растяжение выполнено методами оптической металлографии микроскопом «Axiovert 40 МАТ» с цифровым анализатором изображения.

Методом растровой электронной микроскопии с использованием РЭМ «Philips 535» исследована поверхность разрушения образцов после испытания на одноосное растяжение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены значения прочностных характеристик в зависимости от диаметра испытанных образцов, на рис. 3 — значения их относительного удлинения и относительного равномерного удлинения, величина которого зависит от типа образующейся структуры [6].

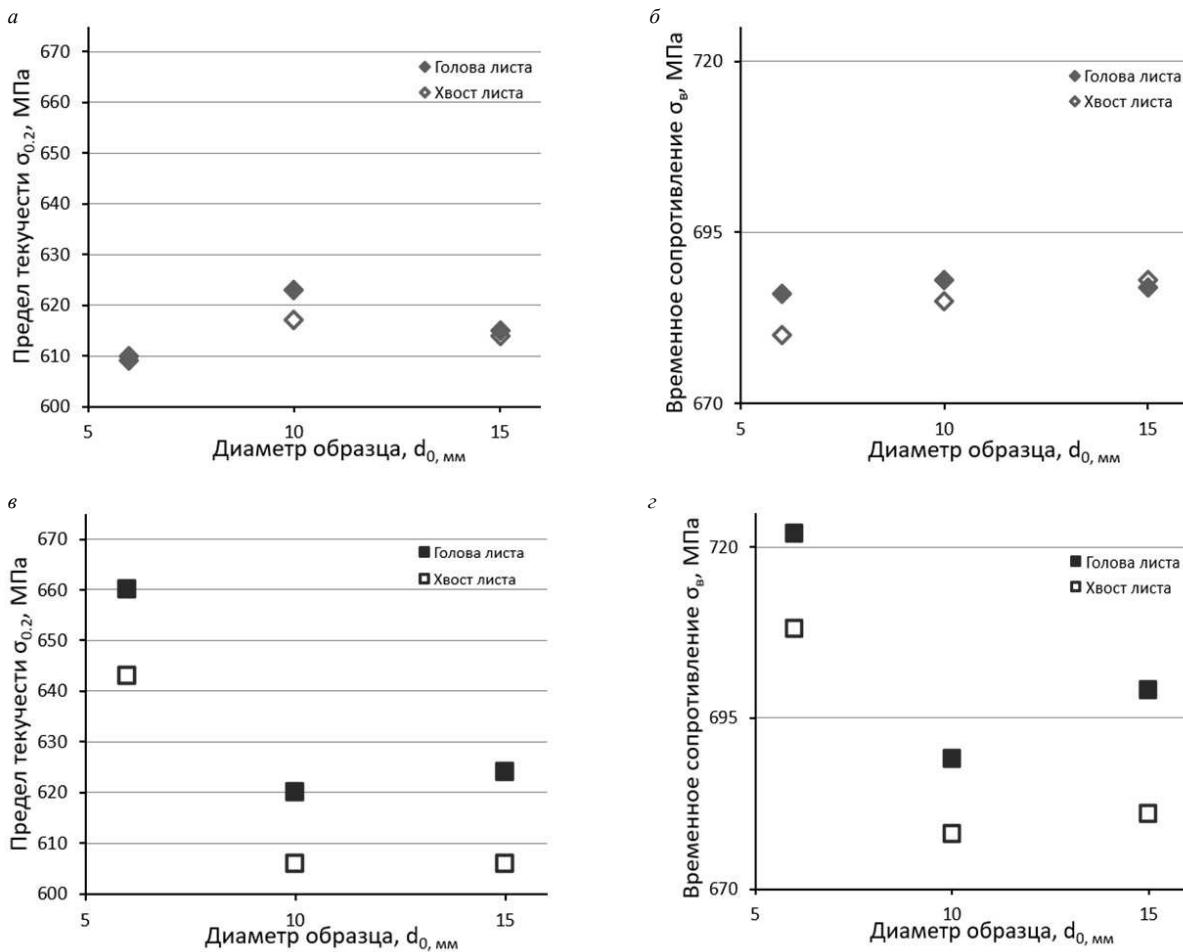


Рис. 2. Зависимости прочностных характеристик листового проката от диаметра испытанных образцов:
а, б — лист толщиной 24 мм; в, г — лист толщиной 30 мм

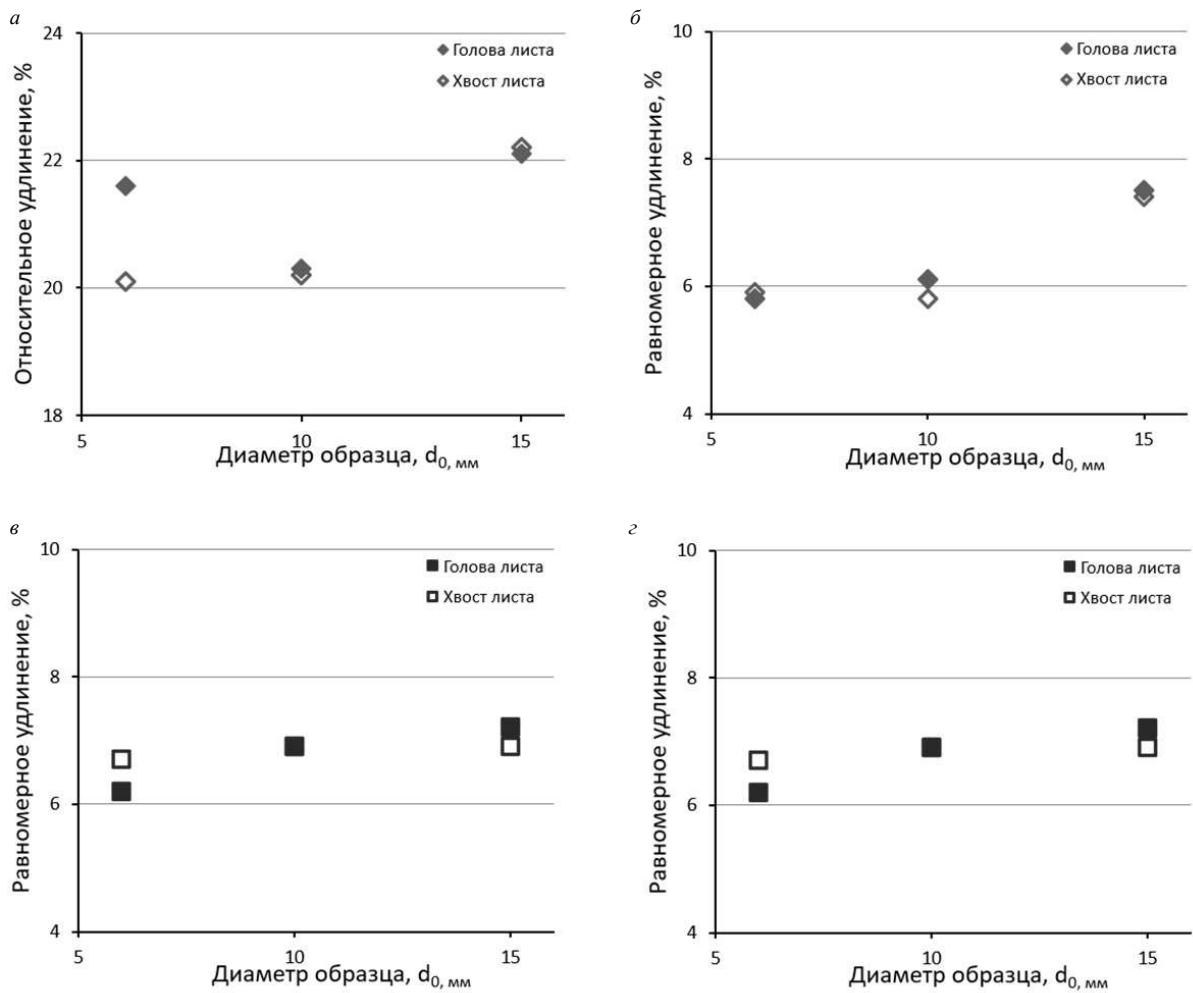


Рис. 3. Зависимости относительного и равномерного удлинения листового проката от диаметра испытанных образцов: лист толщиной 24 мм (а, б); лист толщиной 30 мм (в, г)

Из рис. 2 следует, что прочностные характеристики листового проката толщиной 24 мм, определенные на образцах различных типоразмеров, отличаются незначительно.

Значения прочностных характеристик по результатам испытаний образцов, изготовленных из листового проката толщиной 30 мм, отличаются более значительно: разница пределов текучести и временного сопротивления между образцами типа III № 6 и типа II № 4, типа III № 3 составляет 20 — 30 МПа. Для каждого конца листа у листов разной толщины для образцов с диаметром рабочей части 10 и 15 мм (тип II № 4 и тип III № 3 соответственно) получены близкие значения предела текучести и временного сопротивления, что может быть связано с местом вырезки образцов.

Результаты анализа пластических характеристик, представленные на рис. 3, не позволяют оценить влияние типа и размера образцов на относительное и равномерное удлинение: разброс значений относительного удлинения составляет 0,4 — 0,7 %, относительного равномерного удлинения — 0,2 — 0,6 %. В целом, уровень относительного удлинения > 20 %, относительного равномерного удлинения $> 5,5$ %.

Правила отбора проб для проведения испытаний и исследования листового проката толщиной свыше 60 мм оговорены в нормативной документации: для определения механических свойств пробы вырезают от поверхности в средней трети ширины листов из припусков на концах листов в поперечном направлении по отношению к направлению прокатки.

Структура хромоникельмolibденовой стали 09ХН2МД, сформированная в результате деформационно-термической обработки и высокого отпуска, представлена на рис. 4. Она образована преимущественно бейнитом реечной и гранулярной морфологии. В середине листов по сечению наблюдается структурная полосчатость.

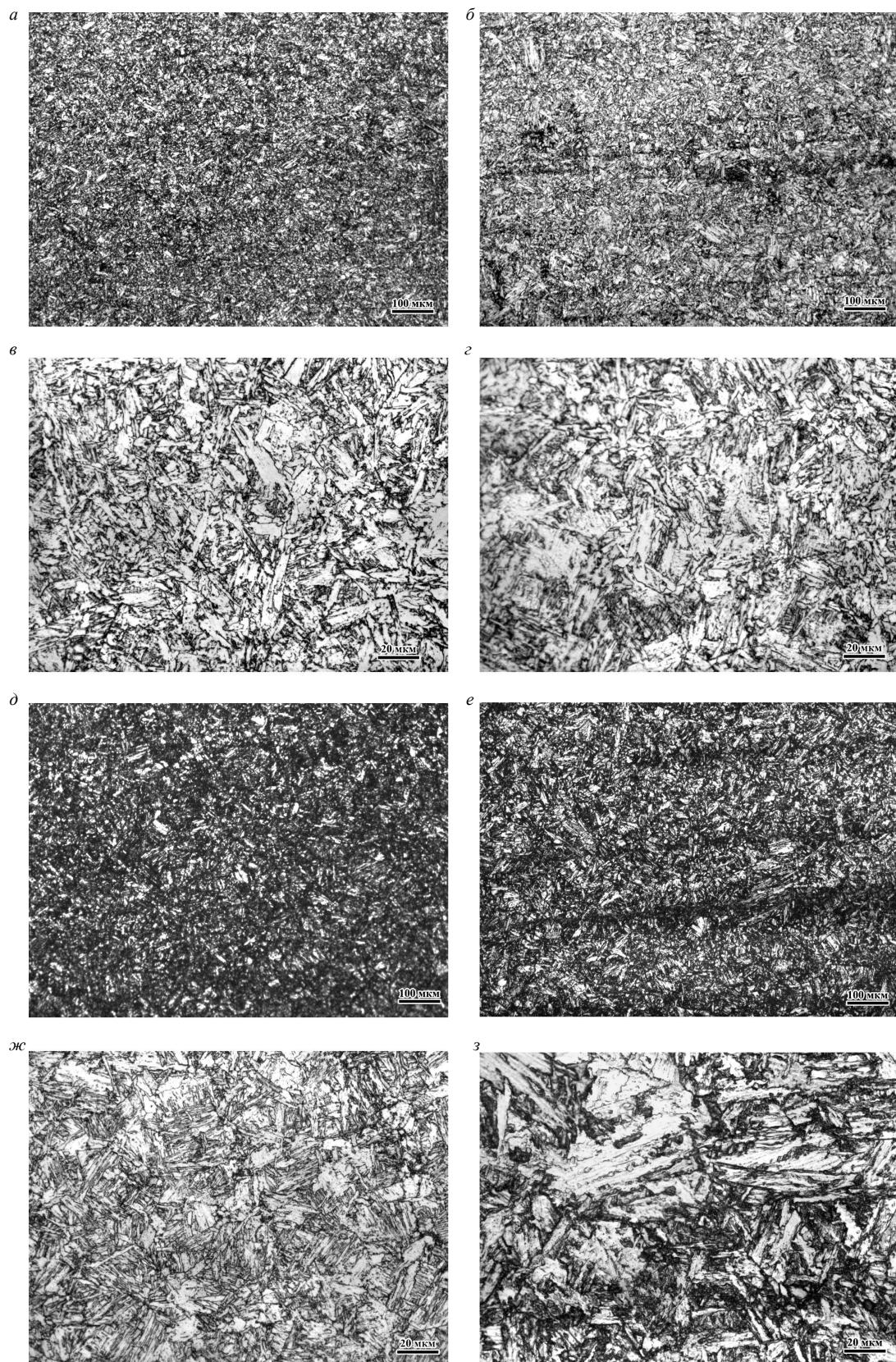


Рис. 4. Структура листового проката стали 09ХН2МД толщиной 24 мм (а — е) и толщиной 30 мм (д — з); поверхность листа (а, в, д, ж); середина листа (б, е, з)

Структурные составляющие у поверхности и в середине сечения листов имеют различную дисперсность, что особенно заметно в листах толщиной 30 мм.

В зависимости от типоразмера расположение осей образцов из листового проката толщиной 24 и 30 мм находится на различных расстояниях от поверхности проката. Из приведенной на рис. 5 и 6 схемы вырезки образцов видны структурные различия в области поперечного сечения рабочей части образцов различных типоразмеров, используемых для испытаний на одноосное растяжение.

Состав и морфология структурных составляющих меняется с увеличением диаметра рабочей части испытываемого образца на одноосное растяжение. В образце диаметром 15 мм, из листа толщиной 24 мм, содержание бейнита гранулярной морфологии увеличивается с 10 до 30 %, в сравнении с образцом с диаметром рабочей части 6 мм, рис. 5.

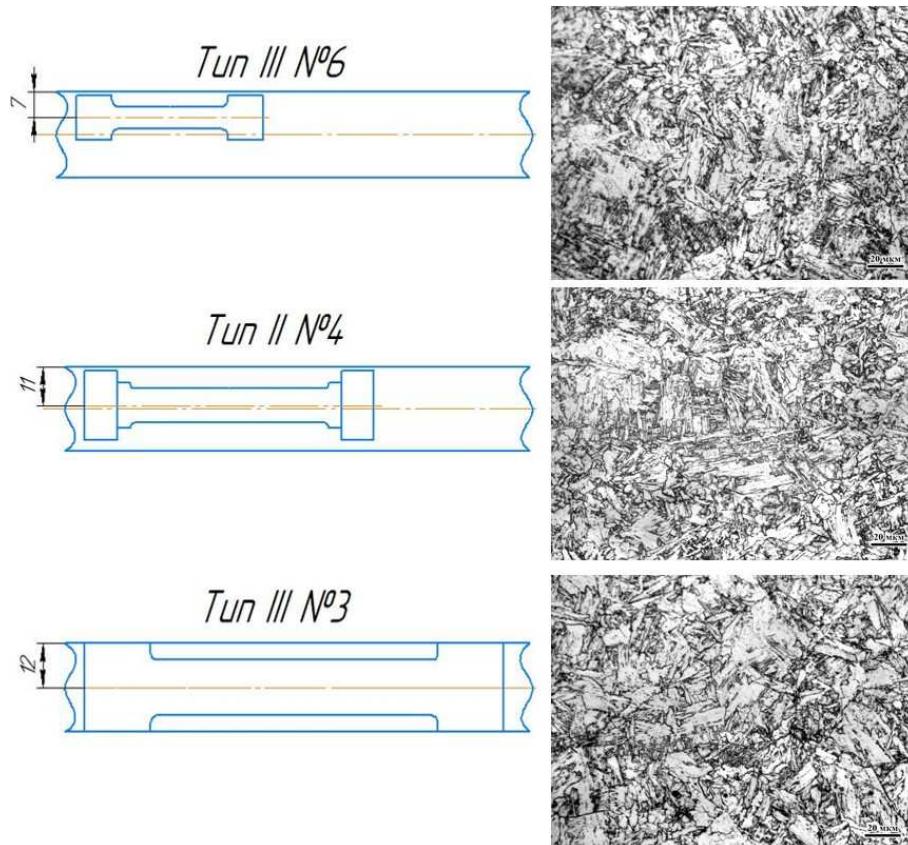


Рис. 5. Схема вырезки образцов из листового проката толщиной 24 мм и структура в рабочей части по оси образца

С увеличением диаметра рабочей части образцов из проката толщиной 30 мм наблюдается увеличение доли гранулярного бейнита с 8 до 30 %, при этом растут размеры областей реечного бейнита. По мере удаления от поверхности листа усиливается разнозернистость (рис. 6).

Анализ и оценка размеров структурных составляющих в рабочей части образцов, изготовленных из листа толщиной 24 мм, показала, что размеры наиболее крупных кристаллитов бейнита гранулярной морфологии не превышают 10 мкм у поверхности и 40 мкм — в середине рабочей части по толщине (рис. 5). Доля крупных бейнитных кристаллитов размерами 40 — 60 мкм наиболее высока в середине рабочей части по толщине образца типа III № 3 — $\varnothing 15$ мм от листа толщиной 30 мм (рис. 6).

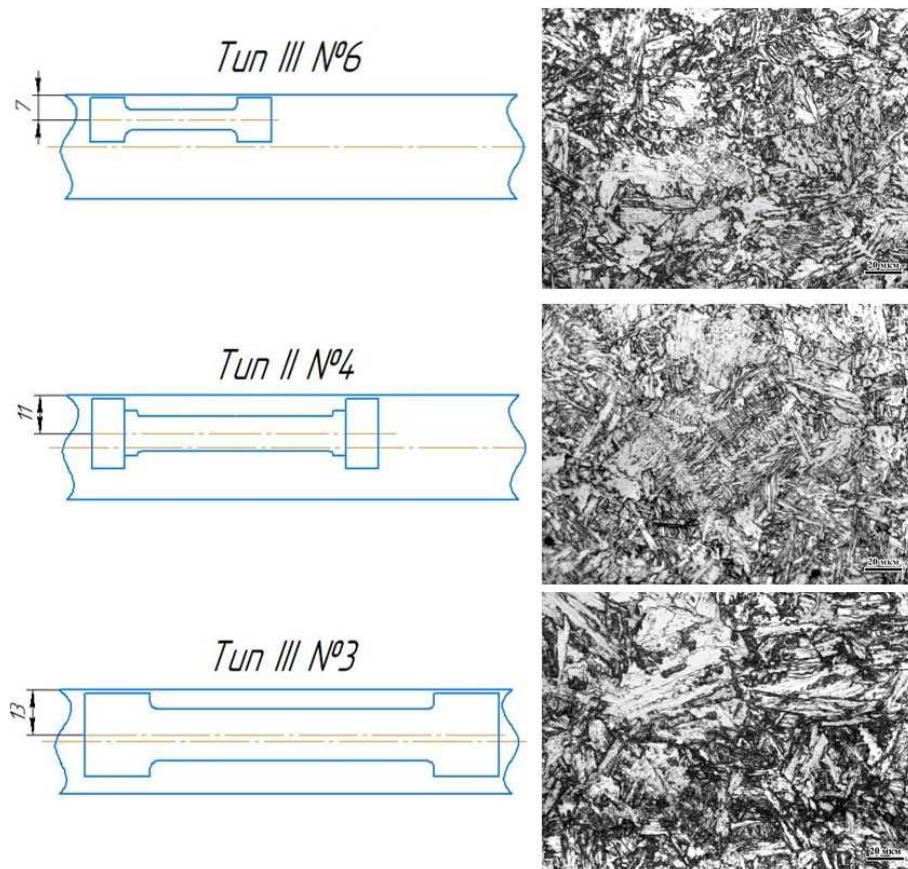


Рис. 6. Схема вырезки образцов из листового проката толщиной 30 мм и структура в рабочей части по оси образца

Наблюдаемые структурные изменения указывают на возможность при одинаковых технологических параметрах производства формирования структуры разного состава и морфологии в поверхностном слое и в середине листового проката листов толщиной 24 и 30 мм.

Лист толщиной 24 мм обладает более однородной и равномерной структурой по всей толщине проката, тогда как в листе толщиной 30 мм структура вблизи поверхности отличается повышенной дисперсностью (рис. 4). В результате образцы типа III № 6, расположенные ближе к поверхности листа, обладают более высокой прочностью по сравнению с образцами, рабочая часть которых расположена в середине проката. Изменение структуры в центральной области сечения листа приводит к снижению прочности, но уровень относительного удлинения при этом повышается на 1 — 2 % (рис. 2, 3).

Исследование изломов испытанных образцов с использованием растровой электронной микроскопии на приборе РЭМ «Philips 535» выявило, что все типы образцов демонстрируют вязкий транскристаллитный характер разрушения. При этом на поверхностях изломов образцов типа II № 4 — $\varnothing 10$ мм и особенно типа III № 3 — $\varnothing 15$ мм наблюдались трещины расщепления, ориентированные преимущественно вдоль направления проката (рис. 7, 8).

При разрушении образцов типа III № 3 — $\varnothing 15$ мм (рис. 7ж, 8ж) формируются наиболее значительные по ширине и протяженности трещины расщепления. Возникновение таких трещин, несомненно, обусловлено высокими нормальными растягивающими напряжениями в сочетании со структурной неоднородностью проката, а именно с ярко выраженной полосчатостью [7], наблюдавшейся в средней части листа по сечению.

Темные полосы в структуре материала, состоящие из мелких бейнитных кристаллов, образуются вследствие сохранения химической неоднородности (дендритной структуры) в листах после ТМО и ЗПН с отпуском [8]. Эти полосы оказывают влияние на распределение напряжений в материале, что способствует образованию микротрещин на границе между структурными областями с различной степенью фрагментации (рис. 7з, 8з).

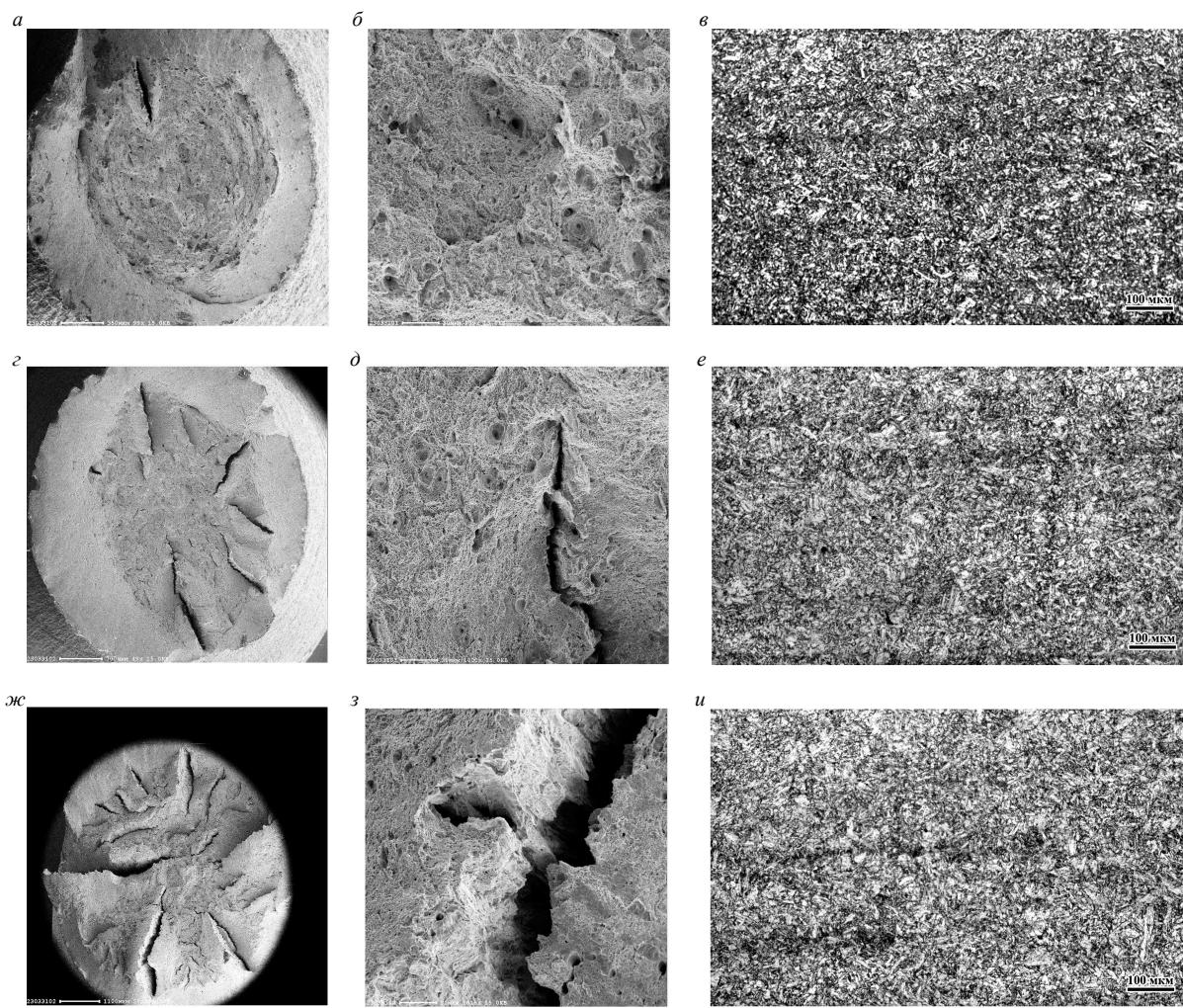


Рис. 7. Прокат толщиной 24 мм. Типичный вид поверхности разрушения и микроструктура у поверхности излома образцов: тип III № 6 с диаметром рабочей части 6 мм (а — в); тип II № 4 с диаметром рабочей части 10 мм (г — е); тип III № 3 (ж — и) с диаметром рабочей части 15 мм

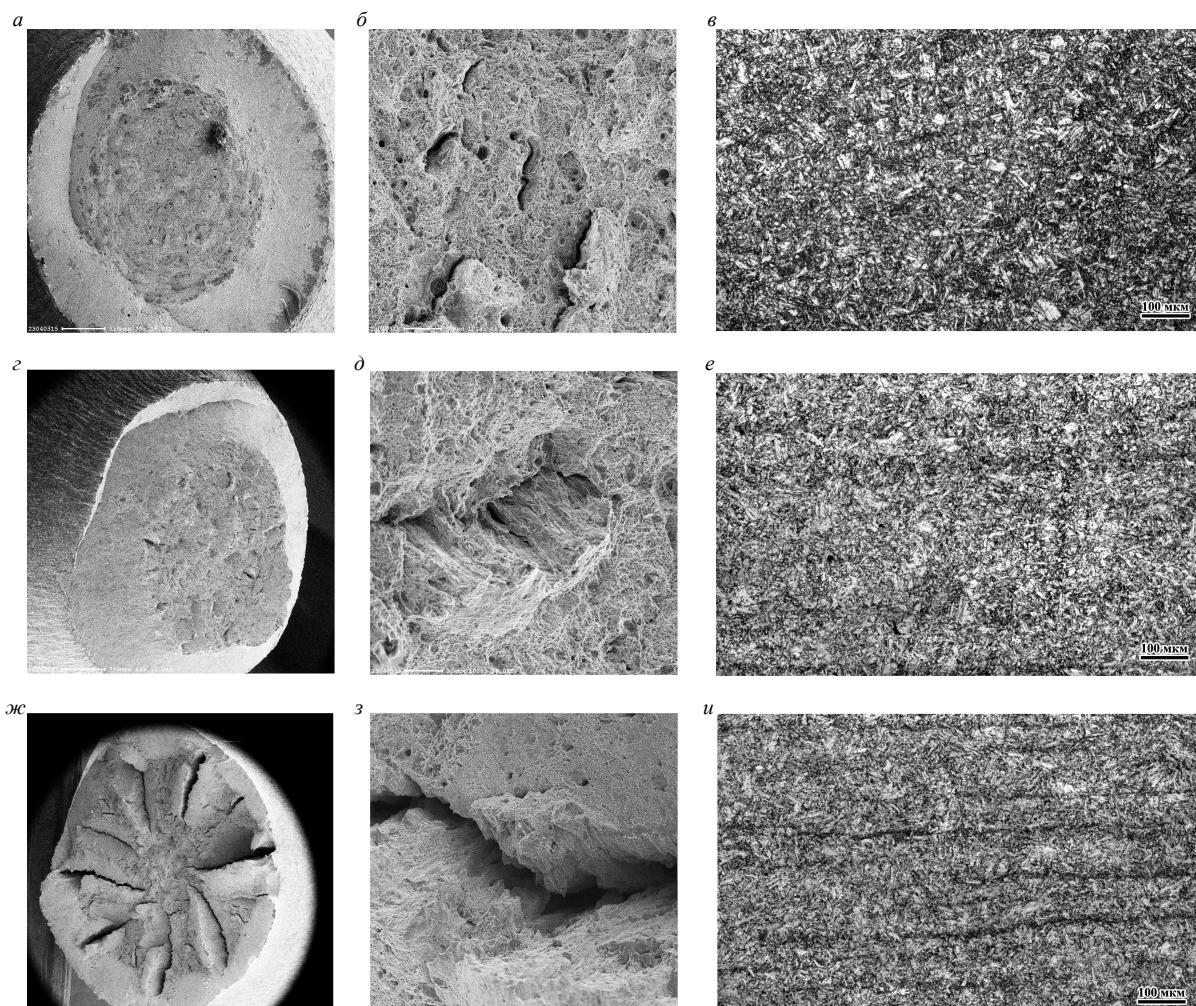


Рис. 8. Прокат толщиной 30 мм. Типичный вид поверхности разрушения и микроструктура у поверхности излома образцов: тип III № 6 с диаметром рабочей части 6 мм (а — в); тип II № 4 с диаметром рабочей части 10 мм (г — е); тип III № 3 (ж — и) с диаметром рабочей части 15 мм

ВЫВОДЫ

Параметры цилиндрических образцов, а именно диаметр рабочей части и место расположения ее оси, оказывают существенное влияние на значения предела текучести и временное сопротивление листового проката толщиной 30 мм при одноосном растяжении. Влияние этих параметров на свойства при одноосном растяжении образцов от листа толщиной 24 мм менее выражено. Это обусловлено структурными особенностями: увеличением доли гранулярного бейнита и ростом размеров областей реечного бейнита в середине по сечению листов.

В связи с неоднородностью структуры, вариациями фазового состава и размеров структурных элементов, по толщине листа испытание образцов типа III № 6, ось рабочей части которых расположена на расстоянии 7 мм от поверхности листового проката, приводит к завышению значений пределов текучести и временного сопротивления на 20 — 30 МПа по сравнению с образцами типа II № 4 и типа III № 3, ось рабочей части которых расположена в центре листа по толщине.

Установлено, что для проката высокопрочной стали 09ХН2МД исследуемых толщин структурные изменения в середине листа, способствующие снижению прочностных свойств, не влияют на уровень относительного удлинения $> 5,5 \%$.

Структурная полосчатость, являющаяся результатом возможных технологических отклонений при производстве листового проката, способствует образованию трещин расщепления в изломах образцов. Наиболее широкие и протяженные трещины расщепления образуются на образцах типа III № 3, в которых после закалки с прокатного нагрева структурная полосчатость особенно выражена.

Для подробного анализа влияния структурной неоднородности на результаты испытаний механических свойств листового проката широкого сортамента и статистически значимых выводов требуется проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлусова Е.И. Влияние легирования на структуру и свойства высокопрочной хладостойкой стали после термической и термомеханической обработки / Е.И. Хлусова, С.А. Голосиенко, Г.Д. Мотовилина, У.А. Пазилова // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 1 (49). — С. 20 — 32.
2. Куртева К.Ю. Изменение структуры и свойств по сечению толстолистового проката бейнитно-мартенситной стали / К.Ю. Куртева, Г.Д. Мотовилина, Е.В. Забавичева // Вопросы материаловедения. — 2022. — № 4 (112). — С. 174 — 181.
3. Счастливцев В.М. Особенности структуры бейнита в низкоуглеродистых свариваемых сталях после термомеханической обработки / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.А. Круглова и др. // Вопросы материаловедения. — 2009. — № 3 (59). — С. 26 — 38.
4. Счастливцев В.М. Влияние термомеханической обработки на структуру и механические свойства стали типа 10ХН2М / В.М. Счастливцев, Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2006. — № 4. — С. 78 — 82.
5. Мишуринская Е.В. Влияние температуры отпуска на структуру и свойства бейнитно-мартенситной стали после закалки / Е.В. Мишуринская // Труды СПбГМТУ. — 2023. — № 1 (5). — С. 6 — 18.
6. Мотовилина Г.Д. Влияние структуры на величину равномерного удлинения штрупсовой стали / Г.Д. Мотовилина, В.В. Рябов, Е.И. Хлусова // Металлург. — 2011. — № 9. — С. 70 — 74.
7. Казаков А.А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей / А.А. Казаков, Н.В. Малахов, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова // Вопросы материаловедения. — 2009. — № 3 (59). — С. 52 — 64.
8. Кудря А.В. Роль разномасштабных структур в обеспечении пластичности и вязкости структурно-неоднородных сталей / А.В. Кудря // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2005. — № 5. — С. 18 — 24.

REFERENCES

1. Khlusova E.I., Golosienko S.A., Motovilina G.D., Pasilova U.A. Vliyanie legirovaniya na strukturu i svoistva vysokoprochnoi khladostoiokoi stali posle termicheskoi i termomekhanicheskoi obrabotki. [Influence of alloying on structure and properties of high-strength cold-resistant steel after heat and thermomechanical treatment]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2007. No. 1 (49). P. 20 — 32.
2. Kurteva K.J., Motovilina G.D., Zabavicheva E.V. Izmenenie struktury i svoistv po secheniyu tolstolistovogo prokata beinitno-martensitnoi stali [Changes in the structure and properties of the thick sheets of bainitic/martensitic steel at a cross-section]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2022. No. 4 (112). P. 174 — 181.
3. Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Kruglova A.A. et al. Osobennosti struktury beinita v nizkouglerodistykh svarivaemykh stalyakh posle termomekhanicheskoi obrabotki [Characteristic features of bainite structure of low-carbon welded steels after the thermomechanical treatment]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2009. No. 3 (59). P. 26 — 38.
4. Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Egorova L.J. et al. Vliyanie termomekhanicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoistva stali tipa 10KhN2M [Thermomechanical treatment influence on structure and mechanical properties of 10XH2M grade steel]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2006. No. 4. P. 78 — 82.
5. Mishurinskaja E.V. Effect of tempering on the structure and properties of bainitic-martensitic steel after hardening]. *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University*. 2023. No. 1 (5). P. 6 — 18. (In Russ.)
6. Motovilina G.D., Ryabov V.V., Khlusova E.I. Vliyanie struktury na velichinu ravnomernogo udlineniya shtripsovoi stali [Effect of structure on value uniform elongation]. *Metallurg*. 2011. No. 9. P. 70 — 74.
7. Kazakov A.A., Malahov N.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I. Strukturnaya neodnorodnost' i metody ee snizheniya dlya povysheniya kachestva konstruktsionnykh stalei [Structural heterogeneity and method of its reduction for improvement of quality of structural steels]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2009. No. 3 (59). P. 52 — 64.
8. Kudrya A.V. The role of structures of different size in plasticity and toughness of structurally inhomogeneous steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005. No. 5. P. 18 — 24. (In Russ.)

УДК 691.714:620.178.162:620.18
EDN TBCSPZ

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИЗНОСОСТОЙКОЙ СТАЛИ И НАПЛАВОК В ПРОЦЕССЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Г.Д. Мотовилина, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

К.Е. Садкин, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

Е.И. Хлусова, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

Е.А. Яковлева, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, e-mail: npk3@crism.ru

С целью оценки возможности применения в элементах морских конструкций, подвергаемых износу, проведены сравнительные триботехнические испытания листового проката из стали марки Magstrong H500 и наплавок, выполненных электродами марки ОZN-400M и сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ. Исследована структура, определена твердость поверхностного слоя, подвергнутого истиранию, и способность его к упрочнению при трении. Показано, что, несмотря на близкие значения твердости, исследованные материалы обладают различной износостойкостью.

Наиболее высокую стойкость к изнашиванию имеет листовой прокат из стали марки Magstrong H500 с мартенситной структурой, которая обладает большой способностью к деформационному упрочнению. Наиболее низкой износостойкостью обладают образцы с наплавкой, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, вследствие того, что у поверхности трения создаются самый тонкий слой с измененной деформированной структурой и широкая область «подстройки».

Ключевые слова: высокопрочная мартенситная сталь, наплавка, износостойкость, трение, поверхностный слой, микроструктура, микротвердость.

Для цитирования: Мотовилина Г.Д. Исследование упрочнения поверхностных слоев износостойкой стали и наплавок в процессе триботехнических испытаний / Г.Д. Мотовилина, К.Е. Садкин, Е.И. Хлусова, Е.А. Яковлева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 125 — 136. — EDN TBCSPZ.

STUDY OF SURFACE LAYERS HARDENING OF WEAR-RESISTANT STEEL AND SURFACING DURING FRICTION TESTS

G.D. Motovilina, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

K.E. Sadkin, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

E.I. Khlusova, DSc, Professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

E.A. Yakovleva, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

For evaluation of applicability in marine constructions, the comparative friction tests have been carried out to determine the wear resistance of Magstrong H500 steel rolled plates and surfacing made with OZN-400M electrodes and welding solid wire. The structure has been studied and the hardness of the surface layers subjected to abrasion has been determined. It is shown that materials with similar hardness values have different wear resistance.

Key words: high-strength martensitic steel, surfacing, wear resistance, friction, surface layer, microstructure, microhardness.

For citation: Motovilina G.D., Sadkin K.E., Khlusova E.I., Yakovleva E.A. Study of surface layers hardening of wear-resistant steel and surfacing during friction tests. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 125 — 136. EDN TBCSPZ. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Для ряда конструкций рыбопромысловых судов, таких как башмаки траолов, шахты «moon pool», требуется применение износостойких материалов. В случае шахты для защиты ее днищевой части возможно применение как накладных листов из износостойкого проката, так и износостойких наплавочных материалов, обеспечивающих эксплуатацию в контакте с морской водой.

Выбор материалов должен быть обусловлен не только требованиями по износостойкости материалов и условиям эксплуатации, но и требованиями по технологичности при изготовлении корпусных конструкций.

Изнашивание (истирание) при трении определяется процессами, происходящими в области контакта материалов. Известно, что контактное давление при трении неизбежно упрочняет материал. Упрочняясь вследствие локализации пластической деформации при усилении контактного давления, поверхностный слой металлического материала по механическим свойствам может существенно отличаться от исходного состояния. Достоверно спрогнозировать сопротивляемость изнашиванию, ориентируясь на механические свойства (твердость), заявленные в сертификате на листовой прокат или в нормативной документации, затруднительно.

В процессе трения происходит изменение структуры контактирующей поверхности материала и ее «подстройка» к внешнему воздействию. В ряде работ показано, что упрочнение поверхности при трении можно рассматривать как один из аспектов при выборе износостойкого материала применительно к конкретным условиям эксплуатации [1 — 4].

Упрочнение в процессе трения (истирания) сплавов на основе железа возможно главным образом на основе следующих механизмов:

- закрепление и повышение плотности дислокаций в результате многократного пластического деформирования металлической матрицы любого исходного фазового состава [2];
- закрепление дислокаций мелкодисперсными карбидами, выделяющимися по плоскостям скольжения кристаллической решетки в процессе трения [3];
- превращение метастабильного остаточного аустенита в мартенсит деформацией при трении [5 — 7]. Одновременно происходит механический наклеп как исходного твердого раствора, не претерпевшего превращений, так и образованного в процессе трения мартенсита. При этом степень упрочнения при участии деформационных фазовых превращений может быть выше, чем максимально достигаемая микротвердость исключительно при механическом наклете.

Из литературных данных известно, что в процессе изнашивания при чрезвычайно интенсивных воздействиях на материал поверхностных слоев может иметь место существенный разогрев, активизирующий процессы старения твердых растворов, или растворения упрочняющей карбидной фазы [8]. Механизм упрочнения и твердость формирующегося поверхностного слоя определяются структурой и химическим составом выбранного материала [9, 10]. В общем случае стойкость к изнашиванию может быть оценена по результатам сравнительных исследований твердости и структуры исходного материала и их изменения в приповерхностном упрочненном слое после контакта с контртелом.

Целью работы явилось исследование сравнительной износостойкости и способности к упрочнению при трении поверхностных слоев листового проката из стали марки Magstrong H500 и различных наплавок.

1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения триботехнических испытаний и сравнительной оценки износостойкости были выбраны:

- листовой прокат из стали марки Magstrong H500 толщиной 10 мм, предназначенный для изготовления и ремонта навесного оборудования карьерной и горно-шахтной техники (ковши, лопаты, отвалы и т.д.), навесного оборудования строительной и дорожно-строительной техники, кузовов карьерных самосвалов, бетономешалок и т.д.;
- сварочные (наплавочные) материалы: электроды марки ОЗН-400М (17Г4С1), которые широко применяются для наплавки деталей из углеродистых и низколегированных сталей, работающих в условиях трения и ударных нагрузок, и сварочная проволока марки Св-08Х16Н5М3АБ, обладающая высокой прочностью.

Для изготовления образцов для испытаний на трение на пластины 100 × 80 × 10 мм из высокопрочной стали были выполнены наплавки:

- методом ручной дуговой сварки электродами ОЗН-400М (17Г4С1) \varnothing 4 мм;
- методом механизированной сварки неплавящимся электродом проволокой Св-08Х16Н5М3АБ \varnothing 1,2 мм.

В процессе сварки выполняли послойный визуальный контроль. Трешины и иные дефекты обнаружены не были.

Химический состав и механические свойства исследованных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав и механические свойства согласно требованиям нормативной документации

Характеристики	Листовой прокат из стали марки Magstrong H500	ОЗН-400М (17Г4С1)	Св-08Х16Н5М3АБ (сварочная проволока)
Массовая доля элементов, не более, %	C 0,3 Si 0,2 Mn 0,85 P 0,012 S 0,005 Cr 0,5 Ni 3,2 Cu 0,35 Mo 0,4 V 0,035 Al 0,05 Ti 0,01 Nb 0,01 N 0,008 B 0,005	0,17 2,0 4,0 0,03 0,04 — — — — — — — — — — — —	≤ 0,08 0,2 — 0,6 0,4 — 0,8 ≤ 0,015 ≤ 0,015 15,0 — 17,0 4,0 — 6,0 0,4 — 0,75 3,0 — 3,5 — — — — — 0,1 — 0,2 0,05 — 0,2 —
Временное сопротивление, МПа	≥ 1500	—	1330
Предел текучести, МПа	≥ 1200	—	1040
Твердость HRC	50 — 53	38 — 48	40 — 43
Относительное удлинение A5, %	≥ 10 (A ₅₀ , %)	—	15 — 16
Работа удара, КВ (температура испытаний), Дж	≥ 30 (-40 °C) KCV	—	60 — 130 (20 °C)

Триботехнические испытания для оценки износостойкости проводили по двум методикам: по экспресс-методике определения триботехнических характеристик на машине трения ИИ 5018 и на стенде пяточного трения типа СПТ «М», предназначенного для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа материалов в условиях сухого, пограничного или жидкостного трения, в соответствии с ГОСТ Р 50740 и ГОСТ 30480 и СТО-07516250-151 [11 — 13].

Исследования проводили на парах трения, состоящих из исследуемых образцов и контртела из стали марки Magstrong H500.

1.1. Проведение триботехнических испытаний по экспресс-методике на машине трения ИИ 5018.

За основу методики экспериментальных исследований коэффициента трения и интенсивности изнашивания в диапазоне температур от 20 до 250 °C принята методика экспрессных комплексных триботехнических испытаний.

Условия испытания: линейная скорость скольжения 0,1 м/с, нормальная нагрузка на образец от 200 до 1000 Н, в синтетической морской воде.

Триботехнические испытания проводились с целью определения интенсивности изнашивания (I_h) и коэффициента трения (f_c). Следует отметить, что использование синтетической морской воды при проведении испытаний не подразумевает в данном случае моделирования коррозионных процессов вследствие ограниченности времени испытаний.

1.2. Проведение триботехнических испытаний на стенде типа СПТ «М».

Стенды типа СПТ представляют собой технологическое оборудование с регулируемым по скорости приводом и вертикальным валом и предназначены для воспроизведения и изучения основных закономерностей процесса износа материалов в условиях сухого или жидкостного трения.

Нагрузка на стенде создается «прижимным» механизмом. Величина усилия контролируется динамометром. Пара трения представляет собой шайбу и кольцо. Шайба имеет три отверстия диаметром 5 мм и глубиной 10 мм. В эти углубления, расположенные под углом 120°, вставляют цилиндрические образцы, изготовленные из испытуемого материала.

Испытания проводили по следующей схеме: приработка — удельная нагрузка 2,5 МПа (30 мин); + нагружение с удельной нагрузкой 5 МПа (30 мин); удельная нагрузка 5 МПа — пройденный путь 5000 м; удельная нагрузка 10 МПа — пройденный путь 5000 м; удельная нагрузка 15 МПа — пройденный путь 5000 м; удельная нагрузка 20 МПа — пройденный путь 5000 м.

Дополнительные условия испытаний: скорость скольжения — 0,25 м/с; среда — проточная бытовая вода. Испытания проводили при воздействии заданной осевой нагрузки.

Через фиксированное расстояние определяли износ посредством измерения высоты образцов с помощью компаратора марки ИЗВ-2 с ценой деления 0,1 мкм.

В процессе испытаний по индикатору (динамометру) фиксировали момент трения и вычисляли коэффициент трения μ_c по формуле:

$$\mu_c = \frac{0,1 \times m \times k}{D_{cp} \times q \times S_d}, \quad (1)$$

где m — количество делений индикатора (динамометр);

k — коэффициент, учитывающий упругую деформацию стальной пластины, изгиб которой фиксирует индикатор (динамометр);

D_{cp} — средний диаметр дорожки трения, мм;

S_d — площадь дорожки трения, мм^2 .

Для оценки возможности упрочнения материала при истирании были проведены исследования поверхности трения образцов после испытаний на стенде типа СПТ «М» методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и оптической металлографии. Исследование поверхности трения испытанных образцов выполняли с применением РЭМ «Philips 535», исследования микроструктуры методами оптической металлографии — с помощью светового инвертированного металлографического микроскопа «Axiovert 40 MAT».

Измерения микротвердости проводили на шлифах, изготовленных по сечению образца, с помощью микротвердомера «Durascan 50» при нагрузке 100 гс с шагом 200 мкм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Результаты триботехнических испытаний.

Результаты определения интенсивности изнашивания и коэффициента трения по экспресс-методике после испытания на машине трения ИИ 5018 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента трения, интенсивности изнашивания в зависимости от контактного и номинального давления, определенные по экспресс-методике на машине трения ИИ 5018

Нормальная нагрузка, Н	200	400	600	800	1000
Пара трения Magstrong H500 (45 HRC) / Magstrong H500 (45 HRC)					
Контактное давление (начальное), МПа	10,88	19,21	33,89	36,07	42,18
Интенсивность изнашивания, I_h , мкм/км	25,12	44,76	86,24	104,58	163,75
Коэф. трения, f_{tr}	0,43	0,41	0,40	0,40	0,45
Пара трения ОЗН-400М (38 — 48 HRC) / Magstrong H500 (45 HRC)					
Контактное давление (начальное), МПа	11,88	20,00	31,03	31,03	41,91
Интенсивность изнашивания, I_h , мкм/км	17,69	30,33	53,36	53,36	86,21
Коэф. трения, f_{tr}	0,42	0,42	0,44	0,44	0,44
Пара трения Св-08Х16Н5М3АБ (40 — 43 HRC) / Magstrong H500 (45 HRC)					
Контактное давление (начальное), МПа	4,89	10,30	13,09	15,68	19,31
Интенсивность изнашивания, I_h , мкм/км	77,30	156,62	202,34	235,49	322,05
Коэф. трения, f_{tr}	0,46	0,42	0,41	0,38	0,39

Коэффициент трения, определенный по экспресс-методике, с увеличением номинальной нагрузки изменяется незначительно для всех исследуемых пар трения и составляет $\sim 0,38 — 0,45$, что близко к имеющимся данным для пар трения «сталь по стали» в условиях недостаточной смазки. Наименьшая интенсивность изнашивания у наплавки ОЗН-400М в паре трения ОЗН-400М / Magstrong H500.

По результатам испытаний построена зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления (рис. 1a). По характеру расположения кривых видно, что разница в интенсивности изнашивания при увеличении нагрузки для листового проката стали марки Magstrong H500 и электродов ОЗН-400М незначительна и находится в пределах погрешности измерений.

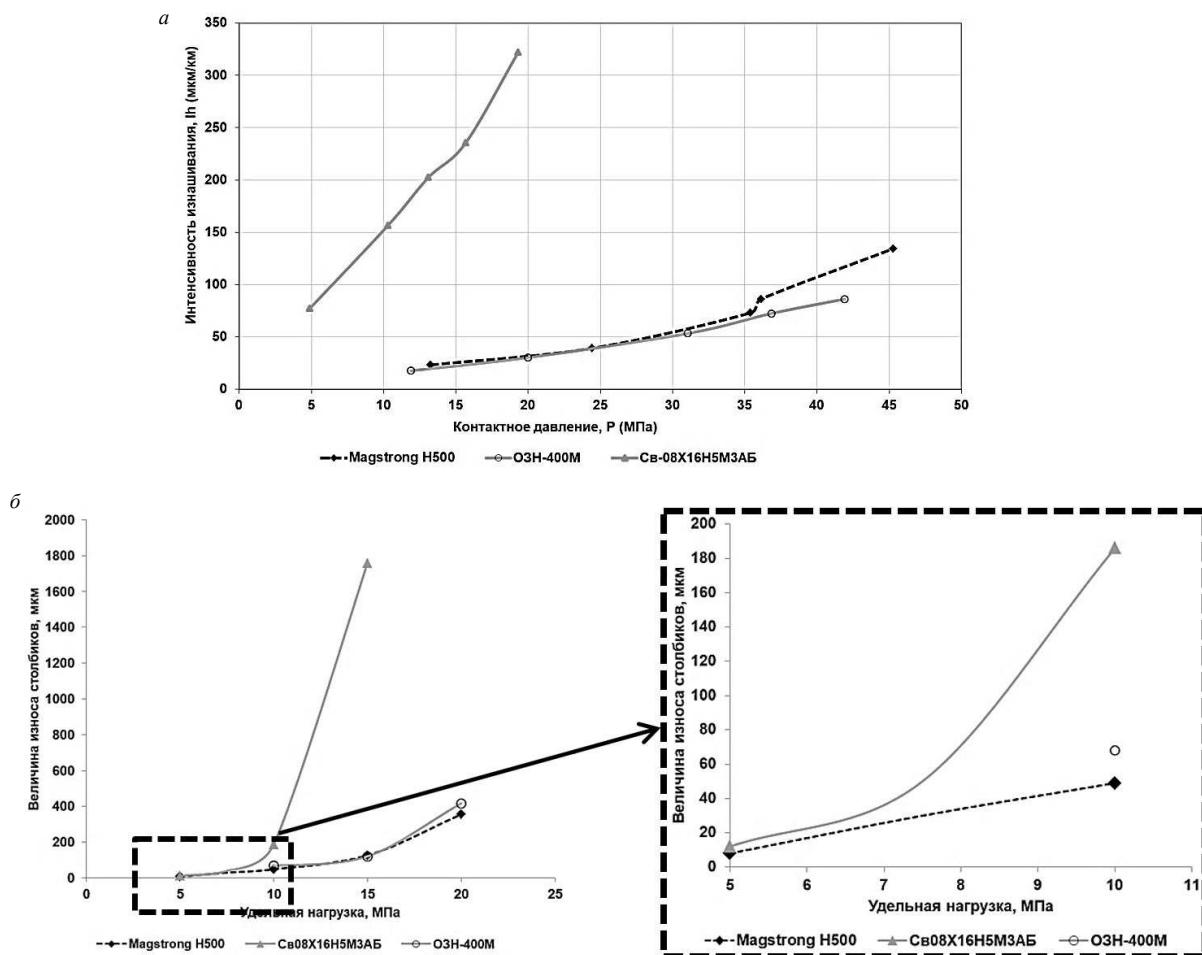


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления по экспресс-методике ИИ 5018 (а); зависимость величины износа образцов-столбиков из исследуемых материалов от удельной нагрузки на стенде СПТ «М» в паре трения «исследуемый материал / сталь марки Magstrong H500» (б)

Результаты триботехнических испытаний на стенде типа СПТ «М» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения величины износа столбиков в паре трения:
исследуемый материал/сталь марки Magstrong H500 на стенде типа СПТ «М»

Удельная нагрузка, МПа	5	7,5	10	15	20
Пара трения Magstrong H500/Magstrong H500					
Величина износа столбиков, мкм	8	—	49	126	355
Коэффициент трения	0,29	—	0,45	0,45	0,38
Пара трения ОZN-400M/Magstrong H500					
Величина износа столбиков, мкм	—	—	68	121	417
Коэффициент трения	—	—	0,45	0,30	0,40
Пара трения Cv08X16H5M3AB / Magstrong H500					
Величина износа столбиков, мкм	12	—	186	1756	—
Коэффициент трения	—	—	0,48	0,40	—

Коэффициент трения в паре трения «исследуемый материал / сталь Magstrong H500», определенный на стенде типа СПТ «М», изменяется в более широких пределах и составляет 0,27 — 0,45, но также характерен для пар трения «сталь по стали» в условиях недостаточной смазки. На рис. 1б представлена зависимость величины износа образцов-столбиков от удельной нагрузки.

Полученные по обеим методикам результаты испытаний показали сходимость: близкую износостойкость к стали марки Magstrong H500 имеет наплавка сварочными электродами ОЗН-400М. Наплавленный сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ материал обладает меньшей износостойкостью по отношению к стали марки Magstrong H500.

2.2. Формирование рельефа на поверхности трения исследуемых образцов.

На рис. 2 приведены фотографии поверхности трения образцов-столбиков из исследуемых материалов после испытаний на стенде СПТ «М».

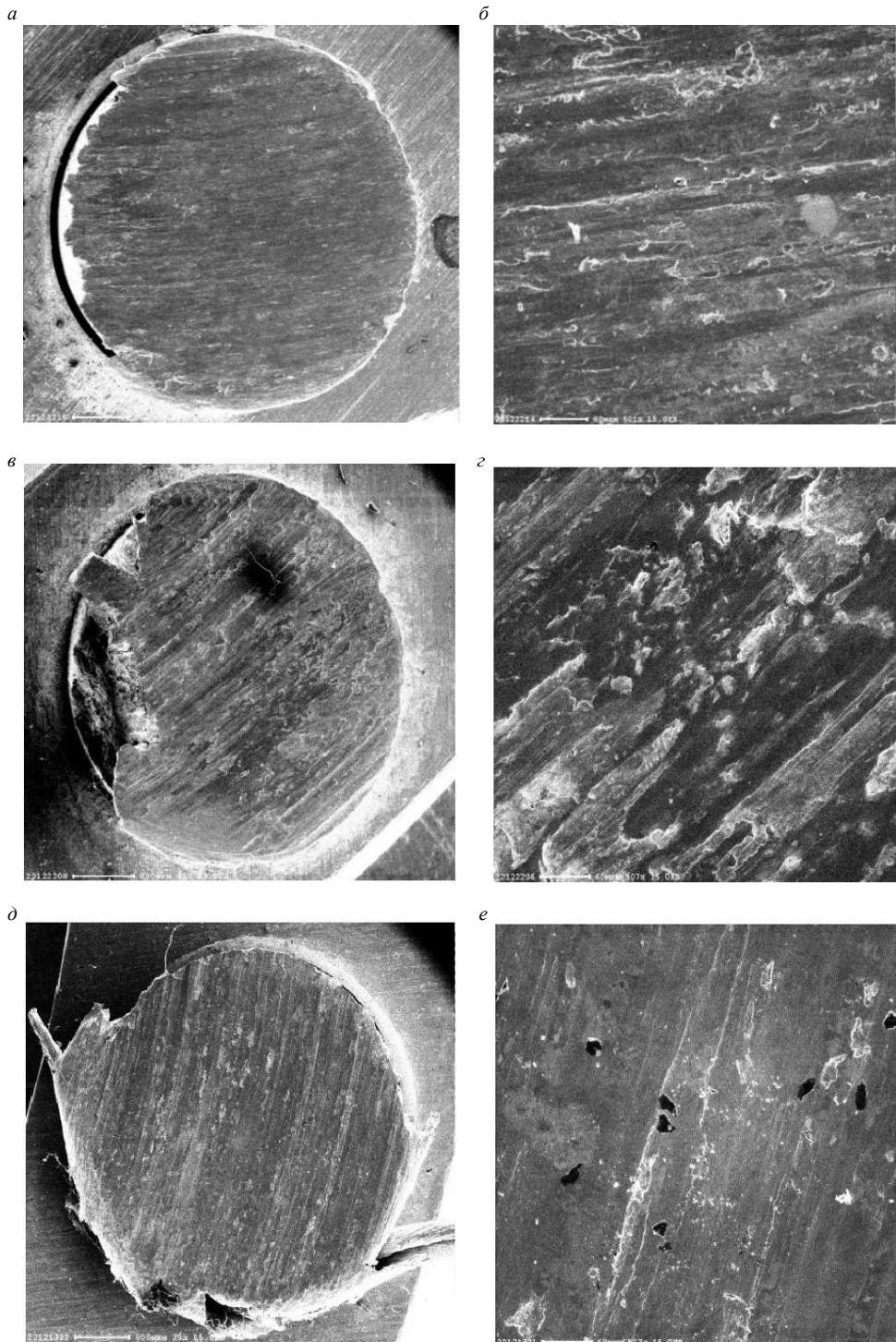


Рис. 2. Вид поверхности трения образцов после проведения испытаний на стенде типа СПТ «М» в парах трения Magstrong H500/Magstrong H500 (а, б), ОЗН-400М/Magstrong H500 (с, д), Св-08Х16Н5М3АБ/Magstrong H500 (е)

После испытаний пары Magstrong H500/Magstrong H500 при нагрузке 25 МПа на образцах наблюдается выкрашивание кромок, по краям дорожек трения присутствуют задиры протяженностью до 200 мкм. Поверхность трения образцов характеризуется заглаженным рельефом (рис. 2а, б).

На образцах из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, при испытаниях в паре со сталью Magstrong H500 частичное выкрашивание кромок начинается при нагрузке 15 МПа. На поверхности трения формируется рельеф, который также содержит следы выкрашивания (рис. 2в, г). По контуру образца по краям отдельных дорожек трения наблюдаются задиры и отслоения, особенно существенные в местах выхода внутренних трещин, образовавшихся при формировании наплавки.

На образцах наплавки сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ при испытании в паре со сталью Magstrong H500 интенсивное выкрашивание кромок происходит уже при нагрузке 10 МПа, по контуру образца по краям отдельных дорожек трения наблюдаются значительные задиры и отслоения (рис. 2д, е).

2.3. Исследование микроструктуры материала до и после триботехнических испытаний.

Микроструктура образцов до и после испытаний представлена на рис. 3 — 5. Микроструктура стали марки Magstrong H500 в состоянии поставки мелкозернистая, полосчатая (структурные полосы расположены вдоль направления прокатки), мартенситная, типична для листового проката данного класса прочности (рис. 3а). После испытаний, в процессе которых нагружение происходило перпендикулярно структурным полосам, в поверхностном слое образуется деформированная мелкодисперсная структура. Слой с измененной структурой толщиной ~5 — 20 мкм распределен по поверхности неравномерно, в процессе трения происходило не только его наращивание, но и отделение. Под слоем с измененной структурой расположена область зерен, ориентированных в направлении трения, глубиной от 15 до 35 мкм (рис. 3б, в). В работе [10] близкие к наблюдаемым изменения поверхностного слоя после трения связывают с формированием ячеистой структуры в процессе пластической деформации при умеренных температурах и выделением карбидных частиц из твердого раствора.

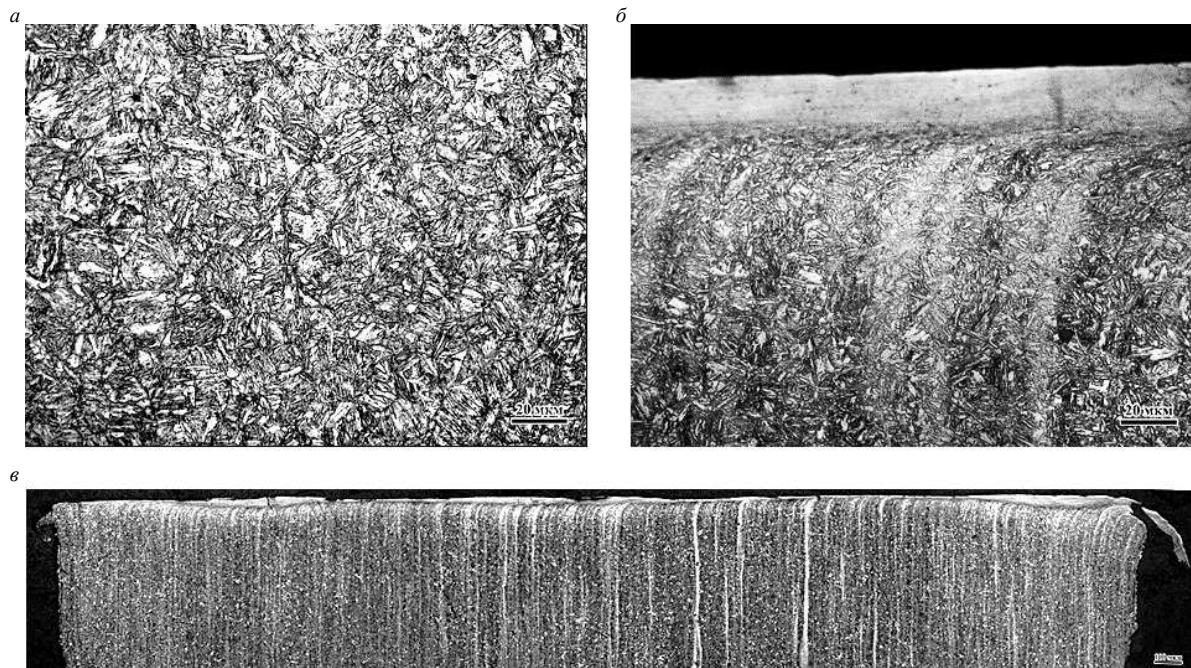


Рис. 3. Микроструктура образца из стали марки Magstrong H500 до (а) и после (б, в) триботехнических испытаний

Исходная микроструктура наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, литая, дендритная, представлена преимущественно дислокационным пакетным мартенситом и бейнитом (рис. 4а). Деформированная область у поверхности трения сосредоточена в узком слое глубиной ~20 — 50 мкм, при этом область структурной «подстройки» ниже деформированной области, то есть область зерен, ориентированных в направлении трения, отсутствует (рис. 4б, в).

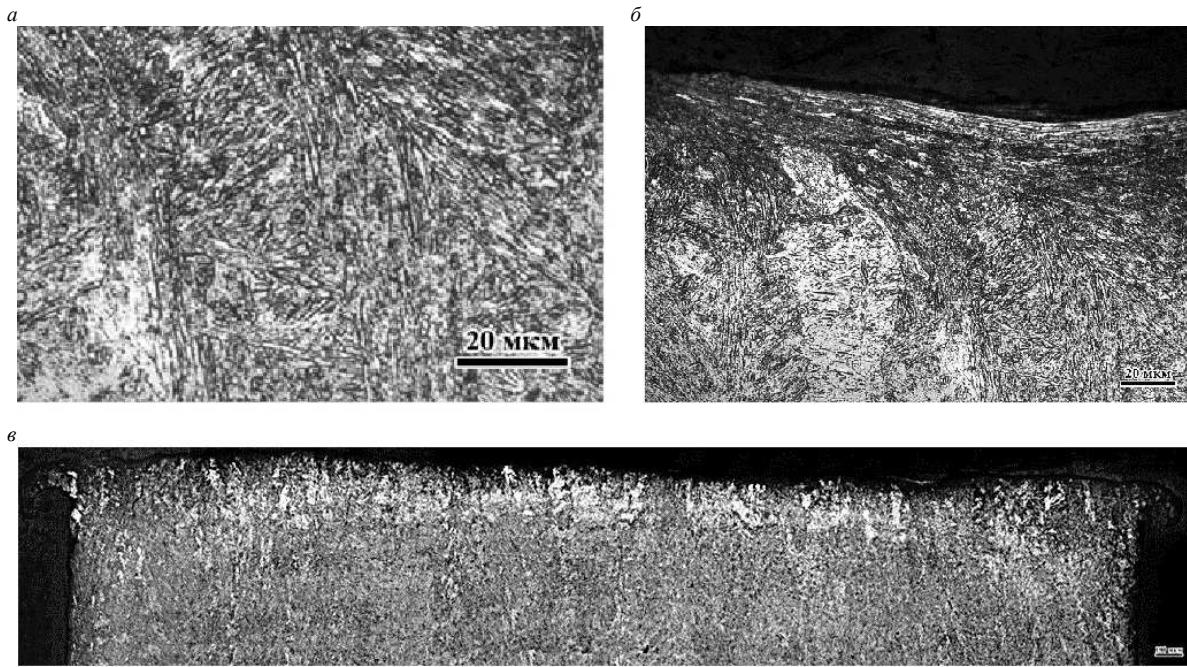


Рис. 4. Микроструктура образца из наплавки электродами ОЗН-400 М до (*а*) и после (*б*, *в*) триботехнических испытаний

Микроструктура наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, мартенситная с прослойками аустенита, имеет дендритное строение (рис. 5*а*). У поверхности трения присутствует деформированный слой с измененной структурой глубиной ~ 15 — 20 мкм, вытянутые фрагменты которой ориентированы в направлении скольжения контртела. Область «подстройки» под деформированным слоем, образованная дендритами с границами, частично ориентированными в направлении скольжения контртела, имеет глубину ≤ 120 мкм, рис. 5*б*, *в*.

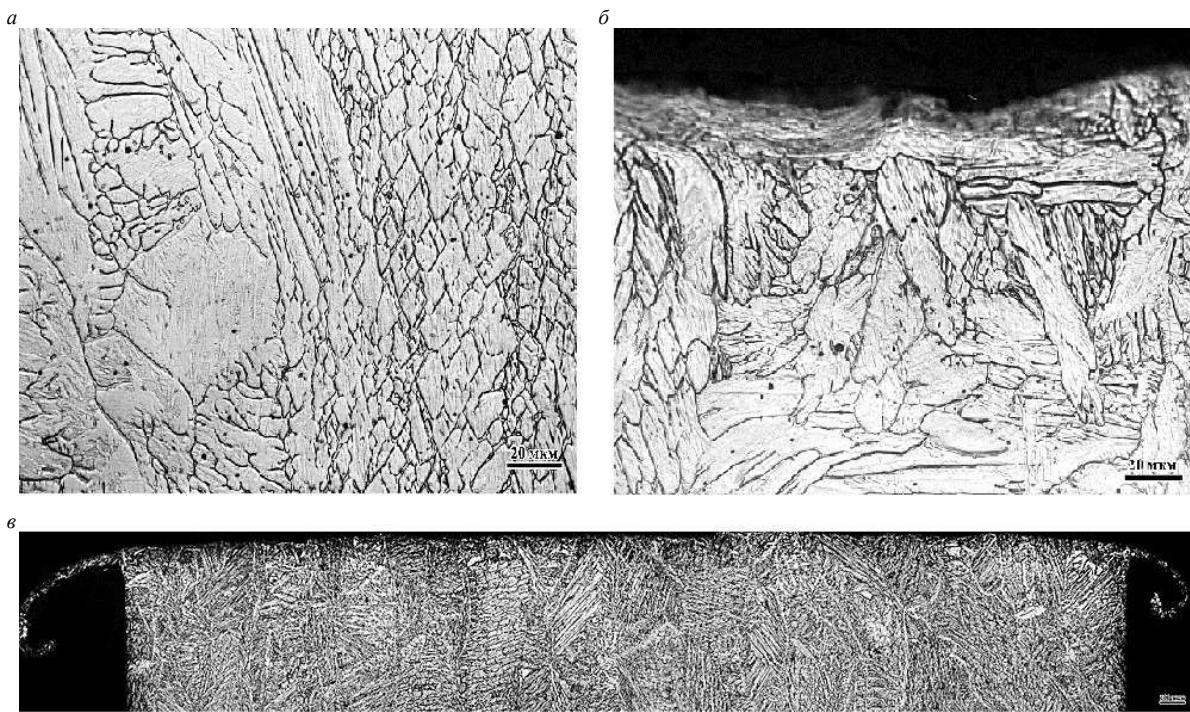


Рис. 5. Микроструктура образца из наплавки сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ до (*а*) и после (*б*, *в*) триботехнических испытаний

2.4. Результаты измерения микротвердости в поверхностных слоях испытанных образцов.

Для определения степени упрочнения поверхностного слоя в процессе трения были проведены измерения микротвердости $HV_{0,1}$ (с шагом 200 мкм при нагрузке 100 гс) испытанных образцов, результаты приведены на рис. 6.

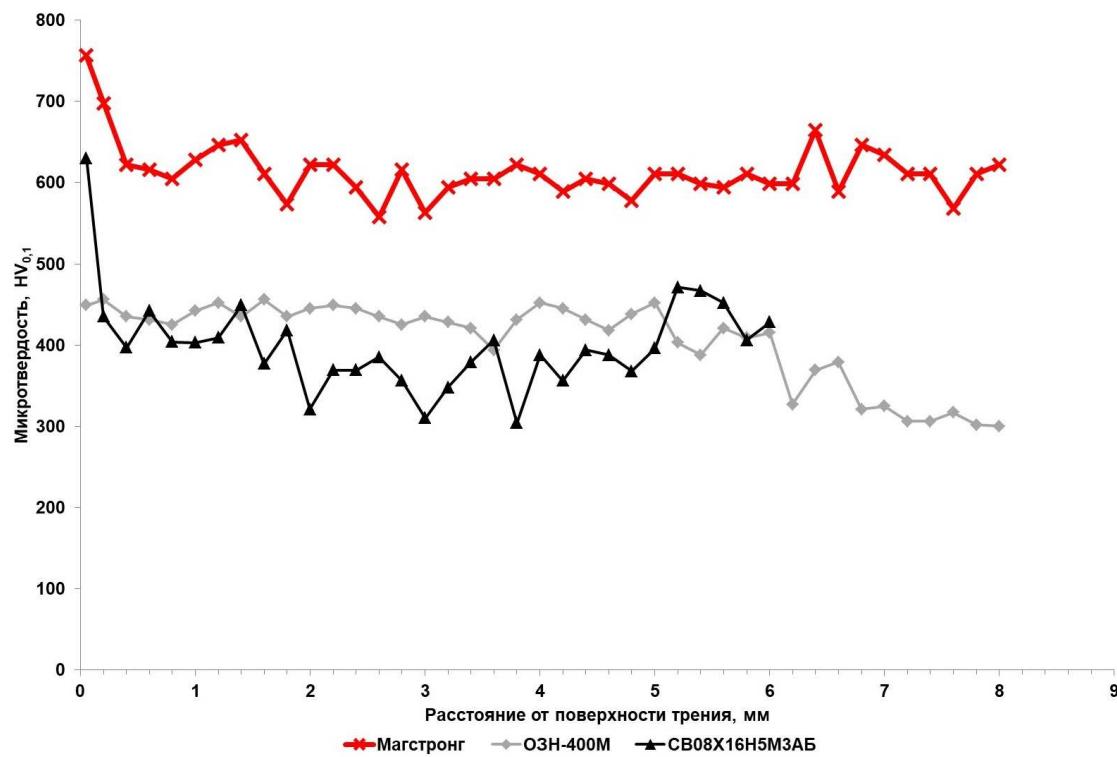


Рис. 6. Изменение микротвердости в поверхностных слоях образцов, испытанных на износ при трении в паре «исследованный материал / сталь марки Magstrong H500»

Наиболее высокие значения микротвердости приповерхностного слоя наблюдаются для стали марки Magstrong H500. Установлено, что после трения микротвердость поверхностного слоя стали марки Magstrong H500 возрастает до 698 — 757 $HV_{0,1}$ (что примерно соответствует ~60 — 62 HRC).

Повышение микротвердости поверхностного слоя (до 630 $HV_{0,1}$, ~56 HRC) после испытания наплавки сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ достигается за счет формирования фрагментированной деформированной структуры. На удалении 1,4 мм от поверхности микротвердость наплавленного металла составляет ~400 — 435 $HV_{0,1}$ (примерно соответствует ~40 — 45 HRC), что сопоставимо с заявленной твердостью сварочной проволоки Св-08Х16Н5М3АБ.

Наплавка, выполненная сварочными электродами ОЗН-400М, практически не упрочняется в процессе трения, однако имеет высокие значения микротвердости как на поверхности трения, так и на удалении от нее: ~440 — 450 $HV_{0,1}$ (примерно соответствует ~45 HRC).

Таким образом, упрочнение поверхностного слоя наблюдается для листового проката стали Magstrong H500 (~25 %) и наплавки проволокой Св-08Х16Н5М3АБ (~50 %). Слой распределен по поверхности неравномерно, в процессе испытаний происходит его наращивание и отделение. Образование поверхностного слоя с повышенной твердостью происходит, по-видимому, вследствие деформационного упрочнения. Для наплавки, выполненной электродами ОЗН-400М, образования упрочненного слоя не происходит из-за низкой деформационной способности наплавленного металла.

Обобщенные данные представлены в табл. 4.

Таблица 4

Обобщенные данные по результатам исследований и испытаний

Материал	Степень упрочнения поверхностного слоя при трении, % (твердость поверхностного слоя / твердость основного металла ($HV_{0,1}$))	Глубина слоя с измененной структурой на поверхности трения, мкм	Глубина области структурной «подстройки», мкм	Интенсивность изнашивания, мкм (при нагрузке 10 МПа)
Magstrong H500	15	20	15 — 35	~49
СВ-08Х16Н5М3АБ	46	15 — 20	120	~186
ОЗН-400М	—	20 — 50	нет	~68

Наиболее высокую стойкость к изнашиванию показал листовой прокат из стали марки Magstrong H500. Его исходная мартенситная структура обладает достаточной прочностью и наибольшей способностью к деформационному упрочнению, что обеспечивает отсутствие разрушений поверхностного слоя до нагрузки 25 МПа.

Близкие значения износстойкости демонстрирует наплавка, выполненная электродами ОЗН-400М. При испытании образцов из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, имеющей мартенситную структуру с грубым дендритным строением, упрочненный слой не образуется из-за отсутствия способности к деформационному упрочнению наплавленного металла. Частичное выкрашивание кромок начинается уже при нагрузке 15 МПа, чему способствует в том числе наличие внутренних трещин по границам дендритов.

Максимальная интенсивность изнашивания наблюдается у образцов из наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ.

Это происходит из-за того, что у поверхности трения образцов из наплавки создается самый тонкий слой с измененной деформированной структурой и широкая область «подстройки». Несмотря на резкое упрочнение тонкого слоя с измененной структурой, масштабные разрушения поверхностного слоя начинаются уже при нагрузке 10 МПа.

Таким образом, все исследованные материалы деформируются и разрушаются при трении различным образом, что подтверждается проведенными исследованиями и согласуется с имеющимися литературными данными [9,10,14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования сравнительной износстойкости и способности к упрочнению при трении поверхностных слоев листового проката из стали марки Magstrong H500, наплавок с использованием электродов марки ОЗН-400М и проволоки Св-08Х16Н5М3АБ в паре с контртелом из стали Magstrong H500 показали следующее.

1. Листовой прокат стали марки Magstrong H500 и наплавка электродами ОЗН 400М обладают близкими характеристиками износстойкости. Наплавка сварочной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ обладает значительно меньшей износстойкостью по отношению к стали марки Magstrong H500 и электродам ОЗН-400М (в 4 и 3 раза соответственно).

2. Частичное выкрашивание кромок образцов из наплавок, выполненных электродами марки ОЗН-400М и проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ, испытанных в паре со сталью Magstrong H500, начинается при меньших нагрузках, чем при испытаниях пары Magstrong H500/Magstrong H500. Наиболее значительные задиры и отслоения образуются на поверхности образцов из наплавки, выполненной проволокой марки Св-08Х16Н5М3АБ, что может быть связано с более низкой твердостью исходного материала.

3. В процессе триботехнических испытаний на поверхностях трения листового проката из стали марки Magstrong H500 и образцов наплавки, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, формируется слой с измененной деформированной структурой, под которым расположена область «подстройки» с зернами, ориентированными в направлении скольжения контртела. Упрочнение поверхностного слоя наблюдается для листового проката стали Magstrong H500 (около 25 %) и наплавки проволокой Св-08Х16Н5М3АБ (около 50 %).

На образцах из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М, деформированная область у поверхности трения сосредоточена в узком слое глубиной ~20 — 50 мкм, при этом область структурной «подстройки» ниже деформированной области, то есть область зерен, ориентированных в направлении трения, отсутствует, упрочнения поверхностного слоя не происходит.

4. Наиболее высокая стойкость к изнашиванию образцов из стали марки Magstrong H500 объясняется тем, что исходная мартенситная структура листового проката обладает большей способностью к деформационному упрочнению.

В образцах из наплавки, выполненной электродами марки ОЗН-400М и имеющей мартенситную структуру с грубым дендритным строением, поверхностный слой с измененной структурой быстро разрушается, его упрочнения не происходит, при этом область «подстройки» не успевает формироваться.

Наиболее низкой износостойкостью обладают образцы с наплавкой, выполненной сварочной проволокой Св-08Х16Н5М3АБ, так как у поверхности трения создается самый тонкий слой с измененной деформированной структурой и широкая область «подстройки». Несмотря на резкое упрочнение тонкого слоя с измененной структурой, масштабные разрушения поверхностного слоя начинаются уже при нагрузке 10 МПа.

Металлографические исследования выполнены на оборудовании центра коллективного пользования «Состав, структура, свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрющенко М.И. Способность к самоупрочнению поверхности трения и износостойкость наплавленного металла в условиях абразивного изнашивания / М.И. Андрющенко, Р.А. Куликовский, С.П. Бережный, О.Б. Сопильняк // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. — 2009. — № 1. — С. 30 — 37.
2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. — Киев: Техника, 1970. — 396 с.
3. Попов В.С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко, П. Г. Приступа. — М.: Металлургия, 1978. — 232 с.
4. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. — М.: Машиностроение, 1991. — 144 с.
5. Малинов Л.С. Выбор состава хромомарганцевой стали с метастабильным аустенитом в качестве основы наплавочного материала / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.Я. Харланова, Т. В. Барышникова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 1994. — № 8. — С. 45 — 46.
6. Филиппов М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В.С. Литвинов, Ю.Р. Немировский. — М.: Металлургия, 1988. — 256 с.
7. Садовский В.Д. Остаточный аустенит в закаленной стали / В.Д. Садовский, Е.А. Фокина. — М.: Наука, 1986. — 113 с.
8. Батаев В.А. Образование ориентированных цементитных скоплений в деформированных углеродистых сталях / В.А. Батаев., А.А. Батаев., Л.И. Тушинский, Д.Е. Буторин // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2001. — № 5. — С. 5 — 7.
9. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. — М.: Машиностроение, 1991. — 208 с.
10. Буров С.В. Роль структуры поверхностных слоев в обеспечении износостойкости металлических материалов: автореф. дисс ... канд. техн. наук / С.В. Буров. — Новосибирск, 2007. — 20 с.
11. ГОСТ Р 50740-95. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общее положение.
12. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования.
13. СТО-07516250-151-2013. Оценки износостойкости пар трения. Методика.
14. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. II и III. Деформация / М.А. Штремель. — М.: МИСиС, 1997. — 527 с.

REFERENCES

1. Andrushchenko M.I., Kulikovskii R.A., Berezhnyi S.P., Sopil'nyak O.B. Sposobnost' k samouprochneniyu poverkhnosti treniya i iznosostoikost' naplavlennogo metalla v usloviyakh abrazivnogo iznashivaniya [The ability to self-strengthen the friction surface and wear resistance of the deposited metal under conditions of abrasive wear]. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii* [New Materials and Technologies in Engineering]. 2009. No. 1. P. 30 — 37.
2. Kostetskii B.I. Trenie, smazka i iznos v mashinakh [Friction, lubrication and wear in machines]. Kiev: Texnika, 1970. 396 p.
3. Popov V.S., Brykov N.N., Dmitrichenko N.S., Pristupa P.G. Dolgovechnost' oborudovaniya ogneupornogo proizvodstva [Durability of refractory production equipment]. — M.: Metallurgiya, 1978. 232 p.
4. Boitsov A.G., Mashkov V.N., Smolentsev V.A., Khorostukhin L.A. Uprochnenie poverkhnosti detalei kombinirovannymi sposobami [Hardening of detail surface by mixed method]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 144 p.
5. Malinov L.S., Cheilyakh A.P., Kharlanova E.Ya., Baryshnikova T.V. Vybor sostava khromomargantsevoi stali s metastabil'nym austenitom v kachestve osnovy naplavochnogo materiala [Selection of the composition of chromium-manganese steel with metastable austenite as the basis of the surfacing material]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 1994. No. 8. P. 45 — 46.
6. Filippov M.A., Litvinov V.S., Nemirovskii Yu.R. Stali s metastabil'nym austenitom [Steels with metastable austenite]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 256 p.
7. Sadovskii V.D., Fokina E.A. Ostatochnyi austenit v zakalennoi stali [Retained austenite in hardened steel]. Moscow: Nauka, 1986. 113 p.
8. Bataev V.A., Bataev A.A., Tushinskij L.I., Butorin D.E. Formation of oriented cementite congestion in strained carbon steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. No. 5. P. 5 — 7. (In Russ.)

9. Belyi A.V., Karpenko G.D., Myshkin N.K. Struktura i metody formirovaniya iznosostoikikh poverkhnostnykh sloev [Structure and methods of forming wear-resistant surface layers]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 208 p.
10. Burov S.V. Rol' strukturnykh poverkhnostnykh sloev v obespechenii iznosostoikosti metallicheskikh materialov [The role of the structure of surface layers in ensuring the wear resistance of metallic materials: PhD thesis]. Novosibirsk, 2007. 20 p.
11. GOST P 50740-95. Tribotekhnicheskie trebovaniya i pokazateli. Printsipy obespecheniya. Obshchee polozhenie [Tribotechnical requirements and indices. Principles of provision. General].
12. GOST 30480-97. Obespechenie iznosostoikosti izdelii. Metody ispytanii na iznosostoikost'. Obshchie trebovaniya [Products wear resistance assurance. Methods of wear resistance tests. General requirements].
13. STO-07516250-151-2013. Otsenki iznosostoikosti par treniya. Metodika [Estimates of wear resistance of friction pairs. Methodology].
14. Shtremel M.A. Prochnost' splavov [Strength of alloys. Parts II and III. Deformation]. Moscow: MISiS, 1997. 527 p.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.01
EDN VUUQGK

КОНЦЕПЦИЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЕКТА СУДНА НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

О.В. Таровик, канд. техн. наук, технический директор, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

А.В. Косоротов, инженер-кораблестроитель, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: andrey.kosorotov@bureauhyperborea.ru

М.О. Матаруев, инженер-кораблестроитель, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: mikhail.mataruev@bureauhyperborea.ru

А.А. Бахарев, руководитель отдела программной разработки, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: andrey.bakharev@bureauhyperborea.ru

А.Б. Крестьянцев, генеральный директор, ООО «Бюро Гиперборея», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511, e-mail: andrey.krestyantsev@bureauhyperborea.ru

В статье описана концепция создания цифрового двойника (ЦД) проекта судна на основе принципов параметризации, целостности, прямого расчета и моделирования эксплуатации судна в составе транспортной системы. Поясняется отличие подобной модели, предназначенной для использования на ранних стадиях проектирования, от цифрового двойника физического объекта (изделия). Практическая ценность ЦД проекта обусловлена возможностью его применения в качестве инструмента для выполнения всестороннего проектного анализа судов. Также такой подход имеет потенциал для того, чтобы в будущем перераста в отдельное направление развития теории проектирования судов. На основе представленной концепции ЦД был создан программный макет, который охватывает четыре типа судов ледового плавания: нефтеналивные танкеры, газовозы СПГ мембранныго типа, универсальные сухогрузы и ячейстые контейнеровозы. В макете ЦД учитываются характерные особенности ледовых судов, такие как форма корпуса, наличие концепции двойного действия, специфика нагрузки масс судна порожнем и др. В статье приводятся результаты комплексной верификации ЦД, а также примеры практического использования этой технологии в ходе нескольких исследовательских проектов. Описываются направления дальнейшего методического и технологического развития представленного подхода.

Ключевые слова: цифровой двойник проекта, судно ледового плавания, программное обеспечение, теория проектирования судов, расчетное проектирование.

Для цитирования: Таровик О.В. Концепция и программная реализация цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования / О.В. Таровик, А.В. Косоротов, М.О. Матаруев, А.А. Бахарев, А.Б. Крестьянцев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 137 — 155. — EDN VUUQGK.

CONCEPT AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A DIGITAL SIBLING OF A SHIP AT EARLY DESIGN STAGES

O.V. Tarovik, PhD, Technical Director, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

A.V. Kosorotov, Shipbuilding Engineer, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: andrey.kosorotov@bureauhyperborea.ru

M.O. Mataruev, Shipbuilding Engineer, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: mikhail.mataruev@bureauhyperborea.ru

A.A. Bakharev, Head of Software Development Department, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: andrey.bakharev@bureauhyperborea.ru

A.B. Krestyantsev, General Director, Bureau Hyperborea LLC, 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, pom. 511, e-mail: andrey.krestyantsev@bureauhyperborea.ru

The article presents a concept of developing a digital twin (DT) of a ship at early design stages based on the principles of parameterization, integrity, direct design and modeling of ship operation in a transport system. Difference between such a model, intended for the conceptual design, and a digital twin of a product is described. The practical value of such a project-level DT is due to the possibility of its use as a tool for comprehensive project analysis of ice-going ships. Also, this approach has the potential to develop into a separate branch of ship design theory in the future. Based on the presented concept a project-level DT, a software tool was developed that covers four types of ice-going ships, such as the oil tankers, membrane-type LNG carriers, general-purpose dry cargo ships and cellular container ships. DT takes into account the characteristic features of the ice class: hull shape, presence of the double-acting concept, specifics of the light weight distribution and other factors. The article contains the results of a comprehensive verification of the developed DT, as well as the examples of its practical use during several research projects. Ideas for further methodological and technological development of the presented approach are also described in the article.

Key words: *digital sibling, ice-going ship; software; ship design theory; computational design.*

For citation: Tarovik O.V., Kosorotov A.V., Mataruev M.O., Bakharev A.A., Krestyantsev A.B. Concept and software implementation of a digital sibling of a ship at early design stages. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 137 — 155. EDN VUUQGK. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Сфера интересов российского судостроения неуклонно смещается в стратегически важную арктическую зону, для освоения которой требуются наиболее технологически сложные и во многом уникальные суда. Это является одновременно и вызовом, и окном возможностей для отечественной индустрии, которая вынуждена создавать новые производственные мощности и замещать импортное оборудование в сложных геополитических условиях.

Помимо непростой ситуации в производственной сфере, в настоящее время некоторая инертность наблюдается и в области раннего проектирования судов. Известно, что ранние этапы проектирования посвящены формированию принципиального облика судна и его оптимизации в составе транспортной системы, что исключительно важно с точки зрения будущей эффективности всего проекта. Поэтому соответствующие разработки являются актуальными, а развитие арктического судостроения подразумевает также и развитие методов раннего проектирования судов.

Настоящая статья развивает идеи, изложенные в [1], и предлагает возможное направление для дальнейшего развития теории и практики раннего проектирования, связанное с созданием цифрового двойника (ЦД) проекта судна. Основное прикладное значение такого ЦД заключается в возможности обоснованного формирования технических требований к судну за счет моделирования как его внутренней структуры, так и функционирования в составе морской транспортной системы (МТС). Традиционно эта задача находится на стыке между заказчиком и конструкторским бюро — проектантом и включает детальный проектный анализ и всестороннюю оптимизацию судна. Практический опыт показывает, что эта сфера является своеобразным «слабым звеном» в процессе создания современного арктического транспортного флота и нуждается в соответствующем усилении.

Дальнейшее изложение концепции и программной реализации цифрового двойника проекта судна на ранних стадиях проектирования производится в следующем порядке. В разделе 1 приводится описание термина «цифровой двойник проекта» и поясняется его отличие от традиционного цифрового двойника физического объекта. Раздел 2 посвящен описанию принципов реализации ЦД в проектной сфере, которые

были положены в основу созданного программного макета. Детали реализации ЦД приведены в разделе 3, а в разделе 4 внимание уделено важному вопросу точности получаемых проектных оценок. Примеры практического использования макета ЦД обсуждаются в разделе 5. В заключении оцениваются перспективы внедрения этой технологии и приводится ряд заключительных положений.

1. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРОЕКТА СУДНА

Цифровой двойник (ЦД) (digital twin) физического объекта является одной из ключевых технологий Индустрии 4.0 [2]. Он представляет собой некую виртуальную сущность, которая двунаправленно связана с описываемым ею реальным объектом и позволяет моделировать и оптимизировать работу такого объекта в цифровой среде. Изменения в ЦД автоматически отражают изменения в реальной системе и одновременно могут инициировать их, если последнее предусмотрено функционалом цифрового двойника. Некоторую классификацию ЦД по характеру взаимодействия с реальным объектом можно найти в [3], где также описываются другие имеющиеся в литературе варианты названия подобных цифровых сущностей: продуктовый аватар (product avatar), виртуальный двойник (virtual twin), цифровая тень (digital shadow), цифровой суррогат (digital surrogate). Цифровые двойники сложных технических систем широко используются в разнообразных областях техники, однако в судостроении и судоходстве эта технология распространена очень ограниченно — порядка 3 — 4 % от общего числа всех работ, согласно данным [3].

Помимо описания реального физического объекта, технологии цифрового дублирования могут также применяться и на этапе проектирования, когда реального объекта еще не существует. Как было отмечено в [1], подобная цифровая сущность может быть очень важна в случае применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в сфере проектного анализа, поскольку с помощью ЦД проекта ИИ-модель может отслеживать то, как изменения различных характеристик проекта влияют на весь комплекс многочисленных проектных показателей. Важно отметить, что подобные технологии находятся на этапе раннего развития, поэтому в настоящее время не существует общепринятого определения ЦД проекта, а число примеров реализации в области проектирования очень ограничено (см., например, [4] и [5]). Для обозначения некоего упрощенного цифрового двойника судна на этапе проектирования в ряде работ применяется термин «цифровой близнец» (digital sibling) [6], который отражает тот факт, что сходство цифровой сущности и проектируемого объекта нельзя напрямую экстраполировать на реальный физический объект. Несмотря на то, что ЦД судна на этапе проектирования описывает не построенное судно, а лишь его некий виртуальный образ, в зарубежной литературе такую проектную сущность также принято именовать «цифровым двойником». По нашему мнению, для описания модели судна на этапе проектирования более корректно было бы использовать иной термин, например «цифровая модель проекта», однако в соответствии с зарубежной практикой и для простоты мы все же будем использовать обобщенный термин «цифровой двойник проекта», поскольку различия между указанными наименованиями не столь важны для дальнейшего изложения.

Очевидно, что ЦД для разных стадий жизненного цикла судна будут существенно различаться, что обусловлено кардинальным отличием процессов, сопровождающих проектирование технического объекта (особенно на концептуальной стадии), от процессов, происходящих при его эксплуатации. В частности, типичные процессы на этапе эксплуатации судна можно обозначить как «регламентное обслуживание», «диагностика подсистем», «экономия топлива», «обеспечение безопасности» и др. Тогда как на этапах проектирования соответствующие определения будут звучать как, например, «оптимизация обводов», «формирование общего расположения», «вычисление нагрузки масс», «расчеты посадки и остойчивости», «проектирование гребного винта» и т.п. Для описания разных процессов требуется применение принципиально разных технологий и прикладных инструментов, что подтверждает существенную разницу между ЦД реального объекта и ЦД проекта, а также делает возможным самостоятельное развитие последнего направления. В работе [7] высказывается мнение о том, что прикладные решения на основе ЦД имеют потенциал для того, чтобы в будущем стать одной из базовых технологий проектного анализа. Таким образом, можно сказать, что ЦД проекта судна имеет значительные перспективы дальнейшего развития в соответствии с глобальными индустриальными трендами, а работы по созданию соответствующих программных решений можно признать актуальными.

2. ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Прикладной цифровой двойник проекта судна может быть реализован на основе четырех базовых принципов:

- параметризация,
- прямой расчет,
- целостность,
- моделирование эксплуатации.

Параметризация при создании ЦД должна носить всеобъемлющий характер и затрагивать всю иерархию внутренних объектов модели, включая главные размерения, детали формы обводов, общее расположение, геометрию судовых пространств (грузовые, балластные и топливные танки), основное оборудование, основные конструкции корпуса, варианты общепроектных решений (ледовый класс, тип движительного комплекса, тип люковых закрытий, варианты системы хранения груза и т.п.). Основными целями параметризации являются максимальное расширение области поиска рациональных проектных решений, а также обеспечение удобства управления ЦД в целом за счет иерархической структурированности параметров. Параметризация может обеспечиваться как непрерывными переменными, которые могут изменяться в определенном интервале, так и наборами дискретных значений (например, категория прочности стали или модельный ряд двигателей). Основная сложность параметризации заключается не только в необходимости управления любым элементом модели на всех уровнях иерархии, но и в обеспечении взаимосвязи взаимозависимых параметров, а также реализации расчетных процедур, адекватно моделирующих реакцию всего ЦД на происходящие изменения. Отдельной большой задачей является определение комплекса значений параметров «по умолчанию», в особенности для параметров нижнего иерархического уровня, которые должны автоматически пересчитываться при изменении вышестоящих значений. Таким образом, полная параметризация должна позволять пользователю изменять и только основные параметры (в этом случае все прочие параметры нижних иерархических уровней принимаются по умолчанию на основе неких усредненных зависимостей), и все или часть параметров нижних иерархических уровней в разрешенных для них диапазонах значений.

Прямой расчет — это концепция построения проектной модели судна, согласно которой на вход модели в явном виде подаются все необходимые параметры, а далее выполняется прямой расчетный анализ того, каким будет соответствующий вариант судна и удовлетворяет ли он всем проектным ограничениям [8]. Поиск окончательного варианта судна при таком подходе предполагает наличие итерационного процесса, в ходе которого человеком-оператором (или ИИ-моделью) выполняются последовательные численные эксперименты и подбираются такие значения входных параметров, при которых все прочие характеристики судна соответствуют требуемым или достигают оптимума. Существенной частью этой концепции является то, что все внутренние проектные параметры определяются преимущественно расчетным образом, а не на основе приблизительных эмпирических соотношений, что должно обеспечивать высокую степень достоверности получаемых результатов. То есть число приближенных формул при создании ЦД следует последовательно минимизировать. Применение концепции прямого расчета очень удобно с точки зрения компьютерной интерпретации процесса проектирования, так как не требует организации логически-сложного алгоритма проектирования судна под заданные параметры, а сводит работу проектной модели к единичному ответу на вопрос «что будет, если...?». Основной задачей при реализации такого подхода является организация вычислительной архитектуры модели, поскольку в момент выполнения каждого локального расчета в системе должны присутствовать все необходимые входные данные. Кроме того, прямое расчетное моделирование возможно только при достаточном уровне детализации информационной модели судна в целом, в которой должны явно присутствовать такие элементы, как модель поверхности, геометрия грузовых пространств и балластных танков, основное оборудование, а также такие проектные сущности, как гидростатические параметры, нагрузка масс, посадка и остойчивость, ходовые качества и т.п. Как показывает наш опыт, требования по относительно высокой детализации ЦД на ранних этапах проектирования не вступают в неразрешимые противоречия с вычислительными возможностями современной компьютерной техники.

Целостность цифрового двойника заключается в равномерном учете всех общесудовых качеств проектируемого судна, что, однако, не исключает возможности более детального рассмотрения отдельных актуальных аспектов. Целостный подход необходим по той причине, что различные изменения внутренних параметров судна могут влиять на совершенно разные интегральные показатели, адекватная оценка которых обеспечивает объективность проектного анализа. Напротив, отсутствие целостного подхода может приводить к однобоким проектам или упущению важных проектных аспектов. Прикладное применение принципа

целостности говорит о том, что в модели судна должны анализироваться грузовместимость, ходкость, удифферентовка, непотопляемость, строительная стоимость, энергоэффективность и другие важнейшие группы технико-эксплуатационных и проектных показателей. Также желательно обеспечивать приблизительно одинаковый уровень детализации ЦД по основным общесудовым направлениям, при этом некоторые локальные аспекты (например, ледовые нагрузки на корпус) могут быть рассмотрены более детально.

Модель эксплуатации в составе ЦД дает возможность оценить влияние любых изменений судна на показатели его функционирования во внешней среде. Сложность этого направления заключается во многообразии факторов и процессов, которые нужно рассматривать в каждом конкретном случае, а также в невозможности создания универсальной модели эксплуатации. Иногда возможно применение достаточно простых моделей аналитического типа, однако в большинстве практических случаев необходимо создание детальных имитационных моделей работы всей МТС [9]. Аналитические модели могут отражать изменение показателей судна в режиме «на лету» и поддерживать возможность оптимизации характеристик проекта с помощью формальных алгоритмов, тогда как детальные модели эксплуатации приходится отделять от модели судна и применять вариантную схему поиска наилучшего решения. Также следует отметить, что поиск наилучших локальных параметров судна зачастую может выполняться вне контекста работы судна в составе МТС. Например, оптимизация конструкций корпуса обычно производится по критерию массы при условии соблюдения технологических ограничений, проектирование формы обводов можно выполнять по критерию сопротивления на чистой воде или во льдах, соблюдая ограничения на интегральные гидростатические параметры корпуса. Если в результате такого локально-оптимизационного подхода появляются варианты, которые требуют рассмотрения на уровне всей МТС, то они могут быть исследованы на вариантной основе. Отметим, подробное описание практической реализации модели эксплуатации судна в составе ЦД выходит за рамки настоящей статьи, поэтому предлагаем заинтересованному читателю ознакомиться с посвященной этому вопросу работой [9].

Реализация описанных выше принципов построения ЦД проекта судна может быть очень различной, как в части базовых решений по программной архитектуре и общей детализации модели, так и в части применяемых программных технологий и специализированных прикладных инструментов. Далее описан опыт авторов по реализации проектных ЦД судов ледового плавания, который был получен в ходе нескольких работ по исследованию систем арктического морского транспорта. Роль ЦД в этих проектах сводилась к формированию вариантных рядов транспортных судов, которые затем анализировались с помощью детализированных имитационных моделей МТС [10].

3. ПРОГРАММНЫЙ МАКЕТ

Текущая версия цифрового двойника проекта судна — это исследовательское приложение уровня программного макета, созданное авторами для подтверждения реализуемости всей концепции, а также для решения тестовых задач. Приложение реализовано на платформе .NET Framework 6.0 с применением стандартных интерфейсных компонентов WPF. При разработке приняты следующие упрощения, которые могут быть существенно переработаны в дальнейшем.

1. ЦД формируется на общих принципах, но адаптируется под каждый сложившийся тип транспортного судна, которых предусмотрено четыре: нефтеналивные танкеры, газовозы СПГ мембранных типа, универсальные сухогрузы и ячеистые контейнеровозы. Создание универсального конфигурируемого ЦД, который не будет жестко привязан к типу судна, возможно, однако это влечет за собой существенное увеличение сложности разработки.

2. Рассматриваются только суда ледового плавания с наклонной формой форштевня, значительное внимание уделяется специализированным ледовым аспектам. В будущем ЦД может быть расширен в направлении традиционных неледовых судов и характерной для них проблематики повышения энергоэффективности при движении по чистой воде.

3. В текущей версии не реализован анализ некоторых аспектов судна, таких как оценка строительной стоимости, расчет непотопляемости и ряд других, что в дальнейшем может быть откорректировано для обеспечения целостности модели.

4. Практически все внутренние (локальные) параметры судна задаются по умолчанию и не могут быть изменены явно, например объем жилой надстройки, диаметр гребного винта и др. Для определения таких значений используются статистические данные по построенным судам. Однако при необходимости соответствующие сущности могут быть детализированы, параметризованы и интегрированы с модулями прямого расчета.

5. Возможности параметрического управления охватывают только форму корпуса и основные проектные характеристики судна. При этом архитектура приложения предусматривает дальнейшую реализацию функционала по управлению, например, положением поперечных переборок, топологией корпусных конструкций, характеристиками оборудования, а также множеством других аспектов.

6. Модель эксплуатации в составе макета ЦД в текущей версии не реализована. Предполагается использование отдельного внешнего приложения — детализированной модели МТС, создаваемой в одной из высокочувствительных сред имитационного моделирования [11].

Принципиальная логическая схема вычислительного процесса макета ЦД, реализующего концепцию прямого расчета, приведена на рис. 1 применительно к танкерам и судам-газовозам СПГ. Напомним, что важными условиями реализации концепции прямого проектирования является автоматическое выполнение всех расчетов, а также наличие на каждом этапе вычислений всех необходимых для этого входных данных. Представленная последовательность вычислительных процессов удовлетворяет этим требованиям.



Рис. 1. Общая схема вычислительного процесса ЦД проекта судна

В начале вычислительного процесса, в блоке ①, задаются (или читаются из внешнего файла) входные данные — информационная модель судна, которая содержит полный перечень параметров, однозначно характеризующих судно и позволяющих выполнять дальнейшие расчеты. В текущей версии такими параметрами являются:

- параметры корпуса судна — определяют главные размерения и судовую поверхность;
- ледовый класс судна;
- мощность на валах и число гребных винтов;
- дальность плавания и доля мощности на проектной скорости;
- наличие у судна опции двойного действия — если да, то применяются ВРК, если нет, то используются традиционные валы;
- тип энергетической установки — малооборотный дизель с прямой передачей на валы, дизель-электрическая установка (ДЭЭУ), атомная установка, двухтопливные двигатели;
- расчетная плотность груза (или масса стандартного контейнера);
- срок службы корпусных конструкций судна и средний предел текучести конструкционной стали;
- число грузовых трюмов по длине корпуса;
- параметры общего расположения — коэффициенты высоты двойного дна, ширины двойного борта, высоты сколового скоса, длины грузовой зоны и машинного отделения и т.п.;
- специализированные параметры для каждого типа судна, моделирующие проектные альтернативы, например варианты системы хранения СПГ или вид люковых закрытий контейнерных трюмов.

Далее в блоке ② выполняется генерация теоретического чертежа по заданным параметрам информационной модели. Для описания судовой поверхности в текущей версии ЦД используется специализированная аналитическая модель корпуса судна ледового плавания [12], в которой содержится около 100 управляющих параметров. Пользовательский интерфейс для работы с формой корпуса в носовой и кормовой оконечностях показан на рис. 2. Отметим, что в текущей версии ЦД модель поверхности является единственным полностью параметризованным элементом. Для каждого управляющего параметра заданы его максимальное и минимальное значения, которые являются функциями от других параметров. Для организации вычислительного процесса была составлена матрица взаимовлияния всех параметров и сформирован такой алгоритм пересчета их значений при изменениях, который исключает необходимость итерационных процедур. Однако вопрос практической параметризации в САПР-системах является достаточно важным, требует отдельного рассмотрения и предполагает несколько различных вариантов решения [13]. Также отметим, что дальнейшая промышленная реализация ЦД подразумевает использование универсальных параметрических NURBS-моделей судовой поверхности.

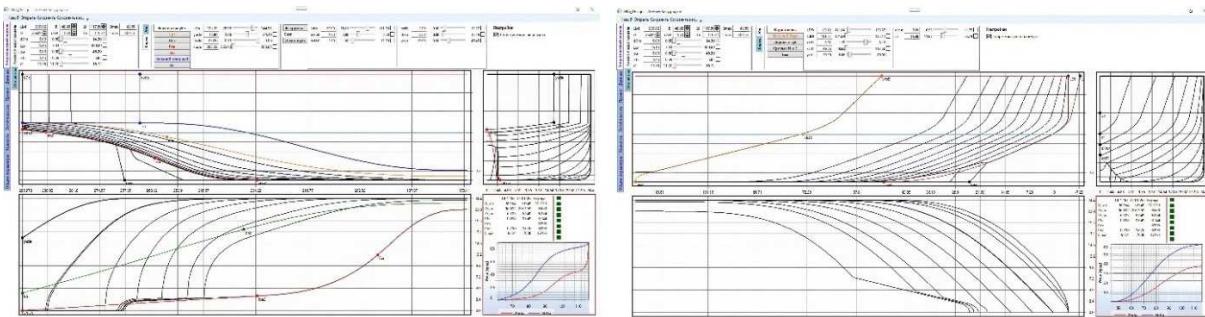


Рис. 2. Пользовательский интерфейс параметрического управления обводами корпуса судна

В блоке ③ выполняется комплекс общепроектных расчетов, в ходе которых на основе статистических данных по построенным судам определяются значения по умолчанию для различных внутренних непараметризованных элементов судна. Исходными данными для расчетов являются параметры информационной модели судна. В этом блоке выполняется расчет диаметра гребных винтов, оценивается электронагрузка на судовые потребители, определяется механическая мощность энергетической установки, производятся расчеты мощности и числа подруливающих устройств, оцениваются размеры жилой надстройки, а также ряда других проектных параметров судна. Для обеспечения таких расчетов по каждому типу судов была собрана представительная статистическая выборка (не менее 50 проектов), которая содержит детальное описание основных характеристики, общего расположения, энергетической установки, грузового оборудования и других важнейших элементов (в общей сложности 80 — 120 параметров по каждому проекту). Основой для формирования выборки послужило издание «Significant Ships» за период 1996 — 2021 годов,

поскольку в нем имеются схемы общего расположения, которые могут быть использованы для оценки необходимых параметров компоновки судна. Дополнительно к этому учитывалась информация специализированных интернет-порталов, а также имеющаяся детальная информация по отдельным проектам судов. Итоговая наполненность статистических выборок достаточно высока и составляет около 95 %. Для обеспечения объективности проектного анализа, в выборку включалось только по одному экземпляру судна каждого проекта. Важно отметить, что наличие статистических данных позволяет оценивать не только среднее значение нужного параметра, но и границы его возможного изменения, которые могут быть представлены в виде функций от других параметров судна. Это использовалось нами при параметризации некоторых судовых элементов в текущей версии ЦД. Например, коэффициент ширины двойного борта изменяется от 0 до 1, где 0 соответствует минимальному статистическому значению (или нормативному ограничению), а 1 — максимальному.

На четвертом ④ шаге формируется схема общего расположения: определяются длины отсеков, устанавливаются водонепроницаемые переборки, формируется двойной борт, двойное дно, определяются районы размещения топливных и балластных танков. Расчеты в этом блоке выполняются с учетом как статистических данных, так и управляющих параметров общего расположения, заданных в информационном описании судна. Расстановка переборок производится в итерационном алгоритме, задачей которого является обеспечение статистически обусловленных объемов машинного отделения, ахтерпика, форпика и помещения подруливающих устройств, при соблюдении ограничений на длины грузовых трюмов. Дальнейшее развитие алгоритмов формирования общего расположения возможно в направлении сокращения количества статистических оценок, замены их прямым моделированием размещения основного оборудования и различных помещений, а также выполнением расчетов непотопляемости и аварийной остойчивости.

Известная схема общего расположения судна позволяет далее сгенерировать геометрию грузовых и балластных танков и точно определить вместимость судна (блок ⑤). Геометрия отсеков строится на основе специальных алгоритмов, которые учитывают как технологические ограничения (например, запрет на формирование поверхностей с двойной кривизной), так и фактические обводы корпуса (отстояние обшивки танка от наружной обшивки). В цифровом двойнике контейнерных судов грузовые трюмы формируются с учетом размеров стандартного блока контейнеров и сложной геометрии обводов судна в оконечностях. Пример сгенерированной схемы общего расположения одного из вариантов газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 приведен на рис. 3. Зеленым и синим цветом на схеме показано расположение балластных отсеков и состояние их заполнения (зеленый — пустой, синий — заполненный). Принципиальная схема расположения балластных танков принималась фиксированной и соответствующей компоновке построенных судов. Размещение танка СПГ для судов с двухтопливной энергетической установкой возможно либо на верхней палубе (танк типа С), либо внутри корпуса (мембранный танк).

Блок ⑥ является объемным, однако носит технический характер и позволяет сформировать необходимые данные для дальнейшего расчета посадки и остойчивости судна с использованием расчетных библиотек из системы «Диалог-статика». Интеграция с внешними расчетными библиотеками целесообразна для снижения сложности создания ЦД и удешевления основного внимания сущностной части модели, а не программной реализации стандартных инженерных процедур.

После формирования схемы общего расположения производится расчет нагрузки масс судна порожнем. Этот расчет производится комбинированным способом. Наиболее ответственная составляющая нагрузки — масса металлического корпуса, на которую приходится до 70 — 80 % массы судна порожнем, — определяется в специальном модуле (блок ⑦) путем прямого проектирования конструкций центрального отсека по требованиям Правил РС к местной и общей прочности, а также прочности при скручивании (контейнерные суда). Далее масса центрального отсека распространяется на весь корпус по методике [14]. Отметим, что в текущей версии ЦД все параметры топологии конструкций определяются по умолчанию на основе правил, норм и данных прототипов, при этом топология конструкций является одним из возможных направлений для дальнейшей параметризации. Оценка массы конструкций ледовых усилий производится с помощью специализированной методики, изложенной в [15] и позволяющей учитывать особенности формы корпуса судна. Отметим, что наилучшее соответствие натурным данным достигается, если в методике [15] расчетный предел прочности конструкций принимается равным 255 МПа. Массы прочих составляющих нагрузки порожнем определяются в блоке ⑧ на основе статистических данных и расчетов по укрупненным элементам. Для каждой составляющей нагрузки масс вычисляется положение центра масс, что позволяет далее определить положение центра тяжести всего судна. В составе нагрузки масс предусмотрен запас водоизмещения и остойчивости, а также учтены некоторые составляющие, которые не учитываются при оценке строительной стоимости (воздух в корпусе и постоянные жидкие грузы). Пример расчета нагрузки масс для газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 приведен на рис. 4.

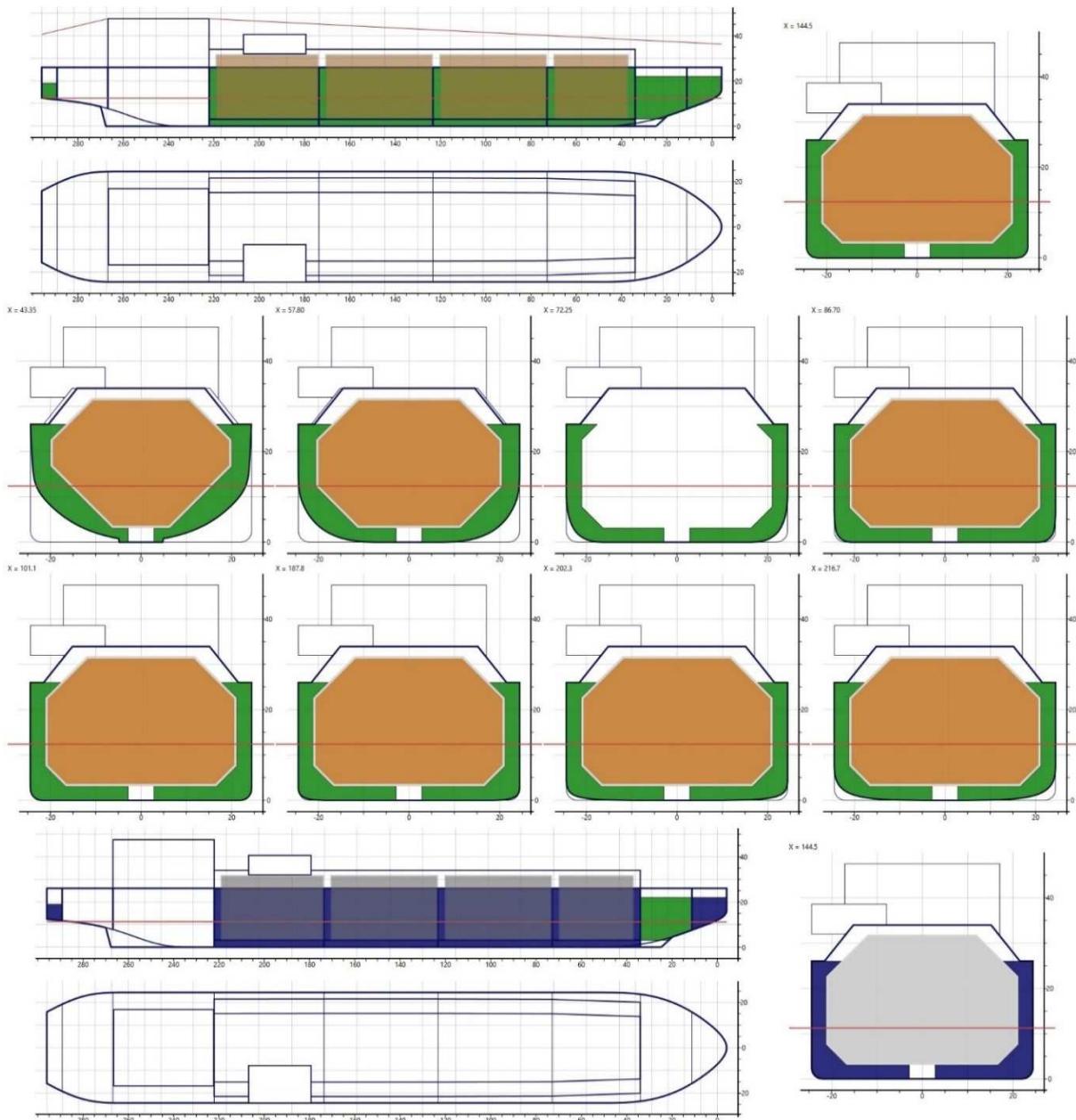


Рис. 3. Схема общего расположения газовоза СПГ с ледовым классом Arc7 при полной загрузке (сверху) и в балласте (снизу). В центре показаны промежуточные поперечные сечения корпуса

В следующем расчетном блоке ⑨ оценивается ходкость судна на чистой воде и во льдах, включая (а) построение кривой буксировочного сопротивления судна на чистой воде с помощью методики [16], которая показала наилучшее совпадение с натурными данными при применении понижающего коэффициента 0,87; (б) оценку коэффициентов взаимодействия винта с корпусом судна на основе эмпирических зависимостей; (в) подбор гребного винта с использованием результатов серийных испытаний [17]; (г) вычисление тяги на швартовном режиме; (д) определение ледопроходимости судна в ходе расчета ледового сопротивления с использованием нескольких полуземпирических методов.

Информация о ходовых качествах, а также все прочие данные, полученные на данном этапе расчетов, позволяют выполнить расчет дедвейта судна в блоке ⑩. В составе дедвейта выделены четыре базовые составляющие: перевозимый груз, запасы дизельных топлив, запасы топливного СПГ (для двухтопливных ЭУ) и все прочее (экипаж, провизия, пресная вода и др.).

Наименование	Масса (т)	Абсцисса	Аппликата
Металлический корпус			
Основной металлический корпус без надстроек	25533	151.9	14.8
Конструкции надстроек	1957	289.1	36.8
Конструкции компрессорной	150	237.8	37.3
Ледовые усиления	5701	144.5	9.4
Оборудование корпуса			
Мембранные системы хранения груза	3681	128.7	16.6
Грузовые системы и оборудование СПГ	706	137.5	33.7
Общесудовые системы	349	158.1	10.8
Якорное и швартовное устройства	349	78.9	19.9
Подрулывающие устройства	17	22.6	7.8
Дельные вещи	791	111.3	27.8
Покрытия, изоляция и окраска	442	178.3	20.2
Прочее оборудование корпуса	186	235.6	29.7
Двигательный комплекс			
Двигатели типа 'Азилод'	1394	294.6	11.7
Дизель-электрическая энергетическая установка на основе СОД			
Главные ДГ на раме с основным оборудованием	1025	244.4	15.6
Аварийный ДГ	0	253.4	31.0
Преобразователи частоты ГЭД	204	253.4	23.4
Трансформаторы ГЭД	225	253.4	23.4
ГРЩ, АРЩ и другие щиты	24	253.4	23.4
Силовой кабель	288	266.8	23.4
Крепления и дополнительные устройства передачи электроэнергии	394	222.1	26.0
Системы и оборудование ЭУ	1250	244.4	18.2
Дополнительные составляющие, не влияющие на строительную стоимость			
Воздух в корпусе	136	144.5	15.6
Запас водоизмещения и остойчивости	900	144.5	20.8
Постоянные жидкие грузы	500	193.6	6.2
Водоизмещение порожнем	46202	165.8	16.2

Рис. 4. Нагрузка масс порожнем газовоза СПГ с ледовым классом Arc7

Расчет посадки и оценка параметров остойчивости судна производится во внешнем блоке ⑪, созданном на основе расчетных библиотек системы «Диалог-статистика». Расчеты выполняются для двух-трех характерных состояний загрузки судна, выбранных на этапе создания ЦД.

Проверка остойчивости является последним расчетным процессом, после которого в блоке ⑫ для рассматриваемого варианта судна записываются полученные результаты. Сохранение результатов возможно в любом необходимом формате и с любой степенью детализированности. Сейчас это просто сводная текстовая таблица, в которой подробные данные по всем анализируемым параметрам судна сгруппированы по разделам — см. рис. 5.

Блок ⑬ посвящен постпроцессорному анализу результатов проектирования (см. рис. 6). На этом этапе полученные характеристики судна сопоставляются с данными по построенным неледовым судам из статистической выборки, что позволяет оценить особенности полученного варианта и выбрать направление для дальнейших проектных итераций. Помимо этого, выполняется прямой расчет различных нормативных параметров, которые могут быть сопоставлены с характеристиками проекта. Например, проверяются требования о минимальной мощности на валах (по требованиям Правил Регистра), анализируется фактическая и требуемая высота борта (согласно правилам о грузовой марке) и т.п.

Если проектный облик судна не соответствует желаемому или не выполняются какие-либо ограничения, то пользователь-проектант выполняет корректировку главных размерений корпуса судна, формы обводов или других проектных параметров, и запускает очередную итерацию модели. Отметим, что единичный цикл выполнения расчетов на стандартном офисном компьютере занимает порядка двух секунд, поэтому итерационный процесс может выполняться достаточно динамично.

Таким образом, реализованный макет ЦД проекта судна выполняет основную задачу этой технологии — позволяет однозначно оценить влияние изменений в информационной модели судна на его интегральные проектные характеристики.

Значение	Ед. изм.	Наименование
1. Основные характеристики		
1.1 Основные параметры		
1.2 Вместимость и запасы		
172356	м3	Суммарная вместимость грузовых танков (100%)
28646	м3	Вместимость (100%) 1отсек
48437	м3	Вместимость (100%) 2отсек
48670	м3	Вместимость (100%) 3отсек
46602	м3	Вместимость (100%) 4отсек
1.2.1 Грузовые танки (100%)		
69081	м3	Суммарная вместимость балластных танков (100%)
12455	м3	1отсек Бортовой Р/С
15907	м3	2отсек Бортовой Р/С
15947	м3	3отсек Бортовой Р/С
14808	м3	4отсек Бортовой Р/С
2078	м3	Форпик Танк Р/С
8128	м3	Носовые ПУ Танк Р/С
1485	м3	Ахтерпик Танк Р/С
1.2.2 Балластные танки (100%)		
8640	м3	Цистерны запасов тяжелого и дизельного топлива
740	м3	Танки пресной воды
360	м3	Цистерны машинного масла
1.2.3 Прочие танки и цистерны (100%)		
1.3 Параметры формы корпуса при проектной осадке		
1.4 Ходовые качества судна на проектной осадке		
21.0	узл	Максимальная скорость на тихой воде
1.64	м	Предельная ледопроходимость на переднем ходу
2.11	м	Предельная ледопроходимость на заднем ходу
16410	кВт	Мощность на валах на скорости 16 узл
101.4	т/с/т	Расход топлива на скорости 16 узл
2. Энергетическая установка и движительный комплекс		
3. Посадка и остойчивость в различных состояниях загрузки		
3.1 Судно в грузу (100% запасов)		
3.2 Судно в балласте (100% запасов)		
4. Нагрузка масс судна порожнем		
4.1 Металлический корпус		
4.2 Оборудование корпуса		
4.3 Двигательный комплекс		
4.4 Дизель-электрическая энергетическая установка на основе СОД		
4.5 Дополнительные составляющие, не влияющие на строительную стоимость		
4.6 Водоизмещение порожнем		
5. Общее расположение		
5.1 Конфигурация продольного расположения		
5.2 Конфигурация мидель-шпангоута		

Рис. 5. Сводная таблица результирующих параметров судна

Параметр	Ед.изм	Проект	Среднее	Мин	Макс
1 Нормативные параметры					
Минимальная мощность на валах по РС (2023)	кВт	45 000		39 328	
2 Статистические параметры					
Количество грузовых танков от Q, Lwl и LBD	-	4.0	4.0		
Грузовместимость Q (100%) от объема корпуса	м3	172 356	187 570	179 050	197 520
Дедвейт летний от Q	т	88 907	93 680	84 450	101 350
Водоизмещение порожнем от LBD	т	46 202	36 700	34 570	38 770
Мощность на валах от Lwl	кВт	45 000	27 020	21 790	30 510
Проектная осадка в функции от Q	м	11.70	11.64	11.24	11.99
Суммарная вместимость танков HFO, MDO и MGO от LBD	м3	6 980	6 500		
Объем балластных танков в функции от объема корпуса	м	69 081	65 837	63 032	69 335
3 Соотношения главных размерений (судно в грузу)					
Отношение L/B в функции от Q	-	6.08	6.22	5.85	6.55
Отношение B/d в функции от Q	-	3.93	3.64	3.39	3.89
Отношение L/D в функции от Q	-	11.41	10.88	10.56	11.26
Отношение B/D в функции от Q	-	1.88	1.74	1.69	1.83
4 Главные размерения (судно в грузу)					
Длина по ватерлинии в функции от Q	м	296.7	287.7	280.2	295.2
Ширина по ватерлинии в функции от Q	м	48.8	46.2	44.8	47.4
Высота борта на миделе в функции от Q	м	26.0	26.4	25.8	27.0
Осадка в грузу на миделе в функции от Q	м	12.41	12.57	12.07	13.07
Коэффициент общей полноты в функции от Q	-	0.734	0.734	0.709	0.759

Рис. 6. Сопоставление варианта газовоза с ледовым классом Arc7 с данными по построенным неледовым судам

4. ВЕРИФИКАЦИЯ

Одной из важных прикладных целей создания ЦД является повышение точности проектных оценок при сокращении затрат времени на их получение. Поэтому верификация ЦД является важным этапом разработки, на котором можно оценить характерный разброс результирующих показателей модели. Идея верификации достаточно проста: на вход ЦД подается информационное описание судна, которое соответствует некоему реальному проекту, а получаемые расчетные интегральные характеристики судна сопоставляются с фактическими. Отметим, что в будущем такой способ воспроизведения реального объекта в ЦД может быть использован не только для верификации, но и для обучения ИИ-модели стандартной проектной практике, т.е. наиболее типичным сочетаниям проектных параметров.

Для верификации были отобраны такие результирующие параметры, которые определяются не напрямую, а являются продуктом взаимодействия различных расчетных блоков. В качестве таких интегральных показателей были выбраны: летний дедвейт; грузовместимость; вместимость по балласту; механическая мощность ДЭУ, ледопроходимость носом вперед и кормой вперед; достижимая скорость на чистой воде; водоизмещение судна порожнем; аппликата и абсцисса центра тяжести (ЦТ) судна порожнем; метацентрическая высота судна в грузу. Например, водоизмещение и ЦТ судна порожнем определяются в результате расчета нагрузки масс по всем составляющим, а этот расчет, в свою очередь, опирается на данные о форме корпуса и общем расположении. Аналогично дело обстоит с вместимостью и дедвейтом, за значениями которых стоит моделирование общего расположения, формирование геометрии грузовых танков, оценка остойчивости и другие факторы. Вместимость балластных цистерн наряду с грузовместимостью отражает то, насколько рационально используются пространства внутри корпуса судна для размещения груза и балласта. Значения ледопроходимости и скорости хода иллюстрируют корректность расчета сопротивлений, подбора гребных винтов и расчетов тяги.

Верификация выполнялась на основе данных по построенным современным судам, среди которых пять нефтяных танкеров («Енисей» класс Arc7; «Штурман Альбанов» класс Arc7; «Василий Динков» класс Arc6; «Кирилл Лавров» класс Arc6; «Mastera» класс Arc4), три газовоза СПГ мембранных типа («Алексей Косыгин» класс Arc7; «Кристоф де Маржери» класс Arc7; проект GTT номер G006 без ледового класса) и один универсальный сухогруз («Норильский Никель» класс Arc7). Большинство данных по этим судам, которые необходимы для формирования информационной модели, были известны, однако некоторые недостающие параметры оценивались приближенно. В основном это касалось формы обводов корпуса. Результаты верификации приведены в сводной табл. 1.

Как видно, относительное стандартное отклонение по большинству параметров не превышает 2 — 5 %. К таким параметрам относятся грузовместимость, дедвейт, вместимость по балласту, достижимая скорость на чистой воде, абсцисса ЦТ судна порожнем и, что немаловажно, водоизмещение судна порожнем. Последнее является одним из ключевых интегральных показателей в предпроектном анализе вариантов судов и формировании вариантов рядов. Несколько большие относительные отклонения (6 — 11 %) характерны для оценок механической мощности ЭУ. При этом значения тяги двигателей на швартовном режиме, которые существенно влияют на ледопроходимость судна, моделируются с отклонением около 5 %. Наибольшие относительные отклонения характерны для оценок аппликаты ЦТ судна порожнем и метацентрической высоты (до 50 %). Это отчасти обусловлено тем, что небольшие абсолютные значения этих параметров формально увеличивают относительные отклонения.

В целом, на основе выполненной верификации можно признать, что реализованный макет ЦД обеспечивает хороший уровень точности прогнозирования проектных параметров. В будущем возможно дальнейшее улучшение расчетных алгоритмов и повышение точности моделей.

Таблица 1
Фактические и расчетные значения параметров судов

Параметр		Енисей	Штурман Альбанов	Василий Динков	Кирилл Лавров	Mastera	Алексей Косыгин	Кристофф де Маржери	Проект G006 фирмы GTT	Норильский никель
Летний дедвейт, т	ЦД	18 286	43 043	71 446	69 356	105 683	89 287	89 367	77 634	14 370
	Пр	18 569	41 801	71 228	69 830	106 208	89 053	88 500	79 313	14 637
	%	-1,5 %	3,0 %	0,3 %	-0,7 %	-0,5 %	0,3 %	1,0 %	-2,1 %	-1,8 %
Грузовместимость (100%), м ³	ЦД	20 317	54 953	86 471	86 676	123 570	172 703	172 682	150 269	664
	Пр	20 650	54 269	86 368	87 576	123 631	172 900	172 845	150 000	650
	%	-1,6 %	1,3 %	0,1 %	-1,0 %	0,0 %	-0,1 %	-0,1 %	0,2 %	2,2 %
Вместимость по балласту (100 %), м ³	ЦД	12 237	25 876	36 823	36 260	43 541	69 081	72 090	56 904	8060
	Пр	12 450	26 804	37 463	37 794	46 922	70 000	71 510	55 242	8437
	%	-1,7 %	-3,5 %	-1,7 %	-4,1 %	-7,2 %	-1,3 %	0,8 %	3,0 %	-4,5 %
Механическая мощность ЭУ, кВт	ЦД	20 400	30 600	30 600	25 500	23 800	68 000	68 000		18 200
	Пр	19 200	32 000	27 550	26 100	21 080	64 350	64 350		18 000
	%	6,3 %	-4,4 %	11,1 %	-2,3 %	12,9 %	5,7 %	5,7 %		1,1 %
Ледопроходимость носом вперед, м	ЦД	1,41	1,39	1,61	1,0		1,77	1,61		1,42
	Пр	1,5	1,4	1,7	1,0		1,7	1,5		1,5
	%	-6,0 %	-0,7 %	-5,3 %	0,0 %		4,1 %	7,3 %		-5,3 %
Ледопроходимость кормой вперед, м	ЦД	1,55	1,77	1,8	1,54	1,0	2,11	2,04		1,55
	Пр	1,65	1,8	1,7	1,6	1,0	2,1	2,1		1,65
	%	-6,1 %	-1,7 %	5,9 %	-3,8 %	0,0 %	0,5 %	-2,9 %		-6,1 %
Достижимая скорость на чистой воде, уз	ЦД	17,4	18,8	18,0	16,7	15,9	20,9	20,8		17,1
	Пр	17,5	18,7	17,8	16,0	15,5	21,0	21,0		17,3
	%	-0,6 %	0,5 %	1,1 %	4,4 %	2,6 %	-0,5 %	-1,0 %		-1,2 %
Водонизмещение порожнем, т	ЦД	10 428	21 652	22 886	23 507	22 126	46 451	47 628	34 011	10 909
	Пр	10 544	21 350	20 819	24 886	21 726	46 000	47 087	32 395	10 798
	%	-1,1 %	1,4 %	9,9 %	-5,5 %	1,8 %	1,0 %	1,1 %	5,0 %	1,0 %
Аппликата ЦТ судна порожнем, м	ЦД	10,49		13,23	12,92		16,17		16,86	9,81
	Пр	8,93		13,03	12,25		16,95		16,55	9,66
	%	17,5 %		1,5 %	5,5 %		-4,6 %		1,9 %	1,6 %
Абсцисса ЦТ судна порожнем, м	ЦД	57		107,0	112,3		124,0		121,82	62,3
	Пр	61,6		104,66	108,5		131,7		126,77	64,5
	%	-7,5 %		2,2 %	3,5 %		-5,8 %		-3,9 %	-3,4 %
Метацентрическая высота судна в грузу, м	ЦД	1,26			3,1		8,27		3,68	
	Пр	2,6			2,96		8,05		3,27	
	%	-51,5 %			4,7 %		2,7 %		12,5 %	

Примечание. ЦД — расчетные данные цифрового двойника, Пр — фактические данные построенного судна, % — относительное отклонение расчетных результатов от фактических.

5. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Приведем несколько характерных примеров практических работ, в которых необходимые решения по конфигурации арктических МТС были найдены с использованием вариантовых рядов судов, созданных с помощью представленного макета ЦД.

Первый случай. Для вывоза сырья с арктического горнорудного месторождения проектировалось универсальное сухогрузное судно дедвейтом около 40 000 т, которое не имеет прямых аналогов среди существующих судов ни по дедвейту, ни по ледовому классу. В прямых рейсах судно должно обеспечивать перевозку тяжелого рудного концентратра в биг-бэгах, а в обратных — вывоз грузов в стандартных контейнерах. Биг-бэги перевозятся только в трюмах, а контейнеры также и на люковых крышках. Судно должно удовлетворять ограничению по осадке не более 10,5 м в полном грузу. Достоверная оценка характеристик такого судна и его вместимости по рудному концентрату и генеральным грузам невозможна без выполнения детального предпроектного анализа.

Вариантный ряд, созданный при помощи ЦД, включал шесть альтернативных проектов, которые различаются ледовым классом (Arc5 — Arc7), мощностью на валах, типом движительного комплекса (традиционные валы или ВРК), числом винтов (один или два винта), а также параметрами общего расположения. В ходе проектирования было установлено, что обеспечение приемлемого значения метацентрической высоты и, соответственно, показателей качки судна при полной загрузке биг-бэгами возможно только при условии размещения части груза на твиндеке (рис. 7). Большая ширина судна (32 м) приводит к необходимости установки в трюме проницаемой продольной переборки, которая служит опорой для твиндека и позволяет многократно снизить его массу, однако уменьшает контейнеровместимость и увеличивает массу корпуса. С помощью ЦД был выполнен анализ зависимости массы крышек твиндека и показателей остойчивости судна от доли биг-бэгов, размещаемых на нем, а также определена оптимальная проектная загрузка. Кроме того, в ЦД было учтено стремление обеспечить посадку судна на ровный киль в полном грузу без приема балласта, поэтому для каждого варианта судна было рассчитано рациональное распределение груза биг-бэгов по трюмам (рис. 7).

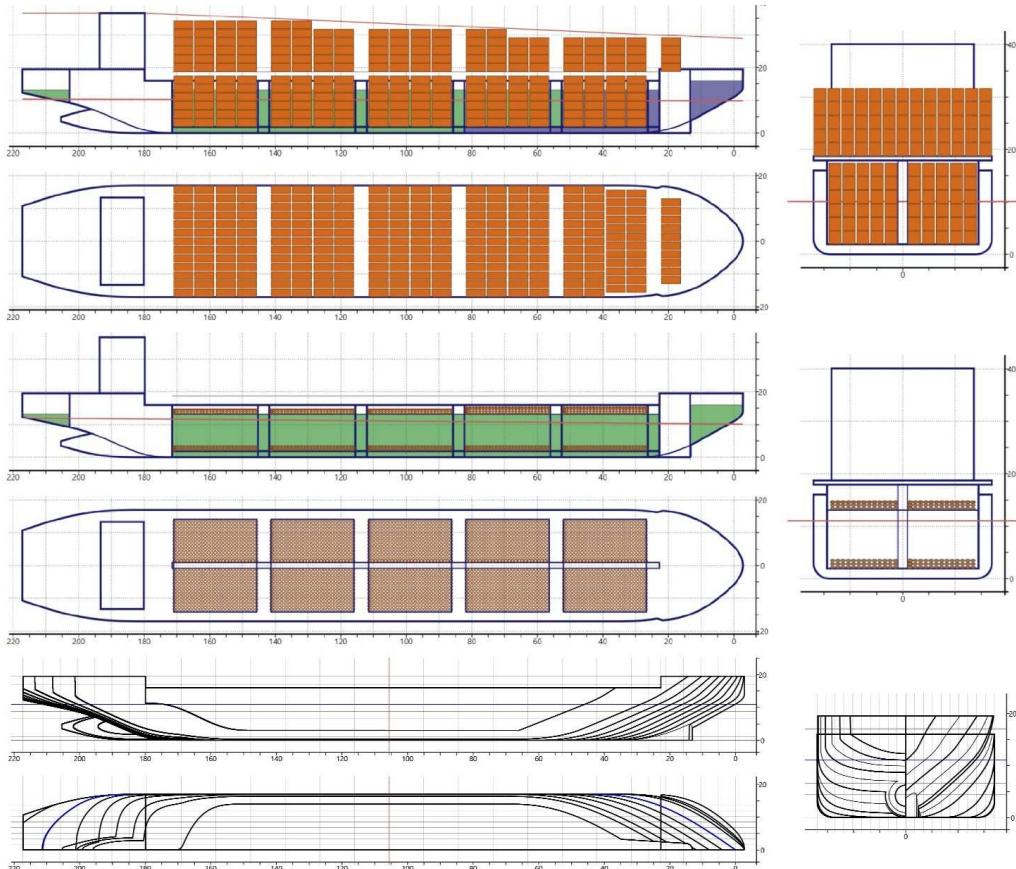


Рис. 7. Схемы размещения контейнеров (сверху) и биг-бэгов (посередине), а также схема теоретического чертежа (снизу) универсального сухогрузного судна с ледовым классом Arc5

Второй случай. При анализе системы вывоза СПГ с арктического месторождения необходимо было рассмотреть вариант мелкосидящего судна-газовоза, способного входить в Обскую губу минуя Морской канал. Осадка такого судна в полном грузу должна быть не более 9,5 м, грузовместимость при этом следует максимизировать. В ходе проектирования с применением ЦД была достигнута вместимость около 73 000 м³ при условии соблюдения ограничений на геометрию мембранных емкостей и ограничений по характерным соотношениям главных размерений газовозов СПГ такого типоразмера. Полученные характеристики мелкосидящего арктического газовоза и их сопоставление с судном вместимостью около 170 000 м³ приведены в табл. 2 и на рис. 8. Отметим, что формирование вариантов рядов судов при помощи ЦД обеспечивает адекватность сопоставительного анализа проектных характеристик, чего, например, не достигается в случае, если разные варианты прорабатываются разными проектантами, имеющими различную технологическую и методическую базу.

Таблица 2
Характеристики расчетных вариантов газовозов СПГ с ледовым классом Arc7

Параметр	Мелкосидящий вариант	Традиционный вариант
Суммарная грузовместимость (100 %), м ³	72 711	173 140
Скорость естественного испарения в грузу, % в сут	0,179	0,133
Производительность грузовых насосов, м ³ /ч	6900	15 000
Длина максимальная, м	235	300,0
Длина по ватерлинии в грузу, м	220,1	293,5
Ширина максимальная, м	38	48,8
Высота борта на миделе, м	20,8	26
Осадка судна в грузу на миделе, м	9,5	12,2
Водоизмещение судна в грузу, т	63 078	132 189
Коэффициент общей полноты судна в грузу	0,774	0,738
Коэффициент полноты ватерлинии судна в грузу	0,923	0,905
Механическая мощность ЭУ, кВт	34 000	68 000
Число и мощность ВРК, кВт	2 × 12 000	3 × 15 000
Максимальная скорость на тихой воде, уз	18,5	20,9
Угол наклона форштевня, град	30	20,2
Угол входа ватерлинии, град	41,3	41,6
Угол развала борта на миделе, град	0	0
Предельная ледопроходимость носом, м	1,4	1,65
Предельная ледопроходимость кормой, м	1,6	2,2
Мощность на валах (кВт) на скорости 16 уз	13 455	16 506
Длина носового заострения ватерлинии, м	37,1	73,4
Длина кормового заострения ватерлинии, м	40,6	50,8
Длина цилиндрической части ватерлинии, м	142,2	164,1
Вместимость балластных цистерн (100 %), м ³	35 214	70 139
Водоизмещение судна порожнем, т	26 462	46 151
Масса металлического корпуса, т	19 269	33 280

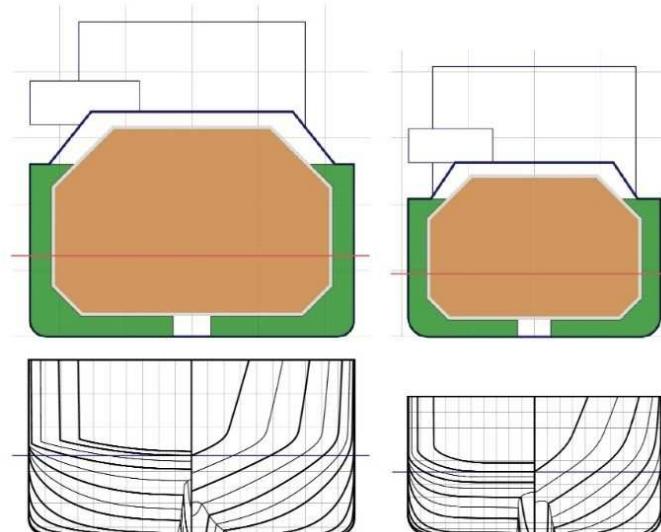


Рис. 8. Сопоставление поперечных сечений и теоретических чертежей традиционного (слева) и мелкосидящего (справа) вариантов арктических газовозов СПГ

Третий случай. При исследовании работы круглогодичной арктической контейнерной линии [11] рассматривался вариантный ряд перспективных арктических контейнеровозов, не имеющих близких прототипов. Целевое значение контейнеровместимости находилось в диапазоне 5000 — 6000 TEU, ледовый класс Arc7 или Arc8, помимо этого, рассматривались различные типы энергетической установки и движительного комплекса. В результате было сформировано 19 альтернативных вариантов судов. Применение ЦД позволило выявить несколько неочевидных на первый взгляд проектных аспектов, которые отличают контейнеровозы с высоким ледовым классом от неледовых судов этого типа.

Во-первых, выяснилось, что традиционная проблема недостаточной остойчивости у ледовых контейнеровозов решается несколько проще, чем у неледовых, так как существенная масса ледовых усилий снижает аппликату центра тяжести всего судна. Поэтому при прочих равных условиях количество палубных контейнеров на ледовом контейнеровозе может быть увеличено.

Во-вторых, удалось установить интересные особенности влияния ледокольной формы корпуса на удифферентовку контейнеровоза рассматриваемой вместимости. Известно, что при полной загрузке абсцисса центра тяжести судна оказывается смещенной в корму, и для удифферентовки требуется принятие балласта в носовые танки. Это происходит из-за кормового расположения центра тяжести судна порожнем (поскольку машинное отделение находится в корме), а также из-за смещения в корму центра тяжести блока палубных контейнеров, который на виде сбоку имеет характерную трапециевидную или треугольную форму с вершиной в районе надстройки (такое распределение диктуется условиями видимости с ходового мостика). Для обеспечения посадки на ровный киль с минимальным количеством балласта на неледовых контейнеровозах центр величины существенно смещают в корму путем заострения носовых обводов и придания значительной S-образности носовой ветви ватерлинии. Однако такое решение оказывается невозможным на арктических судах из-за выпуклой формы носовой ватерлинии, приводящей к увеличению полноты носовой оконечности. Уменьшение же объема носовой части судна за счет увеличения длины носового заострения также нерационально, поскольку приводит к уменьшению вместимости. Как альтернативный вариант, можно попробовать сместить центр величины в нужном направлении за счет увеличения объема кормы, однако возможности такого подхода также ограничены, поскольку большие объемы как носовой (выпуклая ватерлиния), так и кормовой частей корпуса приводят к чрезмерному увеличению коэффициента общей полноты судна, что может существенно ухудшить картину обтекания на высоких скоростях. Решение указанного проектного противоречия было найдено в ходе выполнения численных экспериментов с созданным ЦД. Оказалось, что выходом из ситуации является применение наклонного на 7 — 10 градусов борта в средней части судна. Это позволяет снизить коэффициент общей полноты до требуемых значений (около 0,73 — 0,75) и путем приемлемого приполнения кормы сместить центр величины в необходимом направлении, сохранив при этом как контейнеровместимость, так и благоприятную форму обводов для движения по чистой воде. Помимо этого, наклонный борт оказывает благоприятное влияние на ледовые нагрузки и ледовую управляемость, поэтому все суда сформированного вариантного ряда имели наклонный борт.

Дальнейшее техническое проектирование выбранного варианта судна выполнялось при сохранении базовых проектных параметров, заложенных на концептуальной стадии (см. рис. 9). Была существенно доработана форма кормовой оконечности, увеличены объемы танка СПГ, изменена геометрия носовых контейнерных трюмов. Интересно отметить, что в ходе технического проектирования были подтверждены полученные в ЦД оценки важнейших характеристик судна, таких как водоизмещение порожнем, достижимая скорость хода и предельная ледопроходимость.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что цифровой двойник проекта может существенно улучшить представление проектанта о создаваемом объекте на концептуальном уровне, делая возможным рассмотрение самых разных проектных альтернатив. Эта технология делает возможным обоснованный и достаточно быстрый анализ проектных противоречий, позволяет выявить характерные закономерности, а также обеспечить многовариантность процесса проектирования. Можно отметить, что непосредственное использование ЦД через некоторое время формирует у пользователя количественное понимание известных качественных закономерностей, таких как, например, зависимость ходкости и массы корпуса от длины, влияние отношения ширины к осадке на показатели остойчивости и многие другие.

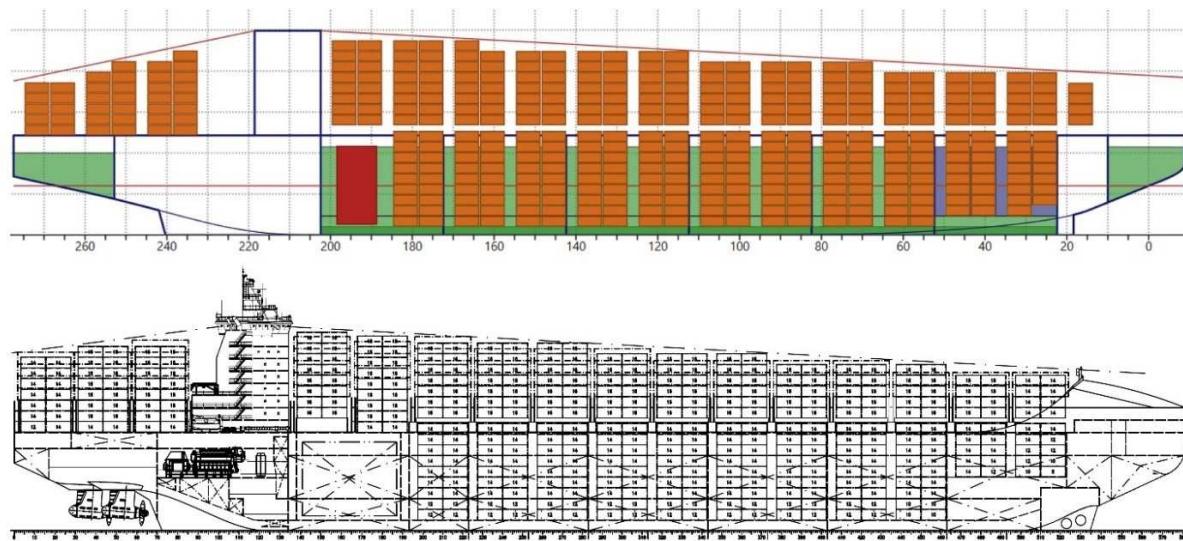


Рис. 9. Схемы общего продольного расположения арктического контейнерного судна, полученные по результатам предпроектного анализа в цифровом двойнике (сверху) и в ходе технического проектирования (снизу)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана прикладная технология создания цифрового двойника проекта судна на основе таких принципов, как параметризация, целостность и прямой расчет. Моделирование работы проектируемого судна во внешней среде предполагается с применением детализированных имитационных моделей и вариантового подхода, подразумевающего отделение модели судна от модели эксплуатации. Созданный макет ЦД, а также опыт выполненных работ позволяют сделать обоснованный вывод о работоспособности, практической востребованности и существенном потенциале этой технологии.

Практическая востребованность этого направления при проектировании арктических судов обусловлена необходимостью выполнения многовариантных проектных проработок, в ходе которых могут быть найдены наиболее рациональные характеристики судна. Однако в настоящее время отечественная практика сложилась таким образом, что проектанты предпочитают двигаться в пространстве возможных решений преимущественно «наощупь», ориентируясь на собственный опыт, доступные прототипы, качественные закономерности и используя для выполнения количественных оценок приблизительные соотношения или простые аналитические модели. Вследствие высокой трудоемкости САПР-ориентированных проработок, подробное рассмотрение на концептуальной стадии стало возможным буквально для одного-двух выбранных вариантов судна. Если добавить к этому характерную для России относительно невысокую интенсивность проектирования крупных гражданских судов, то можно получить картину потери интереса индустрии к концептуальному проектированию и вытекающее отсюда стремление проектантов копировать зарубежные решения.

Выходом из этой ситуации может стать создание прикладных проектных решений, направленных на поддержку исследовательского и концептуального проектирования судна, в том числе в использовании описанной технологии цифрового дублирования. Дальнейшее развитие такой технологии подразумевает решение ряда теоретических и прикладных вопросов.

Круг теоретических вопросов охватывает как задачи, которые можно отнести к фундаментальным (интеграция ИИ-моделей с проектными моделями судов, см. [1]), так и менее масштабные, относящиеся к проектированию вычислительной архитектуры, формированию подходов к параметризации модели судна на разных уровнях иерархии, поиску целесообразного уровня детализации модели судна, а также множеству других аспектов, упомянутых в разделах 2 и 3.

Вопросы, относящиеся к прикладным, являются наиболее обширными. Описанный в настоящей работе макет ЦД реализован при помощи достаточно простых технологий, поэтому дальнейшее развитие предполагает его существенную переработку. В частности, необходим переход на универсальные параметрически управляемые модели судовой поверхности; формат представления внутренней геометрии отсеков должен быть изменен с каркасного на поверхностный; возможно расширение объектной модели ЦД

в направлении универсального инструмента для разных типов гражданских судов. Помимо этого, существенной проработки требует алгоритмическая часть ЦД, в которую входит расстановка оборудования и формирование общего расположения судна, расчеты посадки, остойчивости и непотопляемости, определение размеров конструкций, оценка ходовых качеств судна на чистой воде и во льдах, а также многие другие задачи. Перспективной идеей в этом направлении является создание базы знаний, содержащей соответствующие данные и алгоритмы и находящейся в открытом доступе [18] по аналогии с открытыми (open-source) программными кодами.

Завершить настоящее обсуждение хотелось бы упоминанием наиболее удачных прототипов, детальное изучение которых позволит почертнуть новые методические и технические идеи. Полагаем, что в методическом смысле наиболее интересным образом является проект HoliShip [4], о котором имеется множество открытых публикаций, а наибольший технический интерес, на наш взгляд, представляет система NAPA, которая достаточно хорошо описана в открытых источниках и которая содержит не только блоки концептуального проектирования судов, но и модели оперативного управления и оптимизации работы флота.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве», <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таровик О.В. Обзор развития теории проектирования судов и обсуждение перспектив создания цифровых проектных решений / О.В. Таровик // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 124 — 136. — EDN PELJHW.
2. Javaid M. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A review / M. Javaid, A. Haleem, R. Suman // Cognitive Robotics. — 2023. — Vol. 3. — P. 71 — 92. — DOI 10.1016/j.cogr.2023.04.003.
3. Mauro F. Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review / F. Mauro, A.A. Kana // Ocean Engineering. — 2023. — Vol. 269. — P. 113479. — DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113479.
4. Papanikolaou A.D. Holistic approach to ship design / A.D. Papanikolaou // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, Issue 11. — P. 1717. — DOI 10.3390/jmse10111717.
5. Kana A.A. Application of digital twins in the design of new green transport vessels / A.A. Kana, W. Li, I. van Noesel, Y. Pang et al. // State-of-the-Art Digital Twin Applications for Shipping Sector Decarbonization / B. Karakostas, T. Katsoulakos (eds.). IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 161 — 191. — DOI 10.4018/978-1-6684-9848-4.ch008.
6. Papanikolaou A. Ship design in the era of digital transition / A. Papanikolaou, S. Harries, E. Boulogouris, S.O. Erikstad, A.A. Kana // International Marine Design Conference (IMDC-2024). Amsterdam, Netherlands, June 2024. — 40 p. — DOI 10.59490/imdc.2024.784.
7. Requejo W.S. Fostering creativity in engineering design through constructive dialogues with generative artificial intelligence / W.S. Requejo, F.F. Martínez, C.A. Vega, R.Z. Martínez et al. // Cell Reports Physical Science. — 2024. — Vol. 5, Issue 9. — DOI 10.1016/j.xcrp.2024.102157.
8. Таровик О.В. Применение методов прямого проектирования судов как средства информационного обеспечения имитационных моделей морских транспортных систем / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев // Седьмая междунар. науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023): тр. конф. — СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. — С. 213 — 225. [Электронный ресурс] URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mtmts-2023-213-225.pdf> (дата обращения 08.09.2025).
9. Таровик О.В. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / О.В. Таровик, А.Г. Топаж, А.Б. Крестьянцев, А.А. Кондратенко // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 86—101.
10. Топаж А.Г. Имитационное моделирование на разных стадиях жизненного цикла транспортной системы — что нужно заказчику кроме самой модели? / А.Г. Топаж, О.В. Таровик, А.Б. Крестьянцев // М-лы Междунар. форума Kazan Digital Week — 2022 (KDW-2022). Казань, 21 — 24 сентября 2022 г. [Электронный ресурс] URL: <https://bureauhyperborea.ru/wp-content/uploads/2022/10/Doklad-Topazh-KDW.pdf> (дата обращения 08.09.2025).
11. Выполнены разработка комплексной имитационной модели транспортной системы СМТК и оптимизация основных характеристик судов по договору с компанией АО «ЦНИИМФ». 23.06.2021. [Электронный ресурс] URL: https://bureauhyperborea.ru/cniiimf_rusatomcargo_smrk/ (дата обращения 08.09.2025).
12. Таровик О.В. Аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания / О.В. Таровик // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2015. — № 86 (370). — С. 173 — 188.
13. Camba J.D. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability / J.D. Camba, M. Contero, P. Company // Computer-Aided Design 63. — 2016. — P. 101 — 117. — DOI 10.1016/j.cad.2016.01.003.
14. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1 / D.G.M. Watson. — Elsevier, 1998. — 566 p.
15. Таровик О.В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / О.В. Таровик. — СПб., 2015. — 23 с. — DOI 10.13140/RG.2.2.36326.88640.

16. Косоротов А.В. Метод оценки буксировочного сопротивления современных ледоколов и судов ледового плавания на чистой воде / А.В. Косоротов // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2020. — № 1 (391). — С. 29–41. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-391-29-41.
17. Справочник по теории корабля: в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985.
18. Суслов А.Н. Перспективные направления развития и наполнения электронной базы знаний по проектированию судов / А.Н. Суслов, О.В. Одегова, Я. Лян, Т. Сунь, Ф. Ван // Труды Крыловского гос. науч. центра. — 2020. — Специальный выпуск 1. — С. 131 — 136. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-1-131-136.

REFERENCES

1. Tarovik O.V. An overview of the evolution of ship design theory and discussion of the prospects of digital design solutions. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 124 — 136. EDN PELJHW. (In Russ.)
2. Javaid M., Haleem A., Suman R. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A review. *Cognitive Robotics*. 2023. Vol. 3. P. 71 — 92. — DOI 10.1016/j.cogr.2023.04.003.
3. Mauro F., Kana A.A. Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 269. P. 113479. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113479.
4. Papanikolaou A.D. Holistic approach to ship design. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, Issue 11. P. 1717. DOI 10.3390/jmse10111717.
5. Kana A.A., Li W., van Noesel I., Pang Y. et al. Application of digital twins in the design of new green transport vessels. *State-of-the-Art Digital Twin Applications for Shipping Sector Decarbonization* / B. Karakostas, T. Katsoulakos (eds.). IGI Global Scientific Publishing, 2024. P. 161 — 191. DOI 10.4018/978-1-6684-9848-4.ch008.
6. Papanikolaou A., Harries S., Boulougouris E., Erikstad S.O., Kana A.A. Ship design in the era of digital transition. *International Marine Design Conference (IMDC-2024)*. Amsterdam, Netherlands, June 2024. 40 p. DOI 10.59490/imdc.2024.784.
7. Requejo W.S., Martínez F.F., Vega C.A., Martínez R.Z. et al. Fostering creativity in engineering design through constructive dialogues with generative artificial intelligence. *Cell Reports Physical Science*. 2024. Vol. 5, Issue 9. DOI 10.1016/j.xcrp.2024.102157.
8. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B. Primenenie metodov pryamogo proektirovaniya sudov kak sredstva informatsionnogo obespecheniya imitatsionnykh modelei morskikh transportnykh sistem [Methods of direct vessel design as an information support tool for simulation models of marine transport systems]. *7th International scientific-practical conference «Simulation and complex modelling in marine engineering and marine transporting systems» (SCM MEMTS-2023)*. Conference materials. St. Petersburg: IPK NP-Print, 2023. P. 213 — 225. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/ikm-mmts-2023-213-225.pdf> (accessed 08.09.2025).
9. Tarovik O.V., Topaj A.G., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. Arctic marine transport system simulation: Multidisciplinary approach fundamentals and practical experience. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika [The Arctic: Ecology and Economy]*. 2017. No 1 (25). P. 86 — 101. (In Russ.)
10. Topaj A.G., Tarovik O.V., Krestyantsev A.B. Imitatsionnoe modelirovaniye na raznykh stadiyakh zhiznennogo tsikla transportnoi sistemy — chto nuzhno zakazchiku krome samoi modeli? [Simulation modeling at different stages of the life cycle of a transport system — what does the customer need besides the model itself?] *International forum Kazan Digital Week — 2022 (KDW-2022)*. Kazan, Russia, 21 — 24 September 2022. URL: <https://bureauhyperborea.ru/wp-content/uploads/2022/10/Doklad-Topazh-KDW.pdf> (accessed 08.09.2025).
11. Vypolneny razrabotka kompleksnoi imitatsionnoi modeli transportnoi sistemy SMTK i optimizatsiya osnovnykh kharakteristik sudov po dogovoru s kompaniei AO «TsNIIMF» [The development of a comprehensive simulation model of the SMTK transport system and the optimization of the main characteristics of vessels under a contract with JSC CNIIMF have been completed]. URL: https://bureauhyperborea.ru/cniimf_rusatomcargo_smtk/ (accessed 08.09.2025).
12. Tarovik O.V. Analytical model of icegoing ships hull surface. *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2015. No 86 (370). P. 173 — 188. (In Russ.)
13. Camba J.D., Contero M., Company P. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability. *Computer-Aided Design* 63. 2016. P. 101 — 117. DOI 10.1016/j.cad.2016.01.003.
14. Watson D.G.M. Practical ship design. Vol. 1. Elsevier, 1998. 566 p.
15. Tarovik O.V. Metodika opredeleniya mass konstruktsii ledovykh usileneii transportnykh sudov na rannikh stadiyakh proektirovaniya [Methodology for determining the masses of ice strengthening structures of transport vessels at early design stages: abstract of PhD thesis]. St. Petersburg, 2015. 23 p. DOI 10.13140/RG.2.2.36326.88640. (In Russ.)
16. Kosorotov A.V. Towing resistance assessment method for modern icebreakers and ice-going vessels in open water. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Issue 1 (391). P. 29 — 41. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-391-29-41. (In Russ.)
17. Handbook in ship theory: in 3 vols / Ya.I. Voitkunskii (ed.). Leningrad: Shipbuilding, 1985. (In Russ.)
18. Suslov A.N., Odugova O.V., Lian Y., Siun T., Van F. Promising directions for the development and population of electronic knowledgebases on ship design. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Issue 1. P. 131 — 136. DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-S-1-131-136. (In Russ.)



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 697.9 + 662.99
EDN YMХRYV

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

А.А. Серов, канд. техн. наук, НПО «Обуховский завод», 192012 Россия, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, д. 120, стр. 19, пом. 1-Н, № 708, e-mail: serov_sasha@bk.ru

А.В. Серов, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: a.serov58@gmail.com

А.В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор, ОЦ «Энергоэффективные инженерные системы» ИТМО, 191002 Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9, e-mail: tsygaav@hotmail.com

Рассмотрена возможность применения роторных регенеративных теплообменников в судовых системах вентиляции с целью повышения энергоэффективности судна. Разработан метод оценки эффективности системы. Предложены различные конструктивные параметры насадок. Произведено расчетное исследование оценки эффективности всех рассмотренных вариантов конструкции насадки. Получены варианты оптимизации существующей системы приточно-вытяжной вентиляции с регенеративным теплообменником. Приведены рекомендации по подбору параметров для конструирования насадки.

Ключевые слова: оптимизация, регенеративный теплообменник, насадка регенеративного теплообменника, система вентиляции, кондиционирование воздуха, энергоэффективность, энергосбережение.

Для цитирования: Серов А.А. Оптимизация конструктивных и режимных параметров роторного регенеративного теплообменника / А.А. Серов, А.В. Серов, А.В. Цыганков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 156 — 165. — EDN YMХRYV.

OPTIMIZING THE OPERATING AND DESIGN PARAMETERS OF REGENERATIVE ROTARY HEAT EXCHANGERS

A.A. Serov, PhD, NPO Obukhov plant, 192012 Russia, Saint-Petersburg, pr. Obukhovskoi Oborony, d. 120, str. 19, пом. 1-N, № 708, e-mail: serov_sasha@bk.ru

A.V. Serov, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: a.serov58@gmail.com

A.V. Tsygankov, DSc, Professor, EC "Energy-Efficient Engineering Systems" ITMO, e-mail: tsygaav@hotmail.com

The possibility of using rotary regenerative heat exchangers in marine ventilation systems in order to increase the ship's energy efficiency is considered. A method for evaluating the efficiency of the system has been developed. Various design parameters of rotor are suggested. The calculation study of the effectiveness evaluation of all considered variants of the design of the rotor was conducted. Variants of optimization of the existing system of supply and outgoing ventilation with regenerative heat exchanger are obtained. The recommendations on the selection of parameters for rotor design are given.

Keywords: optimization, regenerative heat exchanger, regenerative heat exchanger rotor, ventilation system, air conditioning, energy efficiency, energy saving.

For citation: Serov A.A., Serov A.V., Tsygankov A.V. Optimizing the operating and design parameters of regenerative rotary heat exchangers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 156 — 165. EDN YMХRYV. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Проблема энергоэффективности морских судов приобретает все большую актуальность в связи с введением новых требований в МК МАРПОЛ по энергоэффективности, которые постоянно ужесточаются. С проблемой выполнения требований по соответствию судна показателю СП сталкиваются судовладельцы всех судов, совершающих транспортную работу валовой вместимостью 5000 и более. При этом достижение требуемого значения показателя СП возможно как за счет эксплуатационных параметров судна (эксплуатационной скорости, коэффициента ходового времени), так и за счет изменения конструкции судов, применения новых видов топлива, модернизации механизмов и систем для уменьшения потребления энергии. Причем для достижения положительных рейтингов важно энергосбережение не только на ходовых режимах, но и когда судно не имеет ход, так как в этом случае нет возможности использовать для обогрева утилизационные котлы и тепло от системы охлаждения главных двигателей.

Модернизация существующих судов для повышения энергоэффективности, как правило, требует от судовладельца серьезных затрат, часто с временным выводом судна из эксплуатации. Поэтому поиск путей повышения энергоэффективности, которые не требуют больших затрат при модернизации, остается и будет становиться все более актуальной задачей для морской отрасли.

Одной из систем, энергоэффективность которой можно повысить без существенных затрат, является судовая система кондиционирования и вентиляции. Кратность вентиляции судовых помещений обычно назначается согласно требованиям Правил Регистра, исходя из опасности оборудования, расположенного в этом помещении, и опасных веществ, содержащихся в нем. Например, в помещении холодильных машин требуется непрерывно работающая вентиляция кратностью 10 обменов в час (без учета аварийной вентиляции), в грузовых насосных отделениях на танкерах — 20 воздухообменов в час, в грузовых помещениях для перевозки автотранспорта с топливом в баках — 10 воздухообменов в час, в станциях пожаротушения и генераторов инертного газа — 6 воздухообменов в час. При этом температура в помещении должна определяться исходя из поддержания оборудования в работоспособном состоянии или необходимого температурного режима перевозки груза и комфортного расположения экипажа. При этом затраты на поддержание необходимой температуры воздуха будут весьма существенны. Например, расчет показывает, что для насосного отделения объемом 100 м³ с кратностью вентиляции 20 воздухообменов в час (как того требуют Правила Регистра) и перепадом температур с наружным воздухом 40°C (что не редкость в наших широтах) потребуется электрический обогреватель мощностью около 29 кВт. В таких условиях для экономии энергии напрашивается применение устройства для регенерации тепла или холода путем организации теплообмена между уходящим и приходящим воздухом.

СУДОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Под процессом кондиционирования воздуха в соответствии с ГОСТ 22270-2018 понимается автоматическое поддержание в помещениях всех или отдельных параметров воздуха (температуры, относительной влажности, чистоты и подвижности) с целью обеспечения заданных параметров микроклимата, наиболее благоприятных для самочувствия людей, ведения технологического процесса и обеспечения сохранности материальных ценностей.

Системы кондиционирования воздуха, впервые установленные на судах в конце XIX в., в настоящее время широко используются как на плавучих, так и на морских стационарных объектах, и внимание к условиям обитаемости и энергоэффективности (энергосбережению) только возрастает [1 — 3].

В состав приточно-вытяжных систем вентиляции могут включаться рекуперативные и регенеративные теплообменники, которые выполняют роль обогревателя, передавая теплоту приточному воздуху. По разным данным, регенеративный теплообменник способен передать 60 — 90 % теплоты вытяжного воздуха [4 — 9]. Бесспорным преимуществом регенеративных теплообменников роторного типа (рис. 1) для применения на судах является возможность их установки на приемных воздухозаборниках систем вентиляции, без необходимости переделки систем вентиляции. Как следствие, поиск методов оптимизации конструкции, в частности насадки роторного регенеративного теплообменника, является важной задачей в решении вопроса энергосбережения.

Правильный подбор насадки теплообменника позволит не только повысить эффективность насадки, но и снизить ее массу. Для каждой отдельной системы, в зависимости от разности температур, требуемого обеспечиваемого расхода и других сторонних (дополнительных) требований, нужно подбирать свои

параметры насадки. Неправильный подбор насадки в различных ситуациях может привести к снижению эффективности, проблемам с монтажом, невозможности обеспечения необходимого расхода воздуха и конденсации-обмерзанию влаги в каналах, что может нарушить работу приточно-вытяжной вентиляции.

Разработка метода оценки эффективности насадки регенеративного теплообменника по целевой функции с весовыми коэффициентами позволит быстро получить требуемые варианты оптимизации существующей насадки в соответствии с выбранными приоритетами заказчика и совершенствовать системы вентиляции и кондиционирования различных сооружений, в том числе морских объектов и судов.

Задачами исследования являются:

- определение параметров (частных критериев), по которым возможна оптимизация насадки роторного регенеративного теплообменника;
- формирование целевой функции оптимизации насадки регенеративного теплообменника;
- проверка эффективности применения целевой функции.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является приточно-вытяжная установка с роторным регенеративным теплообменником (рис. 1) [10]. Исследование включает в себя решение оптимизационной задачи — поиск оптимальных конструктивных и режимных параметров насадки.

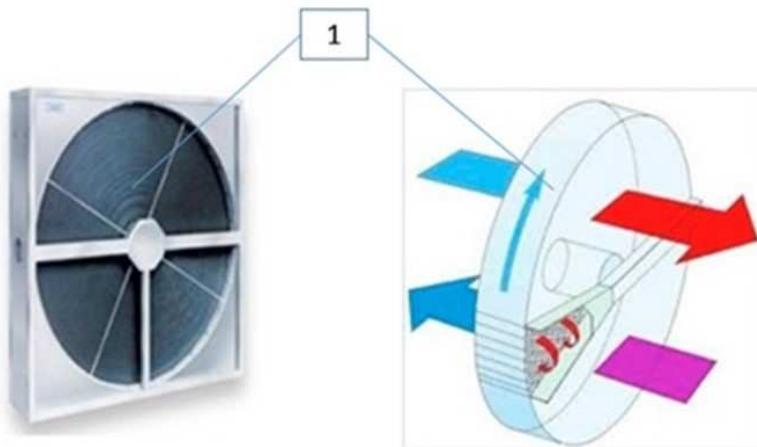


Рис. 1. Роторный регенеративный теплообменник; 1 — теплоаккумулирующий ротор

При проектировании любого технического объекта поиск оптимального решения заключается в нахождении вектора варьируемых (управляющих) параметров (характеристик и режимов), обеспечивающих максимум (минимум) целевой функции, определяющей соответствие проекта техническому заданию [11, 12].

Математическая модель проектируемого объекта в общем случае имеет вид:

$$Y=f(X, Z)$$

где Y — вектор выходных параметров; включает в себя регламентируемые технические, экономические и прочие параметры объекта, которые могут быть рассмотрены как критерии оптимальности;
 X — вектор варьируемых (внутренних) параметров, управляющих вектором Y ;
 Z — вектор внешних условий и ограничений; включает в себя технологические, климатические, экологические и другие характеристики, определяющие условия и особенности работы проектируемого объекта.

Для перехода к однокритериальной целевой функции существует два основных подхода.

В первом случае из совокупности частных критериев выбирается один, который становится целевой функцией, а остальные критерии относят к ограничениям Z_i , определяющим допустимую область D изменения варьируемых параметров. Однако такая постановка неэффективна, если критерии близки по значимости.

Другим подходом к формированию целевой функции является объединение всех частных критериев в одну функцию, которую принято называть сверткой частных критериев.

Аддитивная целевая функция имеет вид:

$$F(Y) = \sum_{i=1}^n a_i Y_i, \quad (1)$$

где: Y_i — частный критерий;
 a_i — весовой коэффициент частного критерия.

Если проектирование проводится на основе прототипа, тогда в качестве нормирующих параметров могут выбираться частные критерии прототипа. Тогда аддитивная целевая функция принимает вид:

$$F(Y) = \sum_{i=1}^n a_i Y_i / c_i, \quad (2)$$

где c_i — частный критерий прототипа.

Допустимая область изменения варьируемых параметров определяется на основании анализа опыта проектирования и эксплуатации аналогичных конструкций. При отсутствии необходимой информации, в первом приближении, области изменения могут определяться в виде диапазона отклонений от номинального (базового) значения варьируемого параметра:

$$X_{\max} = (1 + \Delta X)X,$$

$$X_{\min} = (1 - \Delta X)X,$$

где $0 \leq \Delta X \leq 1$ — относительное отклонение варьируемого параметра от номинального значения.

Так как целевая функция формируется на основании технического задания на проектирование или экспертизу технического решения, то в дальнейшем в качестве примера рассматривается задача оптимизации регенеративного роторного теплообменника, для которого заданы расходы и температуры приточного и вытяжного воздуха. Необходимо обеспечить максимальный коэффициент регенерации теплоты вытяжного воздуха при минимальных эксплуатационных затратах и минимальной массе (или габаритах) ротора.

В качестве прототипа (базы) проектного решения принят регенеративный теплообменник приточно-вытяжной установки Flakt Woods Semco TS.

Основные параметры эквивалентной модели теплоаккумулирующей насадки приведены в табл. 1.

Вектор варьируемых геометрических и режимных параметров — $X(n_3, d_3, l_3, t_3, \tau_3)$.

Вектор внешних параметров — $Z(G_{Hout}, G_{ Hin}, T_{out}, T_{in}, \rho_h, c_h)$.

Частные критерии сформулированной выше оптимизационной задачи:

$Y_1 = K = \frac{T_I - T_{out}}{T_{in} - T_{out}}$ — коэффициент регенерации теплоты вытяжного воздуха, T_I — температура на притоке

в помещение, $^{\circ}\text{C}$;

$Y_2 = M_3 = \pi d_3 t_3 l_3 \rho_h n_3$ — масса насадки, кг;

$Y_3 = N_{31} = \Delta P$ — потери давления в насадке, Па;

$Y_4 = N_{32} = T_{tp}/\tau_3$ — потери трения в опорах ротора, Вт.

Потери давления в эквивалентном цилиндрическом канале при ламинарном движении и равенство расходов приточного и вытяжного воздуха вычисляются по формуле Пуазейля:

$$G_H/n_3 = \frac{\pi d_3^4}{128 l_3 \mu_b} \Delta P,$$

$$\Delta P = \frac{128 l_3 \mu_b G_H}{\pi d_3^4 n_3}.$$

Момент сил трения в опорах ротора:

$$T_{tp} = f_{tp} M_3 g d_{tp} / 2.$$

Здесь: G_H — расход воздуха на вытяжке и притоке, $\text{м}^3/\text{с}$;

T_{out}, T_{in} — температура наружного воздуха и воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$;

ΔP — потери давления на насадке, Па;

M_3 — масса насадки, кг;

n_3 — количество каналов в эквивалентной насадке;

d_3 — диаметр эквивалентного канала, м;

l_3 — длина эквивалентного канала, м;
 t_3 — толщина стенки эквивалентного канала, м;
 τ_3 — период вращения насадки, с;
 $d_{ш}$ — внутренний диаметр подшипника, м;
 ρ_h — плотность материала насадки, кг/м³;
 c_h — удельная теплоемкость материала насадки, Дж/(кг·К);
 μ_b — динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с;
 g — ускорение свободного падения, м/с²;
 f_{tr} — коэффициент трения в опорах качения.

В качестве нормирующих параметров в формуле (2) приняты соответствующие частные критерии, вычисленные для прототипа по эквивалентной модели (табл. 1). Частные критерии базового варианта приведены в табл. 2. Весовые коэффициенты частных критерии a_i в формуле (2) определяются на основе экспериментальных оценок и технического задания на проектирование. Если решением оптимизационной задачи является поиск максимума целевой функции, то коэффициенты считаются положительными, если частный критерий необходимо увеличивать, и отрицательными, если частный критерий следует уменьшать.

Целевая функция сформулированной задачи из формулы (1):

$$F(X) = \frac{T_1 - T_{out}}{T_{in} - T_{out}} a_1 - \pi d_3 t_3 l_3 \rho_h n_3 a_2 / M^* - \frac{128 l_3 \mu_b G_H}{\pi d_3^4 n_3} a_3 / N_1^* - f_{tr} \pi d_3 t_3 l_3 \rho_h n_3 g (d_{ш}/2) (a_4 / N_2^*).$$

Решение проводилось методом случайного поиска — наиболее простым с алгоритмической точки зрения с последовательным уменьшением области определения целевой функции.

Метод случайного поиска является развитием метода проб и ошибок. Он основан на бинарном сравнении целевых функций, вычисленных на случайных выборках варьируемых параметров. Так как предварительная информация о топологии целевой функции отсутствует, то случайная выборка формируется по равномерному закону распределения.

Таблица 1
Эквивалентная модель насадки Flakt Woods Semco TS

Наименование	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Кол-во эквивалентных каналов	n_3	—	89 600
Диаметр канала	d_3	мм	1,8
Длина канала	l_3	мм	200
Толщина стенки канала	T_3	мм	0,17
Период вращения насадки	τ_3	сек	4,1
Расход приточного воздуха через насадку	G_{Hout}	м ³ /с	512
Расход вытяжного воздуха через насадку	$G_{ Hin}$	м ³ /с	512
Температура приточного воздуха	T_{out}	°C	7
Температура вытяжного воздуха	T_{in}	°C	22
Плотность материала насадки	ρ_h	кг/м ³	2700
Удельная теплоемкость материала насадки	c_h	Дж/кг·К	900

Таблица 2
Частные критерии прототипа для целевой функции

Наименование	Обозначение	Значение
Коэффициент регенерации теплоты вытяжного воздуха	K_T^*	модель 1 — 0,738; модель 2 — 0,793; модель 3 — 0,780
Масса насадки, кг	M^*	43,92
Потери давления в каналах насадки, Па	N_{21}^*	92,08
Потери трения в опорах ротора, Вт	N_{32}^*	0,084

Таблица 3
Весовые коэффициенты оптимизационных задач

Вариант	a_1	a_2	a_3	a_4
1	1	0	0	0
2	0,25	0,25	0,25	0,25
3	0,50	0,50	0	0
4	0,80	0,20	0	0
5	0,60	0,35	0,05	0

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Решение оптимизационной задачи было выполнено для пяти наборов весовых коэффициентов, определяющих значимость частных критериев оптимальности (табл. 3) для трех линеаризованных моделей теплового расчета насадки теплообменника, отличающихся учетом влияния на коэффициент регенерации теплоты воздуха, оставшегося в канале при смене циклов аккумуляции и регенерации.

Для модели 1 было принято, что теплота, оставшаяся в канале после смены цикла, не передается помещению и, как следствие, считается потерянной.

Для модели 2 было принято, что теплота, оставшаяся в канале после смены цикла, переходит в следующий цикл.

Для модели 3 было принято, что теплотой, оставшейся в канале после смены цикла, можно пренебречь.

На полученные решения накладывались дополнительные ограничения:

- масса насадки не более 60 кг;
- перепад давления на насадке не более 184 Па;
- коэффициент регенерации не ниже 0,7 по модели 2.

По итогам первой итерации с учетом дополнительных ограничений в выборку попали 2 % от всех полученных вариантов; после второй итерации в выборку попал 41 % и после третьей итерации — 64 % от всех полученных вариантов.

Как следствие, сокращение диапазонов варьируемых параметров по результатам итерации ведет к увеличению количества рассматриваемых решений, тем самым повышая точность каждой последующей итерации.

По результатам расчетов построено пять графиков для различных наборов весовых коэффициентов (значений частных критериев), изображенных на рис. 2 — 6. Графики показывают изменение значения целевой функции от прототипа до последней итерации для трех выбранных моделей.

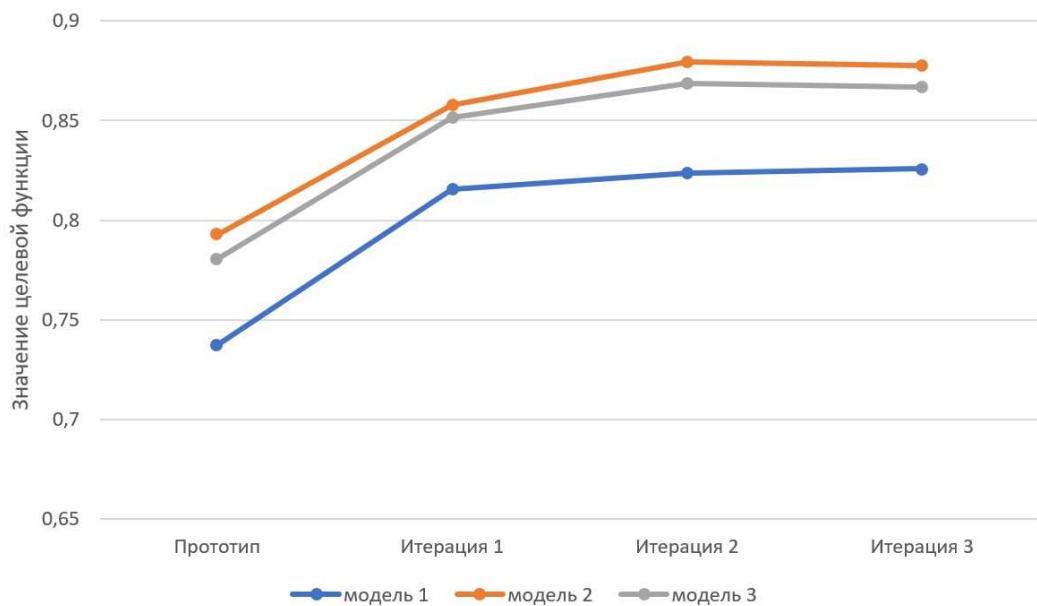


Рис. 2. Изменение целевой функции с итерациями, $a_1 = 1$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0$; $a_4 = 0$

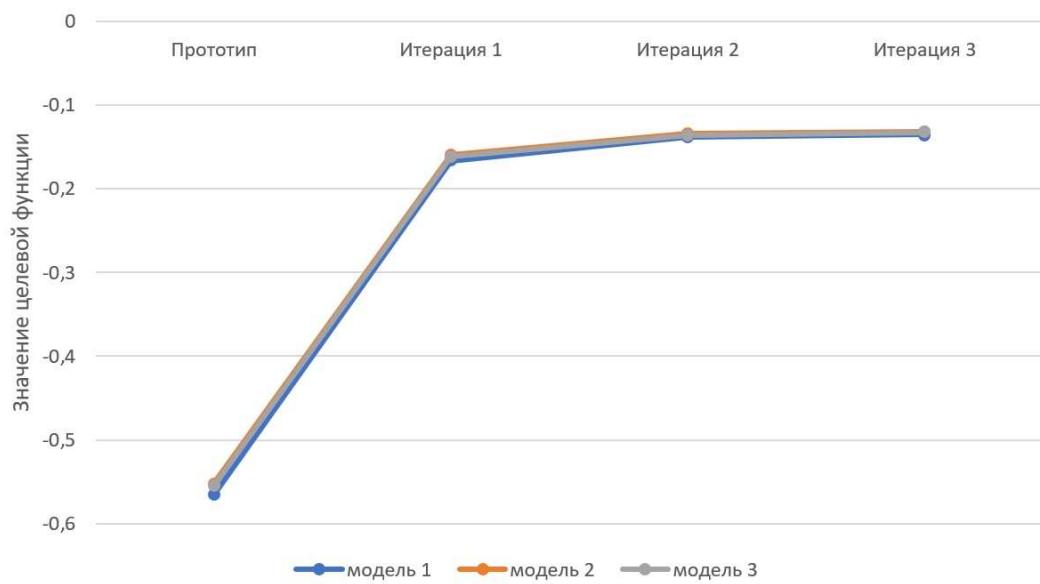


Рис. 3. Изменение целевой функции с итерациями, $a_1=0,25$; $a_2=0,25$; $a_3=0,25$; $a_4=0,25$

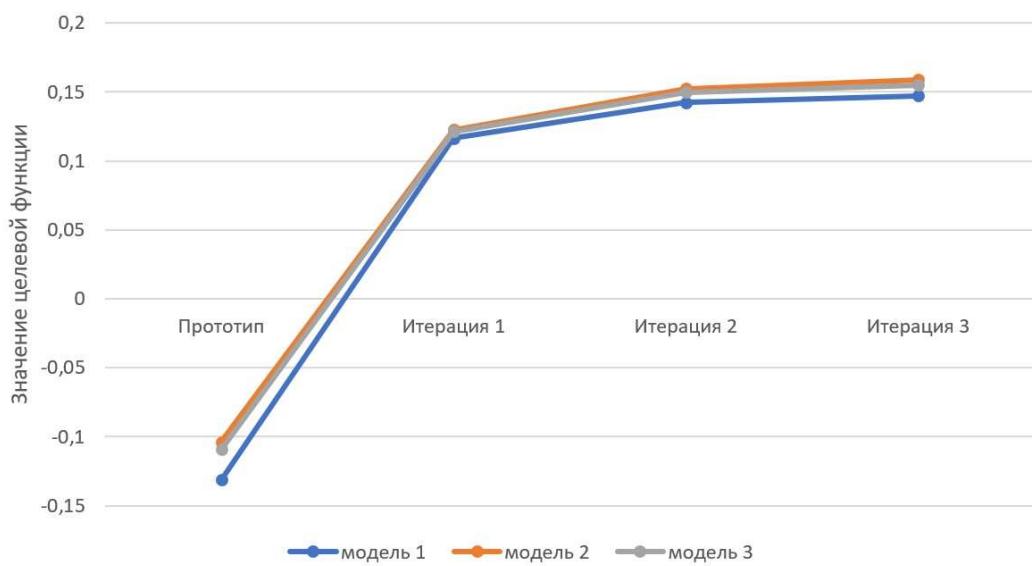
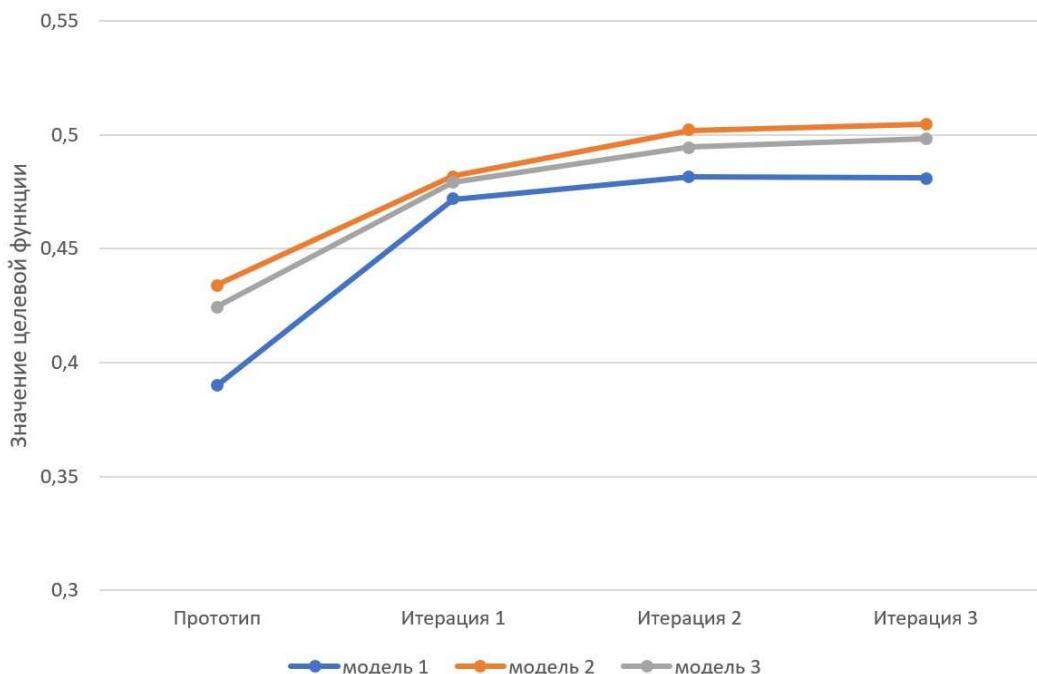
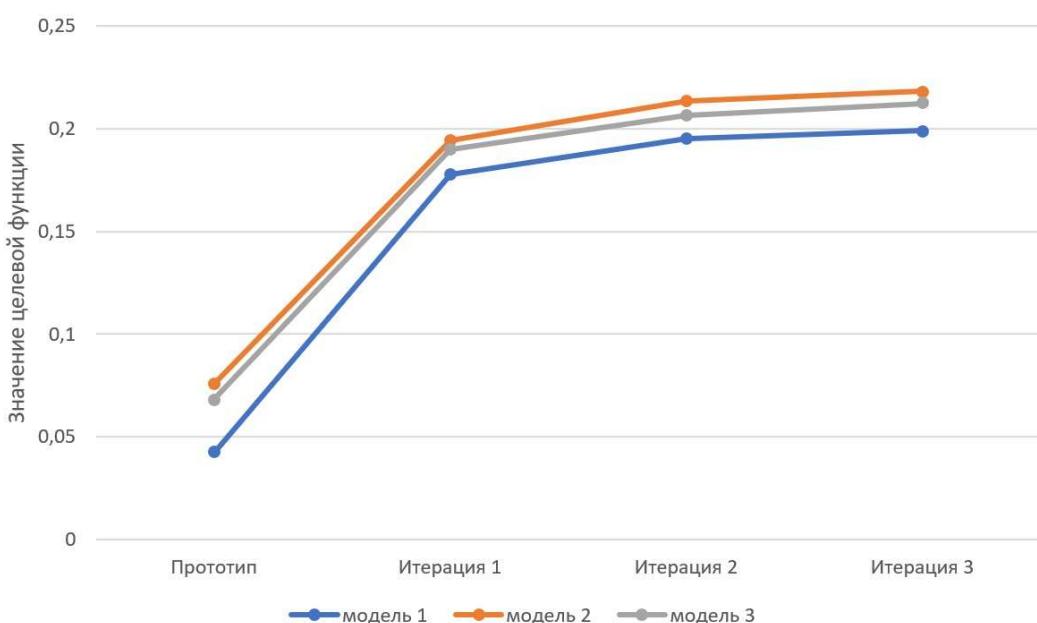


Рис. 4. Изменение целевой функции с итерациями, $a_1=0,5$; $a_2=0,5$; $a_3=0$; $a_4=0$

Рис. 5. Изменение целевой функции с итерациями, $a_1=0,8$; $a_2=0,2$; $a_3=0$; $a_4=0$ Рис. 6. Изменение целевой функции с итерациями, $a_1=0,6$; $a_2=0,35$; $a_3=0,05$; $a_4=0$

На основании расчетов были определены варианты оптимизации рассматриваемой насадки регенеративного теплообменника, получены следующие результаты:

- решения оптимизационной задачи по трем линеаризованным моделям близки, максимальное отличие результатов получено для однопараметрической задачи — возможность увеличения коэффициента регенерации на 10 — 20 %;
- для всех наборов весовых коэффициентов частных критериев получены значения целевой функции большие, чем у прототипа, а зависимость целевой функции от количества итераций носит асимптотический характер;
- значения целевой функции, близкие к максимальным, достигаются уже на второй и третьей итерациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования были определены частные критерии для оптимизации насадки роторного регенеративного теплообменника. Разработан метод оценки эффективности насадки регенеративного теплообменника по целевой функции с весовыми коэффициентами. На базе проведенных расчетов предложен общий подход к решению поставленной оптимизационной задачи.

Расширение применения регенеративных и рекуперативных теплообменников в судовых энергетических системах позволит существенно улучшить энергосбережение на судах.

Совершенствование систем вентиляции и кондиционирования жилых и служебных помещений (обеспечение общесудовых нужд) внесет свой вклад в поиск резервов повышения энергоэффективности судов [13]. Если судну по результатам года эксплуатации присвоен рейтинг СП Е или три года подряд присваивался рейтинг D, то на судне должны быть разработаны меры по повышению энергоэффективности [14]. В качестве одной из таких мер, не обременительной для судовладельца, можно предложить оборудование регенеративными теплообменниками роторного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцев С.И. Современный подход к кондиционированию воздуха на кораблях и судах / С.И. Бурцев // Судостроение. — 2016. — № 5. — С. 42 — 45.
2. Чернов А.И. Проектирование вспомогательных энергетических установок судов: Установки кондиционирования воздуха: уч. пос. / А.И. Чернов. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2024. — 99 с.
3. Есев А.И. Оптимизация процессов кондиционирования воздуха на судах-балкерах / А.И. Есев // Znanstvena misel. — 2022. — № 66. — С. 49 — 54.
4. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения: справочник в 2 кн. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. — М.: Типлотехник, 2005. — 768 с.
5. Кокорин О.Я. Энергосбережение в системах отопления, вентиляции, кондиционирования / О.Я. Кокорин. — М.: АСВ, 2013. — 256 с.
6. Дуболазова Л.В. Эффективность работы теплоутилизаторов систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Л.В. Дуболазова // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли: м-лы Нац. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Владивосток, 2025. — С. 366 — 370.
7. Shah R.K. Fundamentals of heat exchanger design / R.K. Shah, D.P. Sekulic. — John Wiley & Sons, 2003. — 976 p.
8. Yilmaz T. Design of regenerative heat exchangers / T. Yilmaz, O. Büyükkalaca // Heat Transfer Engineering. — 2003. — Vol. 24, Issue 4. — P. 32 — 38. — DOI 10.1080/01457630304034.
9. Cicek K. Selection of porous materials in marine system design: The case of heat exchanger aboard ships / K. Cicek, M. Celik // Materials and Design. — 2009. — Vol. 30, Issue 10. — P. 4260 — 4266.
10. Серов А.А. Методика расчета эффективности регенеративного теплообменника / А.А. Серов, А.С. Шилин // Актуальные проблемы морской энергетики: м-лы Восьмой междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ 2019. — С. 303 — 307.
11. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: уч. пос. / А.П. Карпенко. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. — 446 с.
12. Иванова О.А. Применение метода ранговой корреляции на стадии концептуального проектирования морских технических сооружений / О.А. Иванова, А.В. Родькина // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 63 — 73.
13. Шурпяк В.К. Оценка влияния основных судовых систем на показатели энергетической эффективности судов / В.К. Шурпяк, А.А. Серов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48/49. — С. 95 — 103.
14. Шурпяк В.К. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу / В.К. Шурпяк, С.А. Толмачев, М.В. Мусонов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 4 — 18. — EDN GSJPWF.

REFERENCES

1. Burtsev S.I. Sovremennyi podkhod k konditsionirovaniyu vozdukha na korablyakh i sudakh [Modern approach to air conditioning onboard ships and vessels]. *Sudostroenie*. 2016. No. 5. P. 42 — 45.
2. Chernov A.I. Proektirovaniye vspomogatel'nykh energeticheskikh ustroystv sudov: Ustanovki konditsionirovaniya vozdukha [Design of auxiliary power installations of ships: Air conditioning units: a study guide]. St. Petersburg: SPbSMTU, 2024. 99 p.
3. Yesyev A.I. Optimization of air conditioning processes on bulk carriers ships. *Znanstvena misel.* 2022. № 66. S. 49 — 54. (In Russ.)
4. Lisienko V.G. Shchelokov Ya.M., Ladygichev M.G. Khrestomatiya energosberezheniya [Chrestomathy on energy saving: reference book in 2 vols]. Moscow: Teplotekhnika, 2005. 768 p.
5. Kokorin O.Y. Energosberezhenie v sistemakh otopleniya, ventilyatsii, konditsionirovaniya [Energy saving in heating, ventilation, air conditioning systems]. Moscow: ACB, 2013. 256 p.
6. Dubolazova L.V. The efficiency of the heat exchangers of ventilation and air conditioning systems. *Comprehensive Research in the Fisheries Industry: Proceedings of the National Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Vladivostok, 2025. P. 366 — 370. (In Russ.)
7. Shah R.K., Sekulic D.P. Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley & Sons, 2003. 976 p.
8. Yilmaz T., Büyükalaca O. Design of regenerative heat exchangers. *Heat Transfer Engineering*. 2003. Vol. 24, Issue 4. P. 32 — 38. DOI 10.1080/01457630304034.
9. Cicek K., Celik M. Selection of porous materials in marine system design: The case of heat exchanger aboard ships. *Materials and Design*. 2009. Vol. 30, Issue 10. P. 4260 — 4266.
10. Serov A.A., Shilin A.S. Method of calculation of efficiency of regenerative heat exchanger. *Actual problems of marine energy: Materials of the Eighth International Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg: SPbGMTU, 2019. P. 303 — 307.
11. Karpenko A.P. Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vydokhnovlennye prirodoi [Modern algorithms of search optimization. Algorithms inspired by nature: a study guide]. Moscow: MGTU N.E. Baumana. 2014. 446 p.
12. Ivanova O.A., Rodkina A.V. The rank correlation method application at the conceptual design stage of offshore technical structures. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No.76. P. 63 — 73. (In Russ.)
13. Shurpyak V.K., Serov A.A. Evaluation of influence of main ship systems on the ship energy efficiency indices. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017. No. 48/49. P. 95 — 103. (In Russ.)
14. Shurpyak V.K., Tolmachev S.A., Musonov M.V. New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 4 — 17. (In Russ.)

УДК 621.833
EDN YQSQHC

ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНЫЕ РЕДУКТОРЫ ДЛЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Л.П. Сенчурин, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: senchurin@live.ru

С.В. Черенкова, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: svchpar@list.ru

М.А. Иванова, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: wosea@mail.ru

Статья посвящена рассмотрению возможности использования планетарно-цевочных редукторов в судовых энергетических установках большой мощности.

Работа является продолжением теоретических исследований циклоидальных передач. В ней получены силовые соотношения в звеньях и узлах циклоидально-цевочной передачи типа К-Н-В. Проведена аппроксимация максимальной силы в контакте цевка-сателлит в зависимости от числа цевок, то есть от передаточного отношения.

Для визуальной оценки конструкции и размеров передачи, рассчитанной по заданным геометрическим и силовым параметрам, в среде Mathcad осуществлено построение эскиза. Приведен эскиз передачи К-Н-В с распределением сил в контактах цевок и сателлита, пальцев и сателлита, и силами, нагружающими подшипник.

Выполнена эскизная компоновка планетарно-цевочного редуктора с передачей К-Н-В, рассчитанного на мощность 50 МВт. Проведено сравнение конструкций планетарно-цевочных передач одинаковой мощности, с теми же передаточным отношением и моментом на выходном валу.

Ключевые слова: планетарно-цевочный редуктор, планетарно-цевочная передача, судовые энергетические установки, большая механическая мощность, конструкции редукторов.

Для цитирования: Сенчурин Л.П. Планетарно-цевочные редукторы для судовых энергетических установок большой мощности / Л.П. Сенчурин, С.В. Черенкова, М.А. Иванова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 166 — 176. — EDN YQSQHC.

CYCLOID GEARBOXES FOR MARINE POWER PLANTS OF HIGH CAPACITY

L.P. Senchurin, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotmanskaya ul., 3, e-mail: senchurin@live.ru

S.V. Cherenkova, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotmanskaya ul., 3, e-mail: svchpar@list.ru

M.A. Ivanova, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotmanskaya ul., 3, e-mail: wosea@mail.ru

The article considers the possibility of using cycloid gearboxes in high capacity marine power plants.

The work is a continuation of theoretical studies of cycloidal gears. The power ratios in the links and nodes of the K-H-V type cycloidal gear transmission are obtained.

For a visual assessment of the design and dimensions of the transmission, a sketch has been created in the Mathcad. The sketch of the transmission with the distribution of forces in the contacts of the elements, and the forces loading the bearing is given in the article.

A sketch layout of a cycloidal gearbox with a K-H-V transmission, designed for a power of 50 MW, has been completed. A comparison was made of the designs of cycloidal transmissions of the same power, with the same gear ratio and torque on the output shaft.

Keywords: planetary cycloid gear, planetary cycloid gearbox, marine power plants, high mechanical power, gearbox designs.

For citation: Senchurin L.P., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Cycloid gearboxes for marine power plants of high capacity. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 166 — 176. EDN YQSQHC. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение новых технологий, новых способов передачи движения или новых передач в судостроении остается актуальной задачей. Применение передач с циклоидальным зацеплением в различных отраслях промышленности обусловлено необходимостью создания высокотехнологичной продукции при возрастающих требованиях к механическим приводам по нагрузочной способности, высокой точности, надежности, компактности [1, 2]. Основы теории таких передач были опубликованы в 1950-е годы [3 — 5], но массовое распространение они получили в начале XXI века.

В определенных диапазонах эксплуатационные показатели редукторов с планетарно-цевочными передачами превосходят показатели планетарных редукторов [6]. Преимущества их по нагрузочной способности и компактности обусловлены многопарностью зацепления, правда, это сопровождается повышенными требованиями к точности изготовления.

В нашей стране планетарно-цевочные передачи находят применение в высокоточном оборудовании [2, 6 — 10].

Для применения в области судостроения в работе [11] предложено заменить в судовых АЭУ используемые планетарные редукторы новыми планетарно-цевочными редукторами.

По данным из опубликованных источников, как зарубежных, так и отечественных, номинальные моменты на выходе планетарно-цевочных редукторов достигают значительных величин, но скорости вращения невелики, что соответствует передаваемым мощностям не более чем в сотни киловатт [12 — 17].

Мощности судовых энергетических установок могут составлять десятки мегаватт [11, 18, 19]. В связи с этим появилась необходимость исследования циклоидных передач с возможностью применения их в судостроении для передачи больших мощностей.

Авторами статьи были проведены теоретические исследования геометрии и кинематики циклоидальных передач с цевочным зацеплением типа К-Н-В (рис. 1 a) и 2К-В (рис. 1 b) [20 — 23].

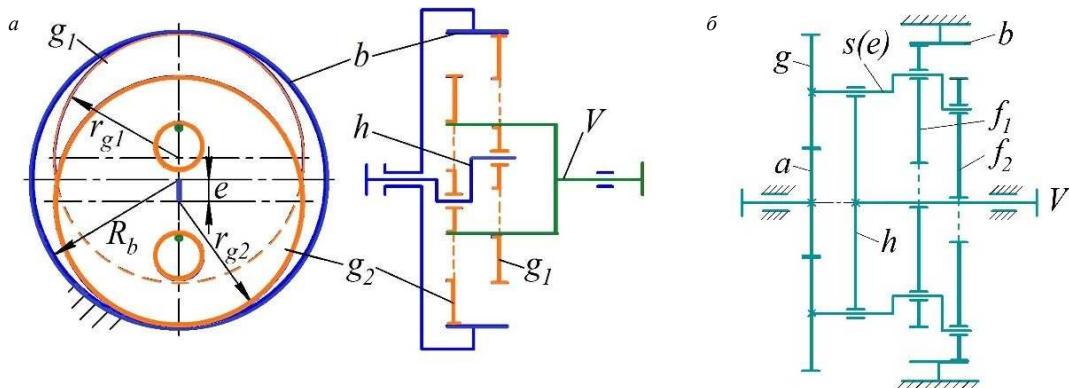


Рис. 1. Кинематическая схема передачи: a — К-Н-В; b — 2К-В;
 h — водило; g_1, g_2, f_1, f_2 — сателлиты; b — цевочное колесо; V — выходной вал

Далее были теоретически изучены силовые и нагрузочные возможности планетарно-цевочной передачи 2К-В [17, 24] с целью применения в судовых энергетических установках. На основе разработанных методик выполнены расчеты этой передачи с передаточным отношением 25, моментом на выходном валу $3,3 \cdot 10^6$ Н·м и передаваемой мощностью 50 МВт. По результатам расчетов представлен эскиз двухступенчатого редуктора 2К-В. Проведено сравнение с планетарным механизмом [17].

Данная статья посвящена теоретическому исследованию силовых соотношений в звеньях и узлах планетарно-цевочной передачи К-Н-В.

На основе полученных результатов выполнены расчеты этой передачи с передаточным отношением 25, моментом на выходном валу $3,3 \cdot 10^6$ Н·м и передаваемой мощностью 50 МВт.

Исследования проводились в среде Mathcad.

На рис. 2 приведен эскиз передачи К-Н-В, на котором показаны векторы сил, действующих в контактах цевок и сателлита g_1 (F_{bg}), пальцев и сателлита g_1 (F_{Vg}), и сил, нагружающих подшипник. Сателлит g_2 и силы, действующие на него, на рис. 2 не показаны.

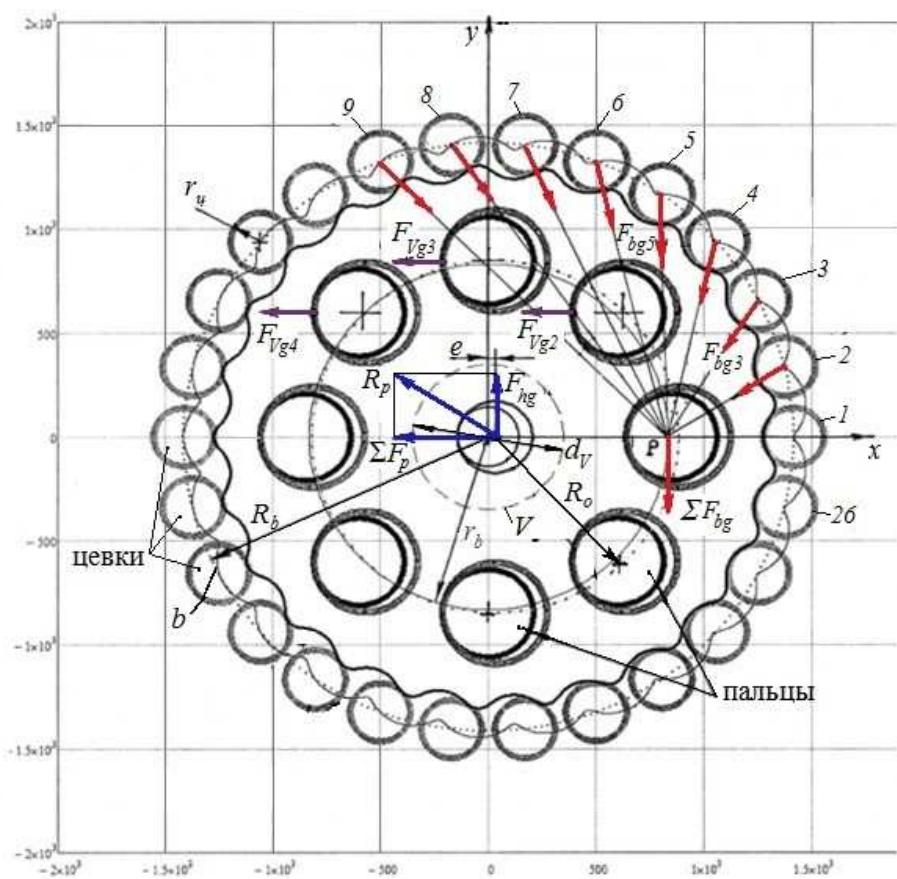


Рис. 2. Эскиз передачи К-Н-В с силами в парах цевка/сателлит g_1 , палец МПК/сателлит g_1 , подшипник/сателлит g_1 при $\varphi_h=0$

Ниже приведена формула для расчета силы в контакте цевка/сателлит в зависимости от номера цевки i , углового положения $\varphi_h(t)$ входного эксцентрикового вала передачи, его эксцентриситета e , коэффициента удлинения эпициклоиды λ_b и момента на сателлите T_g :

$$F_{bg}(i, t, K, e, z_1, \lambda_b, T_g) = \frac{-0,5 T_g S\bar{N}\zeta(i, t, K, e, z_1, \lambda_b)}{e \cdot z_1 [\sum_{i=1}^{\text{ceil}(0,33(z_1+1))} (S\bar{N}\zeta(i, t, K, e, z_1, \lambda_b))^2]}.$$

На рис. 3 представлен график распределения сил в контакте цевка/сателлит в положении механизма $\varphi_h=0$ в зависимости от номера цевки. На графике видно, что из 26 цевок нагружена третья: со второй по девятую.



Рис. 3. Силы в контакте цевка/сателлит при $\varphi_h=0$

Исследования показали, что коэффициент удлинения эпициклоиды λ_b и эксцентриситет e сателлита на входном валу в определенных диапазонах не влияют на силу в контакте. Относительная сила

$$F_{0bg}(i, t, K, e, z_1, \lambda_b, T_g) = \frac{F_{bg}(i, t, K, e, z_1, \lambda_b, T_g)}{(0,5T_g)/(e \cdot z_1)} \quad (1)$$

На рис. 4 представлены графики расчета максимальных относительных сил, которые практически совпадают при различных значениях этих параметров.

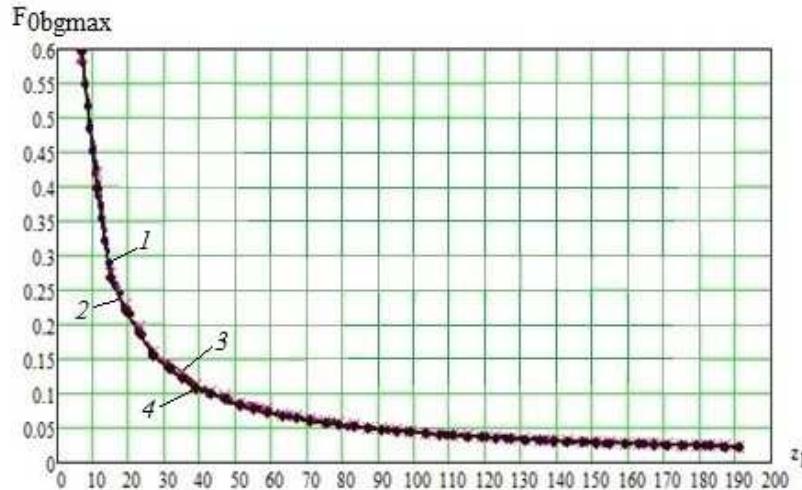


Рис. 4. Расчеты максимальных сил по теоретической формуле (1): 1 — при $\lambda_b=1,7$ и $e=8$; 2 — при $\lambda_b=2,5$ и $e=5$; 3 — при $\lambda_b=2,5$ и $e=1,5$; 4 — при $\lambda_b=1,45$ и $e=35$

Поэтому для упрощения инженерных расчетов была получена формула аппроксимации максимальной силы в контакте в зависимости от числа зубьев сателлита z_1 , то есть от передаточного числа:

$$F_{an0bgmax}(z_1) = 4,153 \cdot z_1^{-0,996} + 8,913 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

На рис. 5 приведены графические зависимости максимальной относительной (удельной) силы в контакте, вычисленные по теоретической формуле (1) и по формуле аппроксимации (2).

Из рис. 5 очевидно, что графическая зависимость $F_{an0bgmax}(z_1)$ дает полное совпадение с теоретической зависимостью $F_{0bgmax}(i, t, K, e, z_1, \lambda_b, T_g)$.

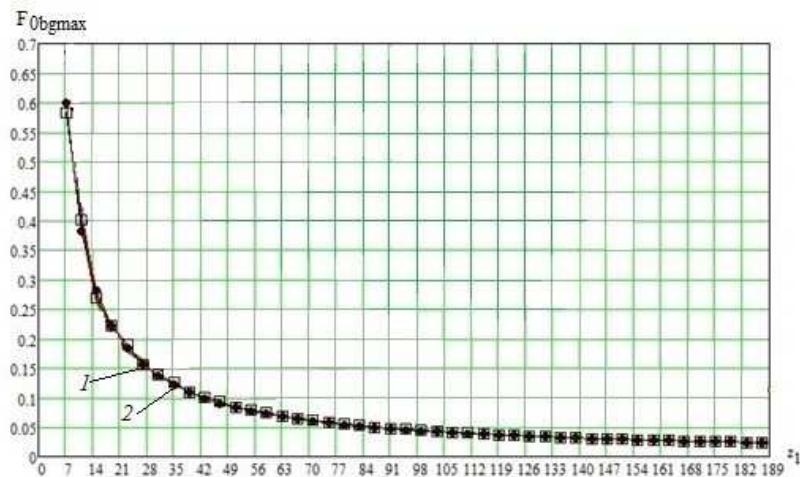


Рис. 5. Графики максимальной относительной силы в контакте цевка/сателлит: 1 — по формуле (1); 2 — по формуле (2)

Относительная сила в контакте палец/сателлит

$$F_{0Vg}(n, N) = \frac{\sin [2\pi(n-1)/N] \cdot \Phi[\sin [2\pi(n-1)/N]]}{\sum_{n=1}^{0,5N} [\sin [2\pi(n-1)/N]]^2}.$$

Характерная сила

$$F_{pal}(e, z_1, \lambda_b, T_g) = \frac{0,5T_g}{R_o(e, z_1, \lambda_b)}.$$

Сила в контакте палец/сателлит (см. рис. 2)

$$F_{Vg} = F_{0Vg}(n, N) \cdot F_{pal}(e, z_1, \lambda_b, T_g).$$

На рис. 6 показан график сил в контакте палец/сателлит. В положении механизма $\varphi_h = 0$ загружены пальцы 2, 3 и 4 (см. рис. 2).

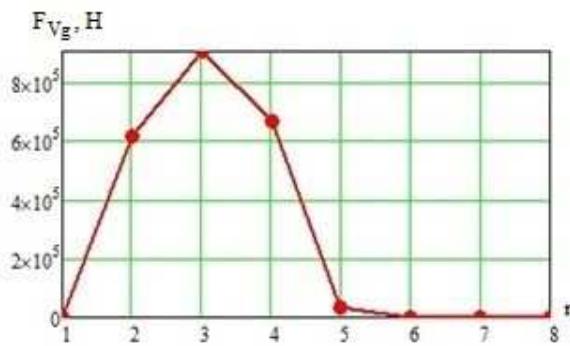


Рис. 6. Сила в контакте пальцев МПК с сателлитом g_1

Для построения эскиза передачи были проведены следующие исследования:

- изменение радиуса кривизны зуба сателлита в зависимости от геометрии зацепления при сохранении величины радиуса цевочной окружности (рис. 7);
- изменение радиуса кривизны зуба сателлита в зависимости от эксцентриситета. Увеличение эксцентриситета не ведет к росту радиуса кривизны зуба в зоне выпуклости при сохранении неизменным радиуса цевки. Нагрузка на подшипник уменьшается, но максимальное контактное напряжение на цевках увеличивается;

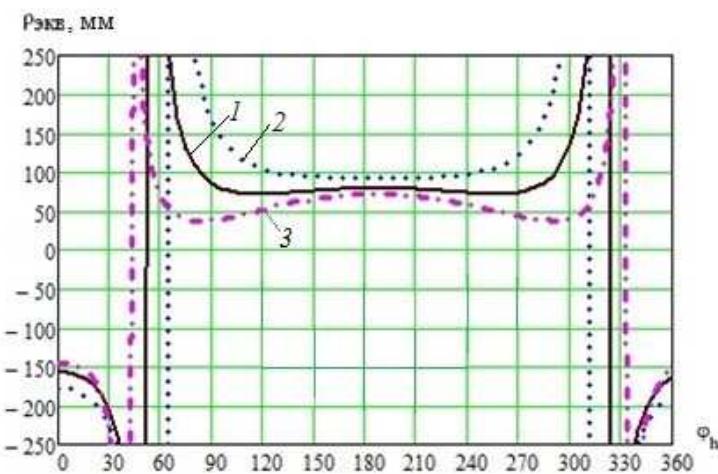


Рис. 7. Радиус кривизны профиля зуба сателлита с числом зубьев $z_1 = 25$ и $r_u = 140$ мм:
1 — при $e = 32$ мм, $\lambda_b = 1,7$; 2 — при $e = 25$ мм, $\lambda_b = 2,176$; 3 — при $e = 40$ мм, $\lambda_b = 1,63$

- изменение радиуса кривизны зуба сателлита в зависимости от радиуса цевки. Рост радиуса цевки приводит к заострению вершины зуба, а также резкому уменьшению радиуса кривизны профиля в зоне сопряжения вогнутости и выпуклости зуба. Что ограничивает диаметр оси цевки, определяет напряжения изгиба на оси и контактные напряжения в зацеплении (рис. 8).

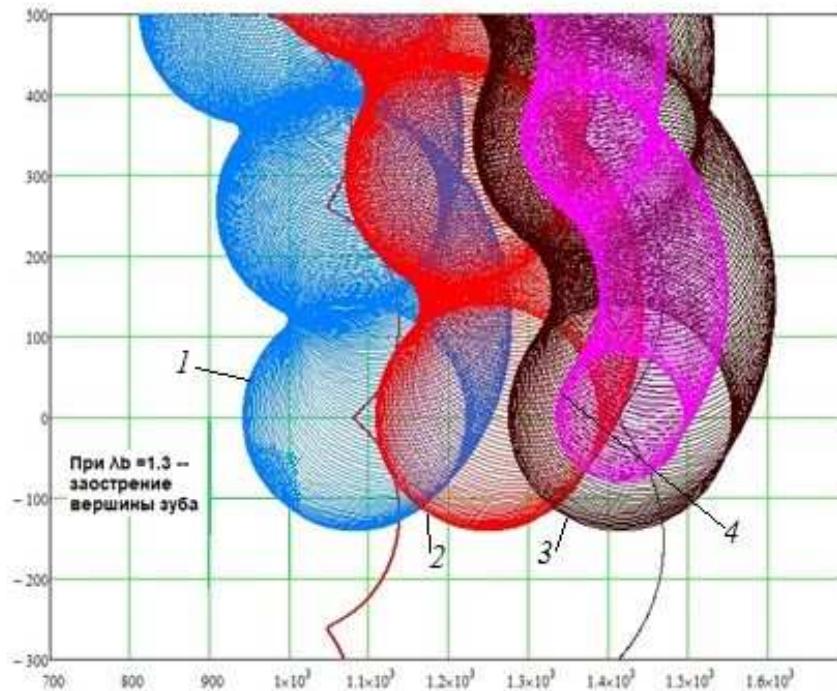


Рис. 8. Профиль зуба сателлита в зависимости от радиуса цевки и коэффициента удлинения эпиклоиды:
1 — при $\lambda_b = 1,3$ и $r_n = 140$ мм; 2 — при $\lambda_b = 1,5$ и $r_n = 140$ мм; 3 — при $\lambda_b = 1,7$ и $r_n = 140$ мм; 4 — при $\lambda_b = 1,7$ и $r_n = 80$ мм

Вопрос оптимизации геометрии передачи решался в Mathcad методом итераций с варьированием эксцентричеситета, коэффициента удлинения эпирохоиды, радиуса цевок, радиуса пальцев МПК и с построением в каждой итерации эскиза. Эскиз служит для оценки уровня приближения характерных размеров к оптимальным. Расчет передачи в ходе итераций заканчивается в Mathcad построением окончательного эскиза с оптимальными параметрами при минимальном диаметре цевочного колеса (рис. 9).

В итоге были приняты близкие к оптимальным значения: $e = 32$ мм, $r_n = 140$ мм, $\lambda_b = 1,7$, при минимальном радиусе цевочной окружности $R_b = 1414$ мм. Максимальные контактные напряжения на цевках при этом составляют 1050 МПа. Эти напряжения при фиксированном радиусе цевочной окружности соответствуют допускаемому по изгибной прочности минимальному радиусу цевки в 140 мм.

Напряжения в контакте пальцев с сателлитом составляют 260 МПа. Диаметры осей цевок и осей пальцев получены из условия прочности по напряжениям изгиба при допускаемом напряжении 70 МПа. Контактные напряжения на профиле зуба сателлита показаны на рис. 10.

Максимальные напряжения в контакте цевки 5 с выпуклой частью зуба в точке минимального радиуса кривизны его эпирохоиды (см. рис. 3, 7, 10) при угле поворота водила 120° не превышают допускаемые напряжения.

На рис. 11 дан график колебания суммарной силы R_p (см. рис. 2) на подшипнике сателлита.

Амплитуда колебания нагрузки на опоры сателлитов не превышает 2,5 % в течение одного оборота входного вала.

По результатам расчетов выполнена эскизная компоновка планетарно-цевочного редуктора с передачей К-Н-В (рис. 12).

Далее для этой передачи была выполнена проверка работоспособности подшипников скольжения циклоидальных сателлитов. Подшипники расположены на эксцентриковом валу — входном валу передачи. Подшипники работают в режиме жидкостного трения. Проверка: по минимальной толщине смазочной пленки, по удельной нагрузке, ламинарному режиму течения смазки (рис. 13).

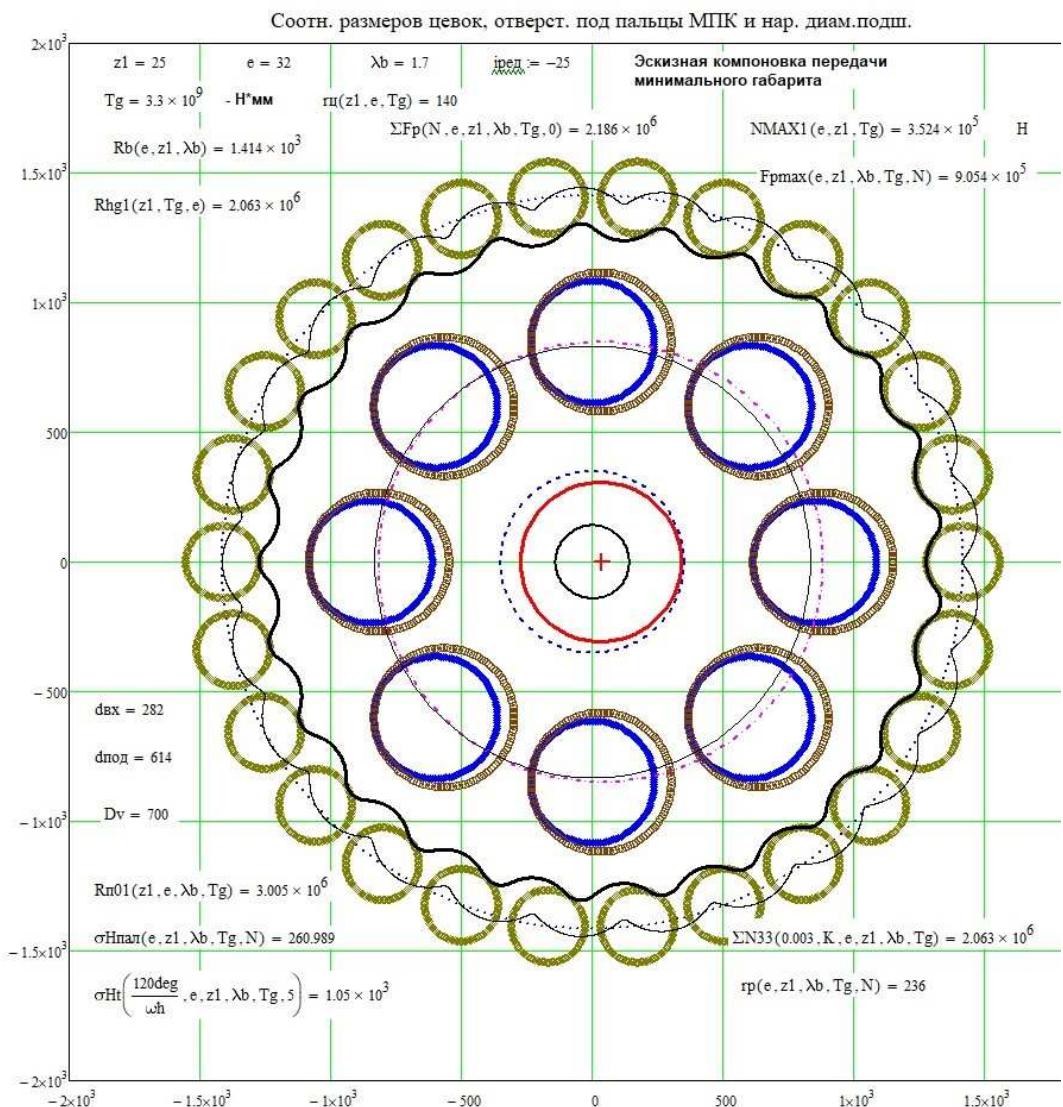


Рис. 9. Эскиз передачи К-Н-В

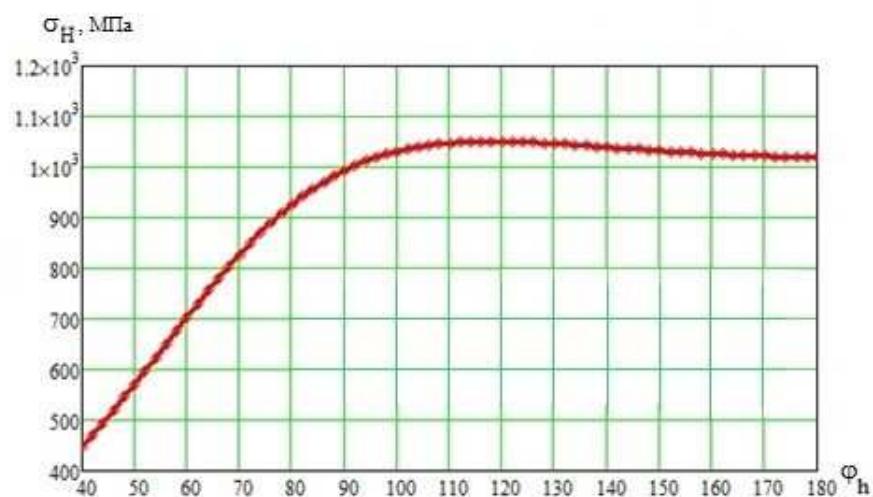


Рис. 10. Контактные напряжения на профиле зуба циклоидального сателлита в контакте с цевкой 5

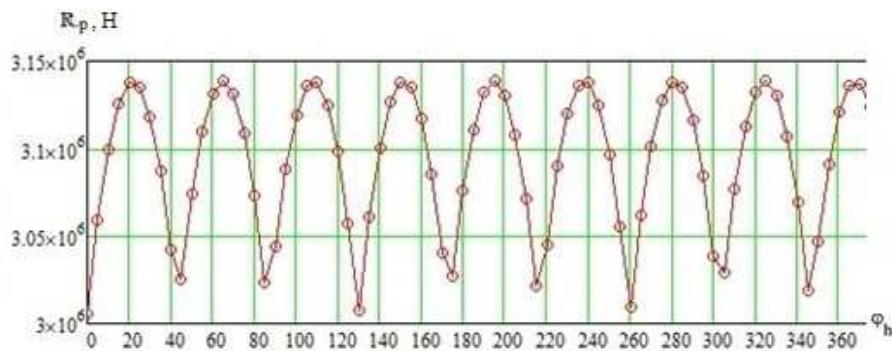


Рис. 11. Колебание суммарной радиальной силы на подшипнике сателлита

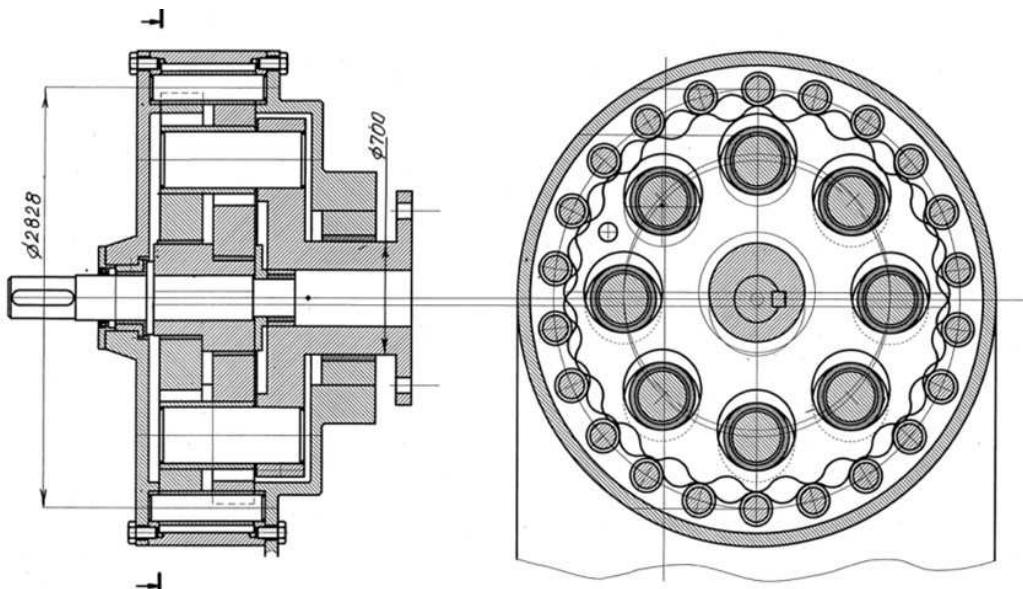


Рис. 12. Эскизная компоновка планетарно-цевочного редуктора

Окончательные параметры подшипника:

$$d = 450 \quad \psi = 2 \times 10^{-3} \quad \rho = 881 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \mu = 0.029 \text{ Па}\cdot\text{с} \quad \text{tcp} = 48.585$$

$$\omega \Sigma = 376.991 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad V = 84.823 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad I = 630 \quad \Delta = 0.45$$

$$W = 1.989 \times 10^6 \text{ Н} \quad \text{-- нагрузка на подшипник} \quad P_{\text{уд}} := \frac{W}{d \cdot I}$$

$$P_{\text{уд}} = 7.017 \text{ МПа} \quad \text{-- удельная нагрузка на подшипник}$$

Расчетный критерий Рейнольдса:

$$Re := \frac{d \cdot 10^{-3} \omega \Sigma \cdot \psi \cdot d \cdot 10^{-3} \cdot \rho}{4 \cdot \mu} \quad Re = 1.16 \times 10^3 \quad \text{доп} := 1$$

Критическое значение критерия Рейнольдса:

$$Re_{\text{доп}} := 41.3 \cdot \sqrt{\frac{d \cdot 10^{-3}}{\Delta \cdot 10^{-3}}} = 1.306 \times 10^3 \quad Re_{\text{кр}} := 41.3 \cdot \sqrt{\frac{2}{\psi}} = 1.306 \times 10^3 \quad Re_{\text{кр}} = 1.306 \times 10^3$$

$$Re < Re_{\text{доп}} \quad \text{-- режим ламинарный}$$

Рис. 13. Параметры подшипника циклоидального сателлита на эксцентриковом валу

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования силовых соотношений в звеньях и узлах планетарно-цевочной передачи К-Н-В позволили получить распределение сил в контактах цевок и сателлита, пальцев и сателлита, силы, нагружающие подшипник.

Представлены формула для расчета силы в контакте цевка/сателлит в зависимости от номера цевки, углового положения входного эксцентрикового вала передачи, его эксцентриситета, коэффициента удлинения эпициклоиды и момента на сателлите и формула для расчета силы в контакте палец/сателлит.

Для упрощения инженерных расчетов проведена аппроксимация формулы максимальной силы в контактах цевка/сателлит.

С целью оптимизации конструкции передачи по заданным геометрическим и силовым параметрам построены эскизы в среде Mathcad.

В результате оптимизации получена эскизная компоновка редуктора типа К-Н-В минимальных габаритов с передаточным отношением 25, вращающим моментом на выходном валу 3,3 МН·м и передаваемой мощностью 50 МВт.

Сравнение эскизных компоновок редукторов с передачами 2К-В [17] и К-Н-В показывает, что более компактным оказывается редуктор с передачей К-Н-В. Сравнение с полученным в [17] планетарным двухступенчатым редуктором показывает, что диаметральный размер планетарной передачи меньше, чем в 2К-В и К-Н-В, но осевая протяженность планетарной передачи больше.

Таким образом, габариты планетарно-цевочных редукторов лимитируются не контактной прочностью зацепления, как в планетарной передаче, а изгибной прочностью эксцентриковых валов, удельными нагрузками на опоры этих валов и опоры циклоидальных сателлитов.

Выполненные теоретические исследования о преимуществе планетарно-цевочных редукторов для судовых энергетических установок большой мощности нуждаются в экспериментальной проверке.

В качестве одного из направлений для дальнейших исследований о применимости планетарно-цевочных редукторов на морских судах в составе судовых энергетических установок необходимо проверить работоспособность данных передач в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемов И.И. Обеспечение качества планетарно-цевочных передач при проектировании и производстве / И.И. Артемов, Е.А. Чуфистов, А.В. Липов, О.Е. Чуфистов и др. // Известия высших учебных заведений. Технические науки. — 2018. — № 3 (47). — С. 124 — 139.
- Поляков А.Н. Методические аспекты изучения мехатронных модулей / А.Н. Поляков, С.В. Каменев, К.С. Романенко, Н.А. Кузьменко // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: м-лы Всероссийской науч.-метод. конф. — Оренбург: ОГУ, 2016. — С. 187 — 190.
- Шаников В.М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В.М. Шаников. — М.; Л.: Машгиз, 1948. — 172 с.
- Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи с цевочным зацеплением / В.Н. Кудрявцев // Труды семинара по теории машин и механизмов. — 1949. — Т.ВIII, вып. 29. — С. 64 — 67.
- Юдин В.А. Основы теории планетарно-цевочного редуктора с внутренним внеполюсным зацеплением / В.А. Юдин // Труды семинара по теории машин и механизмов. — 1948. — Т. IV, вып.13. — С. 42 — 76.
- Киреев С.О. Планетарные передачи с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением в машиностроении (обзор) / С.О. Киреев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 7 (58). — С. 1051 — 1058. — EDN OXVHQX.
- Пряничников В.Е. Анализ возможности применения планетарно-цевочного редуктора для манипулятора сервисного робота Амур-307 и шагающего подводного аппарата / В.Е. Пряничников, М.Д. Соловьева, Р.Б. Тарасов, В.В. Чернышев // Экстремальная робототехника. — 2020. — № 1 (31). — С. 100 — 103. — EDN KZZSHY.
- Иванов А.С. Конструктивные исполнения планетарно-цевочных редукторов для высокоточных следящих приводов / А.С. Иванов, М.М. Ермолова, Д.Э. Крикунов, А.А. Мирошник и др. // Вестник машиностроения. — 2013. — № 3. — С. 9 — 12. — EDN RAVOLL.
- Чуфистов Е.А. Главная передача грузового автомобиля с планетарно-цевочной передачей / Е.А. Чуфистов, О.Е. Чуфистов, Р.М. Курманов // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. XI Междунар. науч.-тех. конф. — Пенза: Приволжский Дом знаний, 2016. — С. 110 — 115.
- Артемов И.И. Универсальный привод с планетарно-цевочной передачей / И.И. Артемов, Е.А. Чуфистов, О.Е. Чуфистов // XXI: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2019. — Т. 8. — № 1 (45). — С. 122 — 126.
- Киреев С.О. Планетарно-цевочные редукторы для судовых атомных энергетических установок / С.О. Киреев, П.Г. Сидоров, А.В. Синев // Судостроение. — 2012. — № 2 (801). — С. 43 — 46. — EDN OZCTDL.
- Sumitomo [каталог]. [Электронный ресурс] URL: <https://sumitomo-drive.ru/catalogs/> (дата обращения 26.09.2025).
- Nabtesco [каталог]. [Электронный ресурс] URL: <https://www.drivemeh.ru/category/nabtesco/> (дата обращения 26.09.2025).
- Планетарно-цевочные редукторы ПЦР. [Электронный ресурс] URL: <https://avvi.ru/eng/products/pcr/> (дата обращения 26.09.2025).
- Редукторы, мотор-редукторы планетарно-цевочные: каталог / НТЦ «Редуктор». — СПб., 2005. — 32 с.

16. Приводная механика. Циклоидные общепромышленные мотор-редукторы Nidec Shimpo Circulate 3000 [Электронный ресурс] <https://www.drivemeh.ru/nidec-shimpo/czikloidnye-obshhepromyshlennye-motor-reduktor>.
17. Сенчурин Л.П. К вопросу о применении планетарно-цевочных редукторов в СЭУ / Л.П. Сенчурин, С.В. Черенкова, М.А. Иванова // Актуальные проблемы морской энергетики: м-лы одннадцатой междунар. науч.-тех. конф., Санкт-Петербург, 17 — 18 февраля 2022 г. — СПб.: СПбГМТУ, 2022. — С. 137 — 145. — DOI 10.52899/9785883036322_137_145. — EDN XKOCEU.
18. Иванченко А.А. Перспективы применения инновационных газотурбинных технологий в составе КСЭУ судов класса «Афрамакс» / А.А. Иванченко, Л.С. Венциолис, Г.А. Конев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 126 — 149. — EDN VQEJZD.
19. Володин Ю.Г. Особенности теплообменных процессов при пуске судового газотурбинного двигателя / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина, Ю.И. Матвеев, Н.В. Гречко и др. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 105 — 111. — EDN TNIELE.
20. Сенчурин Л.П. О коэффициенте полезного действия планетарно-цевочных редукторов / Л.П. Сенчурин // Актуальные проблемы морской энергетики: м-лы восьмой междунар. науч.-тех. конф., Санкт-Петербург, 21 — 22 февраля 2019 г. — СПб.: СПбГМТУ, 2019. — С. 298 — 303. — EDN SRKQXS.
21. Сенчурин Л.П. К вопросу о кинематике планетарной передачи 2K-V / Л.П. Сенчурин // Теория механизмов и машин. — 2019. — Т. 17, № 4 (44). — С. 127 — 133. — DOI 10.5862/TMM.44.1. — EDN OYODND.
22. Сенчурин Л.П. Компьютерная анимация схемы цевочно-циклоидального дифференциала / Л.П. Сенчурин, С.В. Черенкова, М.А. Иванова // Современное машиностроение: Наука и образование. — 2019. — № 8. — С. 274 — 288. — DOI 10.1872/MMF-2019-23. — EDN TJJVNH.
23. Иванова М.А. Практикум по прикладной механике и деталям машин: сб. лаб. и практ. работ / М.А. Иванова, Л.П. Сенчурин, С.В. Черенкова. — СПб.: СПбГМТУ, 2024. — 152 с. — EDN ZHYWAA.
24. Сенчурин Л.П. К вопросу о силовом расчете планетарно-цевочных передач / Л.П. Сенчурин, М.А. Иванова, С.В. Черенкова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2021. — Спец. вып. 1. — С. 94 — 97. — DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-94-97. — EDN DRRMBL.

REFERENCES

1. Artemov I.I., Chufistov E.A., Lipov A.V., Chufistov O.E. et al. Providing the quality of planetary-lantern transmissions at designing and manufacturing. *University proceedings. Engineering sciences*. 2018. No. 3 (47). P. 124 — 139. (In Russ.)
2. Polyakov A.N., Kamenev S.V., Romanenko K.S., Kuz'menko N.A. Metodicheskie aspekty izucheniya mekhatronnyh modulej [Methodological aspects of studying mechatronic modules]. *Universitetskij kompleks kak regional'nyj centr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii [University complex as a regional center of education, science and culture: Proc. of the All-Russian science and method. conf.]*. Orenburg: OGU, 2016. P. 187 — 190.
3. Shannikov V.M. Planetarnye reduktory s vnecentroidnym zacepleniem [Planetary reducers with eccentric gearing]. Moscow; Leningrad: Mashgiz, 1948. 172 p.
4. Kudryavcev V.N. Planetarnye peredachi s cevochnym zacepleniem [Planetary gears with lantern gear]. *Trudy seminara po teorii mashin i mekhanizmov [Proceedings of the seminar on the theory of machines and mechanisms]*. 1949. T. VIII, Issue. 29. P. 64 — 67.
5. Yudin V.A. Osnovy teorii planetarno-cevochnogo reduktora s vnutrennim vnepolyusnym zacepleniem [Fundamentals of the theory of cycloid gearbox with internal outpole gearing]. *Trudy seminara po teorii mashin i mekhanizmov [Proceedings of the seminar on the theory of machines and mechanisms]*. 1948. T. IV, Issue 13. P. 42 — 76.
6. Kireev S.O. Planetary gear with off-centroid inner cogging in mechanical engineering (survey). *Vestnik of Don State Technical University*. 2011. Vol. 11, No. 7 (58). P. 1051 — 1058. (In Russ.)
7. Pryanichnikov V.E., Solov'ev M.D., Tarasov R.B., Chernyshev V.V. Analysis of the possibility of application of the cycloidal speed reducer for the manipulator of the amur-307 service robot and the passing underwater vehicle. *Extreme Robotics*. 2020. Vol. 1, No. 1. P. 100 — 103. EDN KZZSHY. (In Russ.)
8. Ivanov A.S., Ermolaev M.M., Krikunov D.E., Miroshnik A.A. et al. Structural variations of planetary lantern wheel gear sets for high-precision follower actuators. *Vestnik mashinostroeniya [Engineering Bulletin]*. 2013. No. 3. P. 9 — 12. EDN RAVOLL. (In Russ.)
9. Chufistov E.A., Chufistov O.E., Kurmanov R.M. Main gearing of truck with planetary cycloidal gearing. *Progressivnye tekhnologii v sovremennom mashinostroenii: sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii [Progressive technologies in modern mechanical engineering: Proc. of the XI International science and tech. conf.]*. Penza: Privolzhskii Dom znanii. 2016. P. 110 — 115.
10. Artemov I.I., Chufistov E.A., Chufistov O.E. Universal actuator with planetary cycloid gear. *XXI: itogi proshloga i problemy nastoyashchego plus [Findings of the past, problematics of the present — plus]*. 2019. T. 8. No. 1 (45). P. 122 — 126. EDN OZCTDL.
11. Kireev S.O., Sidorov P.G., Sinyov A.V. Planetary cog-wheel reduction gears for marine nuclear powerplants. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2012. № 2. P. 43 — 46. (In Russ.)
12. Sumitomo [catalogue]. URL: <https://sumitomo-drive.ru/catalogs/> (accessed 26.09.2025).
13. Nabtesko [catalogue]. URL: <https://www.drivemeh.ru/category/nabtesko/> (accessed 26.09.2025).
14. Planetarno-tsevochnye reduktory PCR [Planetary cycloid gears]. URL: <https://avvi.ru/products/pcr/> (accessed 26.09.2025).
15. Reduktory, motor-reduktory planetarno-tsevochnye [Planetary cycloid gears and gear motors] / NTC «Reduktor». St. Petersburg, 2005. 32 p.
16. Privodnaya mekhanika. Tsikloidnye obshchepromyshlennye motor-reduktory Nidec Shimpo Circulate 3000 [Actuated mechanics. General purpose cycloid gear motors]. <https://www.drivemeh.ru/nidec-shimpo/czikloidnye-obshhepromyshlennye-motor-reduktor> (accessed 26.09.2025).
17. Senchurin L.P., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. On the question of the use of planetary cycloid gearboxes in ship power plants. *Aktual'nye problemy morskoi energetiki: materialy odinnadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii [Current problematics of marine power engineering: Proc. of the XI international science and tech. conf.]*. St. Petersburg: SPbGMTU. 2022. P. 137 — 145. (In Russ.)
18. Ivanchenko A.A., Ventsulis L.S., Konev G.A. Prospects of innovative gas turbine technologies application in integrated power plants of AFRAMAX tankers. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 126 — 149. EDN VQEJZD.
19. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Matveyev Yu.I., Grechko N.V., Kolyvanov V.V. Features of heat exchange processes when starting a ship turbine engine. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 105 — 111. EDN TNIELE.

20. Senchurin L.P. On the efficiency of planetary gearboxes. *Aktual'nye problemy morskoi energetiki: materialy vos'moi mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii [Current problematics of marine power engineering: Proc. of the VIII international science and tech. conf.]*. St. Petersburg: SPbGMTU. 2019. P. 298 — 302. EDN SRKQXS. (In Russ.)
21. Senchurin L.P. K voprosu o kinematike planetarnoi peredachi 2K-V [On kinematics of the 2K-V planetary gear]. *Teoriya mekhanizmov i mashin [Mechanism and Machine Theory]*. 2019. Vol. 17, No. 4 (44). P. 127 — 133. DOI 10.5862/TMM.44.1. EDN OYODND.
22. Senchurin L.P., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Computer animation of scheme of cycloidal differential drive. *Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie [Modern Mechanical Engineering: Science and Education]*. 2019. No. 8. P. 274 — 288. DOI 10.1872/MMF-2019-23. EDN TJJVH. (In Russ.)
23. Ivanova M.A., Senchurin L.P., Cherenkova S.V. Praktikum po prikladnoi mekhanike i detalyam mashin: sbornik laboratornykh i prakticheskikh rabot [Hands-on course of applied mechanics and machinery parts: a collection of lab. and pract. tasks]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2024. 152 p.
24. Senchurin L.P., Ivanova M.A., Cherenkova S.V. To the question of the power calculation of planetary cycloid transmissions. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021. Special edition 1. P. 94 — 97. DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-94-97. EDN DRRMBL. (In Russ.)

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.5 Общие требования к оформлению материалов.

1.5.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.5.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилия, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел.;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Представляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neurofisiologia [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 modelirovaniye slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovaniye 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 zhidkostei i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv [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 хронологию 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 заголовок, 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 дпс.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (kuteynikov.ma@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят процедуру двойного слепого рецензирования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolsix-korabilej-27-foto.html>
<http://www.cloveritervices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn-24-dlcyxgbyj.xn-80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtp.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 Чугаевой Анжелой Евгеньевной, специалистом по научно-исследовательской работе отдела 531

Научное издание

**Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства
№ 80**

Редактор *Е.П. Чебучева*
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*
Дизайн концепции *М.В. Ведмединко*

Подписано в печать 13.10.2025. Дата выхода в свет 15.10.2025. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200. Свободная цена. Заказ № 267

Учредитель и издатель: Российский морской регистр судоходства
191186, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литер А
www.rs-class.org/ru/

Отпечатано на полиграфической базе Российского морского регистра судоходства
191186, г. Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 7, литер А