

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

11010010010001010101011101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)

0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100101011110100110

00101001010010010101110100110100100010111001001110010011100100111001010100100100100

00110101001101001000101101001000100001111100110011011011011001110000001110010100101

1101100110010101101010110110100111000101100101001100111100101011100101101001010

00001110101001111000101011001001100101001101101101101101101101101101101101101100

110011000111001001000101001010101000010101010110011001100100011100101001001010

00101001110011010011110001010010101110101001000010110001100110010101100010101100110100101001

22 десятилетие
науки
и технологий 31



ВЫСШАЯ АТТЕСТАЦИОННАЯ
КОМИССИЯ (ВАК)
при Министерстве образования и науки
Российской Федерации



THOMSON REUTERS
WEB OF KNOWLEDGE™



ULRICH'S
KNOWLEDGEBASE

№ 4 Часть 2 2025
№ 4 Part 2 2025

Morskie intelektual 'nye tehnologii

КОРАБЕЛЬНАЯ ЛЕДОТЕХНИКА

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОСВОЕНИЯ АРКТИКИ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
ПОСВЯЩЕННОЙ 85-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА В.А. ЗУЕВА



Крыловский
государственный
научный центр



приоритет2030⁺
лидерами становятся



Г. НИЖНИЙ НОВГОРОД



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 часть 2 2025 Сквозной номер 70

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

На страницах журнала публикуются **новые** научные разработки, результаты исследований, методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления (в названии журнала заявлено «морские», т. е. все статьи, в том числе и с интеллектуальной компонентой, должны так или иначе относиться к кораблестроению или, по крайней мере, к исследованиям по морской тематике, что должно быть отражено в статье, аннотации, названии).

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год (март, июнь, сентябрь, декабрь). Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский. Статьям присваивается уникальный идентификатор DOI.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в международную реферативную базу данных Web of Science <https://www.webofscience.com> (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase.

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации 21500 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

- 2.5.18 Проектирование и конструкция судов;
- 2.5.17 Теория корабля и строительная механика;
- 2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;
- 2.5.20 Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);
- 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы;
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации;
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
- 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- 1.2.2 Математическое моделирование и численные методы.

Рукописи и документы к статье представляются в редакцию в электронном виде (e-mail: mit-journal@mail.ru)

Учредитель-издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»).

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 от 19.09.2008 выданы Роскомнадзором.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей. Адрес: 190121 г.Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3. Тел./факс +7 (812) 513-04-51, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897, e-mail: mit-journal@mail.ru

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций.

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».

Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций, а также на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

<http://morintex.ru/ru/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ». Тираж 100 экз.

Стоимость бумажного номера журнала без доставки 3850 рублей.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2025



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 2 2025 www.morintex.ru
Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

New scientific developments, research results, methods, procedures and technologies in the area of ship building, information science, computer engineering and control are published in the magazine.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published and in the international abstract Web of Science database <https://www.webofscience.com> (Emerging Sources Citation Index ESCI), Ulrich's Knowledgebase.

Frequency of publication - 4 issues per year.

In the journal the articles shall be reviewed by leading specialists in the field of the article.

The journal is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, postgraduate students and students of higher educational institutions.

The journal is circulated in Russia and abroad by subscription in Interregional Subscription Agency and in editorial office, as well as in exhibitions, conferences and symposiums.

Journal headings:

- Design and Construction of Ships,
- Theory of Ship and Structural Mechanics,
- Technology of Ship Building. Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- System Analysis, Information Management and Processing,
- Information-Measuring and Control Systems,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Computer Modeling and Design Automation,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures.

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index [u](http://www.vak.ed.gov.ru) and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (E-mail: mit-journal@mail.ru)

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies".

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 of 19.09.2008 issued by Roskomnadzor.

Member of Association of science editors and publishers.

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies". Circulation of 100 copies.

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

<http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/>

Design: Anlrei V. Antonov

Page-proofs: Anna I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2025



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:
Никитин Н.В., д.т.н., профессор

Редакционная коллегия **Заместители главного редактора**

Скороходов Д.А., д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
Рюмин С.Н., к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Редакционный Совет **Сопредседатели**

Туричин Г.А., д.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ректор, Санкт-Петербург
Кондратьев С.И., доктор технических наук, профессор, ректор, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

Члены Редколлегии

Бугаев В.Г., д.т.н., профессор, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
Бураковский Е.П., д.т.н., профессор, филиал Военно-морской академии, Калининград
Ю.А. Власов, к.ф.-м.н., Санкт-Петербург
Войлошников М.В., д.т.н., профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
В.А. Евтеев, д.т.н., В.А. Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург
Костылев И.И., д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург
Родионов В.В., к.т.н., Си Проект, Санкт-Петербург
Семенова В.Ю., д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский морской государственный университет, Санкт-Петербург
Тарануха Н.А., д.т.н., профессор, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре
Федосенко Ю.С., д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород
Хекерт Е. В., доктор технических наук, профессор, Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск

Члены Совета

Бурмистров Е. Г., д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород
Кириченко А.В., д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
Малыгин И.Г., д.т.н., профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
Муру Г.Н., к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, Санкт-Петербург
С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия
Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия
Половинкин В.Н., д.т.н., профессор, научный руководитель предприятия, Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург
Рождественский К.В., д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173 (print)
ISSN 2588-0233 (on line)

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

Nikolay V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor

Editorial Staff Deputy Chief Editors

Dmitriy A. Skorokhodov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Solomenko Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

Sergey N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

Viktor G Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Evgeny P. Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia

Iurii A. Vlasov, PhD (Phys & Math)

Mikhail V. Voiloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Ivan I. Kostylev, Dr.Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

Vadim V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, Sea Project, St. Petersburg, Russia

Viktoriiia IU. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Nikolai A Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Iurii S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

Evgeny V. Khekert, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 9 Novorossiysk, Russia.

Editorial Board Co-chairmen

Gleb A Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Sergey I. Kondratyev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russia

Council Members

Evgeniy G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod

Aleksandr V. Kirichenko, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Igor G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

Georgii N Muru, PhD (Eng.), CEO, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

Sergei A Ogai, Dr. Sci. (Eng.), Associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

Valerii N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Science principal, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

Kirill V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
ВЫРАЖАЕТ ИСКРЕННЮЮ БЛАГОДАРНОСТЬ
РЕЦЕНЗЕНТАМ ЭТОГО НОМЕРА:**

- **Скороходов Дмитрий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Никитин Николай Васильевич**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Рюмин Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Таранцев Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Искандеров Юрий Марсович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской академии наук
- **Пятакович Валерий Александрович**, доктор технических наук, доцент, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
- **Родионов Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Огай Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Пластинин Андрей Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Козин Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Дюк Вячеслав Анатольевич**, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
- **Герман Галина Валентиновна**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Яковлев Алексей Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Рождественский Кирилл Всеволодович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Овчинников Кирилл Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Тряскин Никита Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Бурмистров Евгений Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Дерябин Виктор Владимирович**, доктор технических наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Виктория Юрьевна Семенова**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
EXPRESSES SINCERE GRATITUDE
TO THE REVIEWERS OF THIS ISSUE:**

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Sergey N. Ryumin**, Ph.D. (Eng), Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr.Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Yury M. Iskanderov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
- **Valeriy A. Pyatakovich**, Dr.Sci. (Eng.), assistant professor, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Sergei A. Ogai**, Dr.Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Andrey E. Plastinin**, Dr.Sci. (Eng), assistant professor, Volga State University of Water Transport
- **Viktor M. Kozin**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **Vyacheslav A. Dyuk**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Galina V. German**, Dr.Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Aleksey Yu. Yakovlev**, Dr.Sci. (Eng.), Assistant professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Kirill V. Rozhdestvensky**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Nikita V. Tryaskin**, Ph.D. (Eng.), assistant professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Evgeny G. Burmistrov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Volga State University of Water Transport
- **Viktor V. Deryabin**, Dr.Sci. (Eng), Assistant Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Viktoriya Yu. Semenova**, Dr.Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University

**КОРАБЕЛЬНАЯ ЛЕДОТЕХНИКА:
Актуальные вопросы освоения
Арктики**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
ПОСВЯЩЕННОЙ 85-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА В.А.ЗУЕВА**

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Определение приведенной толщины ледяного покрова в процессе движения судна.....	10
Калинина Н.В. Теоретико-экспериментальный подход к прогнозированию ледовой ходкости при движении судов набегами.....	15
Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Солдаткин О.Б., Жуков А.Е. Роль трения в сопротивлении движению судна в ровном сплошном льду.....	25
Калинина Н.В. Динамика движения ледокола в различных ледовых условиях.....	31
Калинина Н.В. Исследование динамики движения ледокола в торосистых льдах.....	39
Морозов В.П., Садовский А.А., Гладышев Н.С., Румянцев Н.Е. Прогноз ресурса пневмобаллонного ограждения шасси на воздушной подушке летательных аппаратов.....	47
Ларин А.Г., Ларина Е.М. Экспериментальное определение сопротивления битого льда.....	54
Блинов К.Д., Жуков А.Е. Применение энергетического подхода к определению сопротивления ледокольного судна.....	60

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Земляк В.Л., Козин В.М. Движение погруженного тела на малом заглублении в ледовых условиях.....	66
Себин А.С., Блинов К.Д., Куркин А.А. Экспериментальное исследование влияния скорости нагружения на энергию разрушения модельного пресноводного льда.....	74
Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Нерешенные проблемы ледовой ходкости судов.....	82
Князьков В.В., Халилов А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния бортового перекрытия буксирного судна на основе метода конечных элементов.....	88

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Муру Г.Н., Сутырин В.И., Буйлов С.В., Корягин С.И., Шинкаренко И.А. Цифровой двойник корпуса судна в техническом обслуживании и ремонте.....	95
--	----

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Миронов А.А., Кикеев В.А., Романов А.Д. Оценка надежности конструкций морской техники по критерию усталостной трещиностойкости.....	104
Крупина Н.А., Савицкая А.В., Клячкин С.В., Пацева П.В. Теоретические основы математического моделирования локального дрейфа льда на основе метода дискретных элементов.....	111
Себин А.С., Двойченко Ю.А., Куркин А.А. Определение ключевых режимов динамического изгиба ледяного покрова неподвижной в плане нагрузкой.....	117

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Evgeniy M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Andrey A. Kurkin Determination of the average thickness of ice cover thickness during the of ship movement.....	10
Nadezhda V. Kalinina Theoretical-experimental approach to forecasting of ice propulsion during ship movement by ramming.....	15
Evgeniy M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Oleg B. Soldatkin, Alexander E. Zhukov Determination of the resistance of solid ice to the movement of an icebreaker using a model experiment.....	25
Nadezhda V. Kalinina Dynamics of icebreaker movement in various ice conditions.....	31
Nadezhda V. Kalinina Investigation of the dynamics of icebreaker movement in hummocky ice.....	39
Victor P. Morozov, Aleksey A. Sadovsky, Nikita S. Gladyshev, Nikita E. Rummyantsev Prediction of the Service Life of Pneumatic Cushion Skirt for Air Cushion Landing Systems of Aircraft.....	47
Aleksandr G. Larin, Elizaveta M. Larina Experimental determination of the resistance of broken ice.....	54
Kirill D. Blinov, Alexander E. Zhukov The use of an energy approach to calculation the level ice resistance of icebreaker vesse.....	60
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Vitaliy L. Zemlyak, Viktor M. Kozin Movement of a submerged body at shallow depth in ice conditions.....	66
Andrei S. Sebin, Kirill D. Blinov, Andrei A. Kurkin Experimental Investigation of the Loading Rate Effect on the Breaking Energy of Model Fresh Water Ice.....	74
Kirill E. Sazonov, Aleksei A. Dobrodeev Outstanding issues concerning ships ice performance.....	82
Vladimir V. Knyazkov, Alexander S. Khalilov Evaluation of the stress-strain state of the side deck of a tugboat based on the finite element method.....	88
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Georgy N. Muru, Valery I. Sutyurin, Sergey V. Buylov., Sergey V. Buylov, Ivan A. Shinkarenko Digital twin of a ship's hull in maintenance and repair.....	95
MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES	
Anatoly A. Mironov, Vasily A. Kikeev, Alexey D. Romanov Estimation of the reliability of marine engineering structures by the criterion of fatigue crack resistance.....	104
Nina A. Krupina, Anna V. Savitskaya, Sergey V. Klyachkin, Polina V. Patseva Theoretical foundations of mathematical modeling of local ice drift based on the discrete element method.....	111
Andrei S. Sebin, Yuri A. Dvoichenko, Andrei A. Kurkin Determining key indicators of dynamic bending regimes of ice cover under a non-movement load.....	117

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.069>

Определение приведенной толщины ледяного покрова в процессе движения судна

Грамузов Е.М.¹ terkor54@mail.ru, Калинина Н.В.¹ nvk5133@mail.ru,
Куркин А.А.¹ aakurkin@nntu.ru

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Физико-механические свойства сплошного ледяного покрова акваторий являются объектом внимания при эксплуатации судов активного ледового плавания. Ледяной покров представляет собой серьезное препятствие для судоходства. Изучение физико-механических свойств льда способствует безопасной и эффективной эксплуатации судов во льдах. Основное назначение ледокола - разрушение ледяного покрова для прокладывания судоходного канала. Характеристикой каждого ледокола является предельная толщина сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимально устойчивой скоростью при работе главной энергетической установки на полную мощность. С позиций сопротивления ледяного покрова движению судов на первый план выступают следующие физико-механические свойства льда: толщина, плотность, соленость, температура, заснеженность, коэффициент трения пары корпус – лед, константы упругости и прочности, разрушенность, вызванные морфологией образования и нарастания ледяного покрова. В задачах ледопроеходимости для однозначности решений ледяной покров идеализируется. Физико-механические характеристики усредняются по толщине, а толщина льда считается постоянной. Для целей проектирования и эксплуатации судов активного ледового плавания сформулировано понятие приведенной толщины ледяного покрова, как толщины расчетного льда, имеющего равную сопротивляемость движению, определяемую скоростью хода. Показано как определить приведенную толщину сплошного ледяного покрова во время движения судна с определенной скоростью. Знание толщины льда важно для безопасной и эффективной эксплуатации ледоколов и обеспечит уверенное передвижение ледокола даже в сложных климатических условиях.

Ключевые слова: ледокол, ледяной покров, физико-механические свойства льда, диаграмма ледопроеходимости, условия эксплуатации, приведенная толщина льда.

Для цитирования: Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Определение приведенной толщины ледяного покрова в процессе движения судна, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 10—14. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.069

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.069>

Determination of the average thickness of ice cover thickness during the of ship movement

Eugene M. Gramuzov¹ terkor54@mail.ru, Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru,
Andrey A. Kurkin¹ aakurkin@nntu.ru

¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. The physical and mechanical properties of the continuous ice cover of the water areas are the object of attention during the operation of active ice navigation vessels. The ice cover is a serious obstacle to navigation. The study of the physico-mechanical properties of ice contributes to the safe and efficient operation of ships in the ice. The main purpose of the icebreaker is the destruction of the ice cover for creating a shipping channel. The characteristic of each icebreaker is the maximum thickness of solid, level ice that the ship can overcome, moving at a minimum steady speed when the main power plant is operating at full capacity. From the standpoint of the resistance of the ice sheet to ship movement, the following physical and mechanical properties of ice come to the fore: thickness, density, salinity, temperature, snow cover, coefficient of friction of the hull-ice pair, constants of elasticity and strength, destruction caused by the morphology of the formation and growth of the ice sheet. The ice cover is idealized for solving problems of ice propulsion. The physical and mechanical characteristics are averaged over the thickness, and the thickness of the ice is considered constant. For the purposes of designing and operating active ice navigation vessels, the concept of reduced ice cover thickness is formulated as the thickness of the calculated ice having equal resistance to movement, determined by the speed of travel. The determination of the average thickness of the continuous ice cover during the movement of the ship at a certain speed is shown. Knowing the thickness of the ice is important for the safe and efficient operation of icebreakers and will ensure confident movement of the icebreaker even in difficult climatic conditions.

Keywords: icebreaker, ice cover, physical and mechanical properties of ice, ice propulsion diagram, operating conditions, average ice thickness.

For citation: Eugene M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Andrey A. Kurkin Determination of the average thickness of ice cover thickness during the of ship movement, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 10—14. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.069

Введение

Физико-механические свойства (ФМС) сплошного ледяного покрова акваторий являются объектом внимания гляциологов, ледотехников, судоводителей и проектантов судов активного ледового плавания [1, 2, 7]. Ледяной покров представляет собой серьезное препятствие для судоходства, особенно в полярных регионах. Изучение физико-механических свойств льда способствует безопасной и эффективной эксплуатации судов во льдах.

Основное назначение ледокола - разрушение ледяного покрова для прокладывания судоходного канала. Предельную ледопроеходимость характеризуют толщиной сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимально устойчивой скоростью (около 1,0 узла) при работе главной энергетической установки на полную мощность.

1. Приведенная толщина сплошного ледяного покрова

С позиций сопротивляемости ледяного покрова движению судов на первый план выступают следующие ФМС [3, 4, 5, 6]: толщина, плотность, солёность, температура, заснеженность, коэффициент трения пары корпус судна – лед, константы упругости и прочности, разрушенность, вызванные морфологией образования и нарастания ледяного покрова. Плавающая ледяная пластина имеет ортотропную структуру и отклонение от плоских верхней и нижней поверхностей. В задачах ледопроеходимости для однозначности решений ледяной покров идеализируется. Различают лишь пресные и морские льды, весенние льды различной разрушенности.

Физико-механические характеристики усредняются по толщине, а толщина льда считается постоянной. Набор ФМС в моделях расчета ледового сопротивления сводится к следующим характеристикам: осредненная толщина h , плотность ρ , солёность, коэффициент трения корпуса судна о лед f , модуль нормальной упругости E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона μ и прочностные константы. К последним факторам относят предел прочности на изгиб σ_i , а в более поздних моделях работу разрушения A_z и проломную нагрузку $Z_{\max}$ [9]. Перечисленные величины можно задавать при использовании расчетных методов, однако технически невозможно синхронно их контролировать в процессе движения судна. На сопротивляемость ледяного покрова влияют разрушенность, заснеженность, сжатие, торосистость, сезонная изменчивость, облипание корпуса [5]. Анализ расчетных методов, натурных и модельных испытаний показывает, что толщина ледяного покрова является первостепенным по силе фактором по сравнению с прочими ФМС. Поэтому вводится понятие приведенной толщины льда в отношении сопротивляемости движению судна.

В техническом задании (ТЗ) на проектирование ледокола [7] задают ФМС и предельную толщину сплошного льда, преодолеваемую ледоколом с минимальной устойчивой скоростью. Ледовая ходкость характеризуется диаграммой ледопроеходимости – зависимостью скорости хода от толщины ровного сплошного льда. В процессе проведения теоретических и экспериментальных (модельных) исследований, строят кривые ледопроеходимости, которые позволяют определять приведенную толщину льда в процессе движения судна в конкретных ледовых условиях эксплуатации. Рассмотрим данную технологию более подробно.

Следует определить термин приведенная толщина льда. Прежде всего, надо договориться о ФМС, заснеженности и разрушенности стандартного ровного сплошного ледяного покрова. Обычно это зимний бесснежный лед, имеющий нулевую (баллы) разрушенность, с осредненными ФМС. Весенний, обработанный солнечной радиацией ледяной покров, характеризуется разрушенностью от 0 до 5 баллов. С ростом разрушенности снижается сопротивляемость ледяного покрова движению ледокола [5]. Заснеженность льда, характеризуемая толщиной, плотностью и влажностью снежного покрова, увеличивает сопротивляемость движению судна [8]. Под приведенной толщиной льда следует понимать толщину ледяного покрова, имеющего сопротивляемость такую же, как у стандартного ровного сплошного льда. Смысл такого подхода заключается в удобстве построения и использования расчетных методов ледовой ходкости и при эксплуатации судна во льдах. Особо этот вопрос возникает при проведении ледовых сдаточных испытаниях. Сопоставление прогнозов ледовой ходкости, полученных в модельных экспериментах и расчетах при проведении проектных работ с натурными испытаниями крайне затруднительно. Это обусловлено невозможностью встретить в природе лед с заданными в ТЗ параметрами. Определение приведенной толщины ледяного покрова в процессе натурального эксперимента позволит преодолеть данное противоречие.

Наличие на льду снежного покрова увеличивает сопротивление ледокола. Для удобства дальнейших рассуждений и выкладок в формуле для расчета чистого ледового сопротивления [5] толщину льда следует заменить на приведенную толщину ледяного поля (трассы) $h_{пр}$, а толщину снежного покрова считать равной нулю. Тогда приведенную толщину ледяного поля можно вычислять по формуле [8]:

$$h_{пр} = h + k h_{сн}, \quad (1)$$

где h – фактическая толщина льда; $h_{сн}$ – толщина снега на поверхности льда; k – коэффициент приведения толщины снега к толщине льда.

2. Ходкость ледокола в сплошном ледяном поле

Расчетные модели сопротивления ледокола в сплошном льду при постоянной скорости движения (установившемся движении) на прямом курсе исследовались различными авторами [5].

В целях настоящего исследования применим последнюю из предложенных моделей, наиболее полно учитывающую толщину и ФМС ледяного покрова, форму корпуса и главные размерения ледокола, скорость хода [9].

В качестве примера для ледокола проекта 1105 (ширина корпуса 16,0 м, мощность 4650 кВт) на рис. 1 приведены кривые чистого ледового сопротивления при движении в ровном сплошном бесснежном ледяном поле. Лед не ослаблен солнечной радиацией (разрушенность 0 баллов) при отрицательных температурах воздуха. ФМС льда приняты среднестатистическими: плотность $\rho=0,92$ т/м³, модуль Юнга $E=5 \cdot 10^6$ кПа, коэффициент Пуассона $\mu=0,33$, коэффициент трения льда о корпус судна $f=0,15$. При проектировании ФМС могут быть приняты иными в зависимости от района плавания [7].

Невозможность прямого измерения сопротивления R и тяги винтов в значительной степени ухудшает качество натурных данных. Причем в настоящее время вопрос о влиянии льда на тягу ледокола остается открытым.

Поэтому тяга на галке P_r , приравняемая к чистому ледовому сопротивлению R , определяется расчетным путем с использованием рекомендаций [4] также как для свободной воды:

$$P_r = P_{ш} \left[1 - 0,4 \left(\frac{v}{v_0} \right) - 0,6 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где $P_{ш}$ - тяга ледокола на швартовых, кН; v - скорость ледокола в текущий момент времени, м/с; v_0 - скорость движения на чистой воде при заданной мощности, м/с.

На зависимости сопротивления от скорости движения и толщины ледяного покрова (рис. 1) наложена кривая тяги на галке $P_r = f(v)$ ледокола

проекта 1105 при работе энергетической установки на полную мощность.

При установившемся движении тяга на галке P_r равна чистому ледовому сопротивлению R . Это соответствует точкам пересечения кривых P_r и R на рис. 1, по которым строится диаграмма ледопроеходимости, представляющая собой зависимость скорости движения судна от толщины льда $v=f(h)$ (рис. 2).

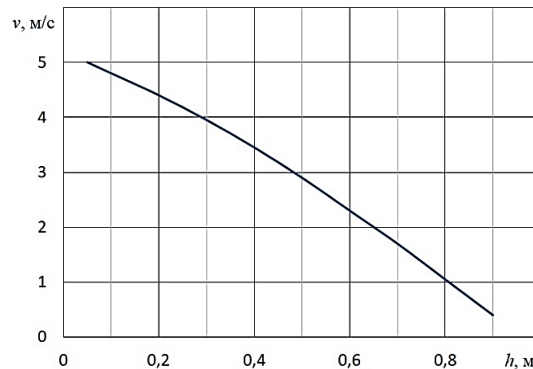


Рис. 2. Диаграмма ледопроеходимости ледокола пр. 1105

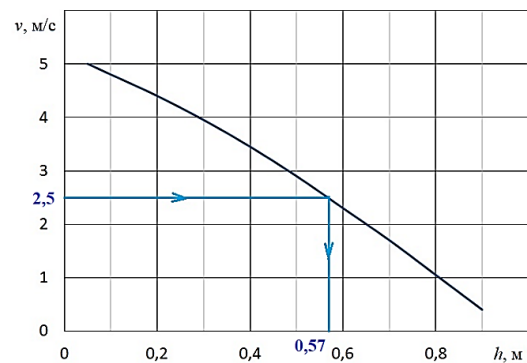


Рис. 3. Определение приведенной толщины ледяного покрова в зависимости от скорости движения ледокола пр. 1105

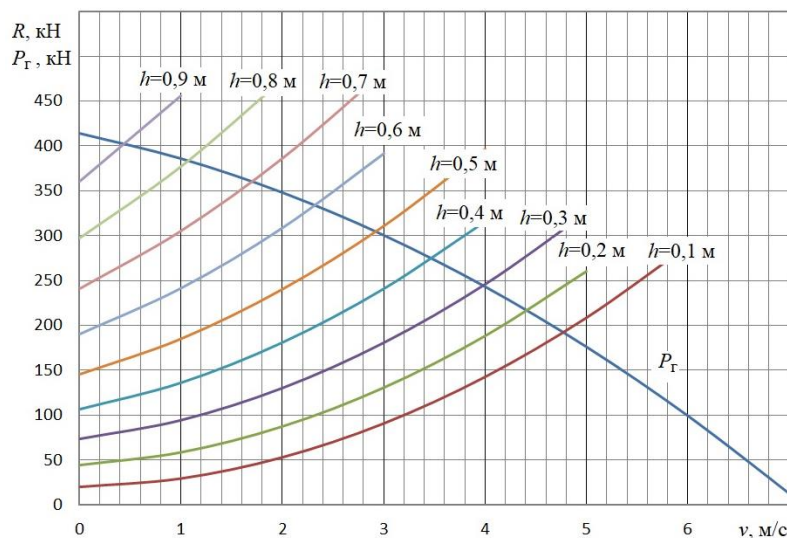


Рис. 1. Чистое ледовое сопротивление и тяга на галке ледокола проекта 1105 при работе ЭУ на полную мощность

3. Определение приведенной толщины ледяного покрова при движении ледокола

В реальных условиях эксплуатации судов бесснежный ледяной покров крайне редко встречается. Поэтому приведенная толщина ледяного поля отличается от стандартной толщины льда в большую или меньшую сторону.

Ледокол разрушает (ломает) ледяной покров изгибом за счет приложенного к кромке вертикального усилия. Разрушенность влияет на сопротивляемость ледяного покрова разрушению изгибом, смятию кромки, увеличивает скорость хода и уменьшает приведенную толщину льда. Заснеженность влияет на плавучесть обломков льда, снижает скорость хода и увеличивает приведенную толщину ледяного поля. При наличии снега на льду рассчитанная приведенная толщина льда возрастает по сравнению с не заснеженным льдом в 1,13÷1,34 раза [8].

К увеличению приведенной толщины приводят также сжатие, торосистость, и облипание корпуса. Сразу следует заметить, что значение приведенной толщины льда $h_{пр}$ для судоводителей важнее знания отдельных толщин льда h , снега $h_{сн}$, и прочих характеристик ледяного покрова, так как однозначно характеризует влияние сопротивляемости льда на ледовую ходкость.

Если колебания ФМС ледяного покрова, которые нереально определить с борта ледокола, по аналогии отнести к определению приведенной толщины льда, то наиболее существенной величиной влияющей на ходкость ледокола оказывается последняя. Как следует из выражения для определения чистого ледового сопротивления [9] приведенная толщина льда однозначно связана со скоростью хода.

При натурных испытаниях ледовой ходкости невозможно создание ледовое поле с наперед заданными ФМС, а также осуществить их контроль. Однако, можно определить приведенную толщину льда. Для этого следует использовать диаграмму ледопроеходимости, полученную для заданных стандартных расчетных условий и имеющуюся на борту ледокола в комплекте судовой документации.

Скорость движения судна в определенных ледовых условиях можно измерить с помощью спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Воспользовавшись диаграммой ледопроеходимости судна, можно определить, как показано на рис. 3, приведенную толщину льда. Что и явилось целью настоящего исследования.

Заключение

Плавающий ледяной покров обладает бесконечным разнообразием состояний, обусловленных морфологией и погодными условиями. Для целей проектирования и эксплуатации судов активного ледового плавания введена осредненная характеристика условий эксплуатации – приведенная толщина сплошного ледяного покрова.

Сформулировано понятие приведенной толщины ледяного покрова, как толщины расчетного льда, имеющего равную сопротивляемость движению, определяемую скоростью хода. Показано как определить приведенную толщину сплошного ледяного покрова во время движения судна с определенной скоростью. Знание толщины льда важно для безопасной и эффективной эксплуатации ледоколов и обеспечит уверенное и эффективное передвижение ледокола даже в сложных климатических условиях.

Литература

1. Гляциологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 564 с.
2. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Л.: Гидрометеиздат, 1980, 383с.
3. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968. 238 с.
4. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 207 с
5. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2013. 504 с.
6. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021. 308 с.
7. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. СПб.: Судостроение, 2013. 512 с.
8. Тихонова Н.Е. Приведённая толщина сплошного ледяного покрова с учётом снега. Физические технологии в машиноведении: Сб. научных статей. Нижний Новгород: Интелсервис, 2000. С.144-149.
9. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Перестроение полуэмпирической модели чистого ледового сопротивления при движении судна в сплошном льду. Инженерная физика. ООО Издательство «Научтехлитиздат». № 11, 2023. С. 53 – 62.

References

1. Glaciologicheskij slovar' [Glaciological dictionary]. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 564 s.
2. Bogorodskij V.V., Gavrilov V.P. Led [Ice]. L.: Gidrometeoizdat, 1980, 383s.
3. Kashteljan V.I., Poznjak I.I., Ryvlin A.Ja. Soprotivlenie l'da dvizheniju sudna [Ice resistance to ship movement]. L.: Sudostroenie, 1968. 238 s.
4. Ryvlin A.Ja., Hejsin D.E. Ispytanija sudov vo l'dah [Testing ships in ice].L.: Sudostroenie, 1980. 207 s.
5. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
6. Sazonov K.E. Model'nyy i naturnyy eksperimenty v morskoy ledotekhnike [Model and full-scale experiments in marine ice engineering]. Sankt-Peterburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2021.
7. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Proektirovanie ledokolov [Icebreakers design]. SPb.: Sudostroenie, 2013.– 512 s.

8. Tihonova N.E. Privedjonnaja tolshhina sploshnogo ledjanogo pokrova s uchjotom snega [The given thickness of the continuous ice cover, taking into account the snow]. Fizicheskie tehnologii v mashinovedenii: Sb. nauchnyh statej. Nizhnij Novgorod: Intelservis, 2000. S.144-149.
9. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Perestroenie polujempiricheskoj modeli chistogo ledovogo soprotivlenija pri dvizhenii sudna v sploshnom l'du. Inzhenernaja fizika [Reconstruction of a semi-empirical model of pure ice resistance when a vessel is moving in solid ice]. ООО Izdatel'stvo «Nauchtehlitizdat». № 11, 2023. S. 53 – 62.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Грамузов Евгений Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: terk54@mail.ru

Eugene M. Gramuzov, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Professor of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: terk54@mail.ru

Калинина Надежда Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

Nadezhda V. Kalinina, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Куркин Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: aakurkin@nntu.ru

Andrey A. Kurkin, Dr. Sci. (Phys.&Math.), Vice-Rector for Scientific Work, Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: aakurkin@nntu.ru

Статья поступила в редакцию / the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования / approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации / accepted for publication 25.10.2025.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.070>**Теоретико-экспериментальный подход к прогнозированию ледовой ходкости при движении судов набегами**Калинина Н.В.¹ nvk5133@mail.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Ледоколы предназначены для работы в условиях арктического климата, где толщина льда может превышать преодолеваемую непрерывным ходом. Движение ледоколов непрерывным ходом на участках, где лед особенно толстый и плотный, невозможно, поэтому осуществляется набегами. Работа ледоколов набегами носит циклический характер и складывается из следующих операций: отход назад от кромки целого льда; реверс судна с заднего хода на передний; разбег в собственном канале битого льда; продвижение в сплошном ледяном покрове, завершающееся полной остановкой и заклиниванием корпуса судна; освобождение от заклинивания; реверс с переднего хода на задний. Важной характеристикой при работе набегами является средняя скорость продвижения. Приведены дифференциальные уравнения движения судна и их решения на этапах отхода, разгона и продвижения в ненарушенном льду. Полученные значения пути продвижения и времени на различных этапах движения в зависимости от длины отхода от кромки ненарушенного льда вместе с задаваемым временем реверса энергетической установки с переднего хода на задний для конкретных ледовых условий определяют среднюю скорость движения ледокола набегами. Показано как теоретико-экспериментальная модель средней скорости движения ледокола набегами настроена на натурные данные испытаний ледоколов, но может быть уточнена с использованием данных модельного эксперимента, позволяющим измерять физико-механические характеристики ледяного покрова, входящие в математическую модель. Описаны и приведены результаты модельных испытаний ледоколов проектов 21900, 1191, 16 набегами в опытовом бассейне.

Ключевые слова: ледоколы, толстый лед, движение набегами, скорость движения, математическая модель, экспериментальный подход.

Для цитирования: Калинина Н.В. Теоретико-экспериментальный подход к прогнозированию ледовой ходкости при движении судов набегами, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 15—24. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.070

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.070>**Theoretical-experimental approach to forecasting of ice propulsion during ship movement by ramming**Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. Icebreakers are designed to operate in the Arctic climate, where the thickness of the ice can exceed that overcome by continuous movement. The operation of icebreakers in areas, where the ice is particularly thick and dense, continuous movement is impossible, and movement are carried out by a ramming. The work of icebreakers by ramming is cyclical and consists of the following operations: moving back from the edge of the whole ice; reversing the vessel from reverse to forward; acceleration in its own channel of broken ice; advancing in a solid ice sheet, ending in a complete stop and jamming of the vessel's hull; getting rid of jamming; reversing the vessel from forward to reverse. An important characteristic when moving a vessel by ramming is the average speed of movement. The differential equations of motion of the ship and their solutions at the stages of departure, acceleration and advance in undisturbed ice are presented. The average speed of movement of an icebreaker by ramming is determined by the values of the path of advance and time at various stages of movement, depending on the length of departure from the edge of undisturbed ice, and the time to reverse the power plant from forward to reverse for specific ice conditions. The adjustment of the theoretical-experimental model of the average speed of icebreaker movement by ramming on full-scale icebreaker test data is shown. This mathematical model can be refined using data from a model experiment, which makes it possible to measure the physical and mechanical characteristics of the ice sheet included in the mathematical model. The test results of the icebreaker models of project 21900, 1191, 16 by ramming in the experimental basin are described and presented.

Keywords: icebreakers, thick ice, movement by ramming, speed of movement, mathematical model, experimental approach.

For citation: Nadezhda V. Kalinina Theoretical-experimental approach to forecasting of ice propulsion during ship movement by ramming, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 15—24. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.070

Введение

Освоение Северного морского пути (СМП) и Арктического региона является стратегически важной задачей для России. В связи с увеличением грузопотока по СМП необходимо обеспечить надёжную и безопасную перевозку грузов по этой транспортной магистрали. Движение ледоколов по СМП осуществляется с учетом ряда условий, связанных с климатическими особенностями региона, состоянием льда и техническими характеристиками судов. Основной фактор, влияющий на движение ледоколов — это состояние ледового покрова. Ледоколы предназначены для работы в условиях арктического климата, где толщина льда может достигать нескольких метров. Они прокладывают путь через ледяные поля, обеспечивая безопасность плавания других судов. Эксплуатация судов на сложных участках СМП, где лед особенно толстый, плотный и движение непрерывным ходом невозможно, наиболее часто используется движение набегам. Современные ледоколы, оснащенные мощными двигателями, успешно применяют этот метод, который обеспечивает безопасный и эффективный проход судов через арктические воды [1, 2, 3].

1. Феноменологическая модель движения ледокола набегам

Работа ледоколов набегам носит циклический характер и складывается из следующих операций: отход назад от кромки целого льда; реверс судна с заднего хода на передний; разбег в собственном канале битого льда; продвижение в сплошном ледяном покрове, завершающееся полной остановкой и заклиниванием корпуса судна; освобождение от заклинивания; реверс с переднего хода на задний.

Рассмотрим возможные варианты тактики работы ледокола набегам.

Отход назад в собственном канале осуществляется на расстояние l_p , необходимое для набора скорости вхождения в сплошной лед очередного цикла продвижения. При этом часть пути ледокол движется под действием тяги заднего хода, определяемой безопасностью работы движительно-рулевого комплекса, и часть пути ледокол движется по инерции при реверсе энергетической установки (ЭУ) с заднего хода на передний. На отход требуется время

$$t_{от} + t_{зп}.$$

Разгон на переднем ходу в собственном канале осуществляется исключительно для набора скорости (кинетической энергии) с положительным ускорением. На пройденный путь при разгоне l_p , равный полному пути отхода назад, затрачивается время t_p . После контакта со сплошным ледяным покровом движение ледокола замедляется вплоть до полной остановки. За это время t_n ледокол продвигается на расстояние l_n , являющееся полезным путем продвижения. При этом ледокол может двигаться при работе ЭУ на полную мощность вплоть до полной остановки, или при продвижении во льду может быть совершен заблаговременный, до остановки судна, реверс ЭУ на задний ход. В первом случае на продвижение ледокола затрачивается время t_n и после полной остановки осуществляется

реверс движителей с переднего хода на задний, на который затрачивается время $t_{пз}$.

Время реверса определяется возможностями энергетической установки и считается известным для конкретного судна. В заснеженных льдах бывает полезно проработать машинами вперед еще некоторое время с целью промывки ледового канала за кормой и облегчения отхода назад.

Заблаговременный, до остановки судна, реверс ЭУ при продвижении в сплошном льду используют для уменьшения вероятности заклинивания. В этом случае путь l_n во льду складывается из двух слагаемых: пути при движении с работой ЭУ на полную мощность и пути, который судно проходит при реверсировании ЭУ с переднего хода на задний до полной остановки. Время движения в этом случае $t_n + t_{пз}$.

Если не произошло заклинивание корпуса, начинается движение задним ходом. В противном случае, затрачивается некоторое время на освобождение от заклинивания $t_{оз}$.

Время освобождения от заклинивания разное в каждом случае и определяется такими факторами, как формой корпуса ледокола, толщиной и физико-механическими характеристиками льда. При заклинивании для освобождения ледокола необходимо принять специальные меры (маневрирование движителями и рулями, работа пневмоомывающего устройства и крено-дифференциальной системы). Затем цикл движения ледокола повторяется.

2. Скорость движения ледокола набегам

Важной характеристикой, определяющей ледокольные качества судна при работе набегам, является не только путь, пройденный ледоколом до остановки после контакта со сплошным ледяным покровом, но и средняя скорость продвижения судна v_n .

Среднюю скорость движения ледокола набегам v_n можно определить как отношение суммарного пути продвижения в сплошном ледяном покрове $\sum l_{ni}$ к суммарному времени, затраченному на все этапы маневрирования $\sum t_i$:

$$v_n = \frac{\sum l_{ni}}{\sum t_i}. \quad (1)$$

В идеализированных условиях движения в однородном ледяном поле процесс работы ледокола повторяется. Поэтому среднюю скорость движения набегам можно рассчитать по формуле:

$$v_n = \frac{l_n}{t_{от} + t_{зп} + t_p + t_n + t_{пз} + t_{оз}}, \quad (2)$$

где l_n - путь продвижения в сплошном льду; $t_{от}$ - время отхода назад ледокола; $t_{зп}$ - время реверса судна с заднего хода на передний; t_p - время разбега; t_n - время продвижения в сплошном льду; $t_{пз}$ - время реверса ЭУ с переднего хода на задний; $t_{оз}$ - время освобождения от заклинивания.

Определение этой скорости представляет практический интерес для решения задачи оптимизации всего процесса работы ледокола. С целью получения аналитических решений для определения параметров движения ледокола на отдельных этапах циклической работы была исследована динамика работы ледокола набегам

[4]. Основные этапы движения (отход, разбег и продвижение в сплошном льду) были описаны дифференциальными уравнениями.

В общем виде дифференциальное уравнение при движении в горизонтальной плоскости с изменяющейся линейной скоростью v можно записать:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = \sum F_x = P_e - R_n, \quad (3)$$

где D – массовое водоизмещение судна; λ'_{11} – коэффициент присоединенных масс воды и льда по оси x ; $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt}$ – продольное ускорение судна; $\sum F_x$ – сумма внешних сил; P_e – полезная тяга движителей ледокола на переднем или заднем ходу и ледовое сопротивление R_n , определяемое для различных условий движения.

Для решения уравнения (3) использована тяга винтов ледокола на переднем (пх) $P_{e\text{ пх}}$, заднем ходу (зх) $P_{e\text{ зх}}$ и ледовое сопротивление определяется за вычетом сопротивления воды движению ледокола, т.е. рассматривалась «тяга на гаке» $P_{г\text{ пх,зх}}$ и чистое ледовое сопротивление R :

$$P_{г\text{ пх,зх}} = P_{e\text{ пх,зх}} - R_B; \quad R = R_n - R_B.$$

Уравнение поступательного движения в битом льду имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{г\text{ пх,зх}} - R_{бл\text{ пх,зх}}; \quad (4)$$

$$P_{г} = P_{ш} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$R_{бл} = k_3 \dot{x}^2 + k_4, \quad (6)$$

$$k_3 = k_{ид} \left(c_{и} \rho_{л} h \frac{B}{2} (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + c_{г} \rho h \frac{B}{2} (\Phi_{г'} + f \Phi_{гт'}) \right),$$

$$k_4 = k_{п} (\rho - \rho_{л}) g h b B (\Phi_{п'} + f \Phi_{пт'}),$$

где $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ – скорость движения; v_0 – скорость движения на чистой воде при заданной мощности; $P_{ш}$ – тяга винтов ледокола на швартовых на заднем или переднем ходу; $k_{ид}$, $k_{п}$ – эмпирические коэффициенты, которые определяются в теоретико-экспериментальной модели с учетом натурных или модельных данных испытаний ледоколов; B – ширина ледокола, м; f – коэффициент трения льда о корпус судна; h – толщина льда, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{л}$ – плотность ледяного покрова, т/м³; ρ – плотность воды, т/м³; $c_{г}$ – коэффициент гидродинамического сопротивления при раздвигании льдин, $c_{г} = 2$; $c_{и}$ – коэффициент, учитывающий влияние присоединенных масс воды; b – средняя протяженность обломков льда, зависящая от его толщины, как показывают наблюдения, она определяется изгибом пластин на упругом основании и приближенно может быть принята из соотношения $b\alpha = 0,312$; $\alpha = (\rho g / d)^{1/4}$ – параметр изгиба пластины на упругом основании; $d = E h^3 / (12(1 - \mu^2))$ – цилиндрическая жесткость ледяной пластины, μ – коэффициент Пуассона льда; E – модуль упругости, кПа; $\Phi_{и}$, $\Phi_{ит}$, $\Phi_{г'}$, $\Phi_{гт'}$, $\Phi_{п'}$, $\Phi_{пт'}$ – функции геометрии.

В выражении (6) сопротивление $R_{бл}$ [5] может вычисляться как для переднего $R_{бл\text{ пх}}$, так и для заднего $R_{бл\text{ зх}}$ хода в зависимости режима движения ледокола. Соответственно в выражения для определения $k_{3\text{ пх}}$ и $k_{4\text{ пх}}$ или $k_{3\text{ зх}}$ и $k_{4\text{ зх}}$ подставляются функции геометрии $\Phi_{и}$, $\Phi_{ит}$, $\Phi_{г'}$,

$\Phi_{гт'}$, $\Phi_{п'}$, $\Phi_{пт'}$ для переднего или заднего хода [5]. Коэффициент $c_{и}$ зависит от размеров обломков льда и его можно оценить по формуле Пабста [6] для присоединенной массы прямоугольной пластины:

$$c_{и} = 1 + \frac{0,218 b}{h} \frac{\rho}{\rho_{л}} = 1 + \frac{0,068}{h \alpha} \frac{\rho}{\rho_{л}}.$$

С учетом выражений для $P_{г}$ (5) и $R_{бл}$ (6):

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{ш\text{ пх,зх}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_3 \dot{x}^2 - k_4 \text{ пх,зх} \quad (7)$$

или

$$\ddot{x} + A_7 \dot{x}^2 = B_7, \quad (8)$$

$$A_7 = \frac{1,4 P_{ш} + k_3 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; \quad B_7 = \frac{P_{ш} - k_4}{(1 + \lambda'_{11}) D}.$$

Замедленное движение ледокола происходит за счет превышения сопротивления ледокола над тягой при соответствующих скоростях. Уравнение поступательного движения в сплошном льду при торможении имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{г} - R; \quad (9)$$

$$R = k_1 \dot{x}^2 + k_2, \quad (10)$$

$$k_1 = k_{ов} \rho_{л} h B \left[\left(1 + \frac{0,19}{(0,215 + Fr_h \tan \varphi_{1\phi})} \frac{\rho}{\rho_{л}} \frac{1}{\alpha h} \right) \times \right. \\ \left. \times (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + \frac{2\rho \Omega_{л}}{\rho_{л} B h} (\Phi_{г} + f \Phi_{гт}) \right] \\ k_2 = k_{п} \frac{h^4}{\alpha d} \left[\left(1 + f \gamma_{лт\phi} \right) + k_{сф} \gamma_{сф} \frac{d \alpha^2}{h} \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{2\phi}} + \right. \\ \left. + 0,66 (1 + f \Phi_{лт}) B \alpha + \frac{k_{сб} \Phi_{сб} d \alpha^3 B}{h} \right] + \\ + k_{ост} (\rho - \rho_{л}) g h \Omega_{л} (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + \\ + k_{сн} (\rho - \rho_{сн}) g h_{сн} \Omega_{л} (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}),$$

где $k_{ов}$, $k_{п}$, $k_{ост}$ – эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления; $h_{сн}$ – толщина снега, м; $\rho_{сн}$ – плотность снега, т/м³; $Fr_h = v / \sqrt{gh}$ – число Фруда по толщине льда; v – скорость движения, м/с; $\Omega_{л}$ – площадь подводной части корпуса, облегаемая льдом, м²; $k_{сф} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ кПа⁻¹, $k_{сб} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ кПа⁻¹, $k_{сн} = 0,429$; φ_1 , φ_2 , φ_3 – углы наклона батокса к горизонту, ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали на форштевне в районе действующей ватерлинии; $\gamma_{лт\phi}$, $\gamma_{сф}$, Φ_i – интегральные функции геометрии, полученные из пространственного рассмотрения взаимодействия корпуса судна со льдом [7].

В выражении (10) сопротивление R [7] вычисляется для переднего хода. Соответственно в выражения для определения k_1 и k_2 подставляются функции геометрии для переднего хода.

Подставляя в уравнение (9) выражения для $P_{г}$ (5) и R (10) перепишем (9) в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{ш} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2 \quad (11)$$

или

$$\ddot{x} + A_5 \dot{x}^2 = B_5, \quad (12)$$

$$A_5 = \frac{1,4P_{ш} + k_1 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; B_5 = -\frac{P_{ш} - k_2}{(1 + \lambda'_{11}) D}.$$

Решая уравнения (8) и (12) получены зависимости для определения параметров движения ледокола на отдельных этапах набегам, входящих в выражение (2):

- время отхода $t_{от}$ до момента реверса ледокола и скорость заднего хода $v_{зх}$ за это время определяется выражениями:

$$t_{от} = \frac{1}{\sqrt{A_7 B_7}} \operatorname{Arth} \sqrt{1 - e^{(-2A_7 t_{от})}}; \\ v_{зх} = \sqrt{\frac{B_7}{A_7}} \operatorname{th}(t_{от} \sqrt{A_7 B_7}); \quad (13)$$

- время и скорость разбега в момент касания с кромкой ледяного покрова:

$$t_p = \frac{1}{\sqrt{A_7 B_7}} \operatorname{Arth} \sqrt{1 - e^{(-2A_7 t_p)}}; \\ v_p = \sqrt{\frac{B_7}{A_7}} \operatorname{th}(t_p \sqrt{A_7 B_7}); \quad (14)$$

- время продвижения ледокола в сплошном льду определяется из условия его остановки:

$$t_{\pi} = \frac{1}{\sqrt{A_5 B_5}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{v_p^2 A_5}{B_5}}; \quad (15)$$

- путь движения в сплошном льду равен

$$l_{\pi} = -\frac{1}{2A_5} \ln \left[\frac{B_5}{v_p^2 A_5 + B_5} \right]. \quad (16)$$

Полученные значения пути продвижения l_{π} и времени на различных этапах движения в зависимости от длины отхода от кромки ненарушенного льда вместе с задаваемым временем реверса энергетической установки с переднего хода на задний для конкретных ледовых условий определяют среднюю скорость движения ледокола набегам по формуле (2).

3. Теоретико-экспериментальный подход к определению средней скорости движения набегам

При построении теоретической модели средней скорости движения ледокола набегам использованы допущения и упрощения физической реальности, которые для практических целей компенсируются эмпирическими коэффициентами, полученными экспериментально в полуматематических моделях. Натурные эксперименты, обладая наибольшей надежностью, ограничены по объёму и возможности варьирования определяющих факторов. Поэтому физическое моделирование является эффективным средством изучения ледовой ходкости судов [8, 9, 10].

Теоретико-экспериментальный подход в исследованиях ледовой ходкости судов предполагает сочетание экспериментов (модельных или натурных) и теоретических расчетных моделей по определению сопротивления и параметров движения.

Приведенная теоретическая модель определения средней скорости движения ледокола набегам (2) нуждаются в настройке с учетом экспериментальных данных. Для этого в математические модели чистого ледового

сопротивления (6) и (9) введены эмпирические коэффициенты $k_{ов}$; k_p ; $k_{ост}$; $k_{ид}$; $k_{п}$, позволяющие приводить в соответствие теоретическую модель с экспериментальными данными. Коэффициенты являются неизвестными величинами. Они могут быть определены на базе экспериментальных исследований по работе ледокола набегам [11, 12].

Расчет эмпирических коэффициентов следует производить отдельно для каждого этапа движения ледокола набегам. Для этого все используемые экспериментальные данные можно условно разделить на группы в зависимости от измеренных и необходимых для расчетов параметров.

Рассмотрим процесс отхода и разбега ледокола в канале битого льда и приведем системы уравнений для определения эмпирических коэффициентов $k_{ид}$ и $k_{п}$.

1) Дискретные экспериментальные данные. В качестве исходных экспериментальных данных для нахождения эмпирических коэффициентов $k_{ид}$ и $k_{п}$ могут быть использованы такие параметры, как время разбега t_p и путь l_p , пройденный при разбеге. В этом случае система уравнений для нахождения эмпирических коэффициентов $k_{ид}$ и $k_{п}$ с учетом начальных условий принимает вид:

$$l_{pi} + \frac{1}{2A_{7i}} \ln \left[1 - \operatorname{th}^2(t_{pi} \sqrt{A_{7i} B_{7i}}) \right] = 0, \quad (17) \\ i=1, 2 \dots n_1,$$

i - номер текущего уравнения в системе; n_1 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными l_p и t_p ; значения A_{7i} , B_{7i} зависят от характеристик ледокола, составляющих сопротивления при движении в битом льду, коэффициента присоединенных масс воды и льда λ'_{11} , а также от коэффициентов $k_{ид}$ и $k_{п}$, компенсирующих неточность теоретической модели расчета ледового сопротивления.

Функции Φ_i , входящие в выражения A_{7i} , B_{7i} , различны для переднего и заднего хода из-за отличия формы носовых и кормовых обводов.

Если в качестве исходных экспериментальных параметров задаются длина разгонного участка l_p и скорость v_p , с которой судно входит в лед, то система уравнений имеет вид:

$$l_{pi} + \frac{1}{2A_{7i}} \ln \left[1 - \frac{v_{pi}^2 A_{7i}}{B_{7i}} \right] = 0, \quad (18) \\ i=1, 2 \dots n_2,$$

n_2 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными l_p и v_p .

2) Экспериментальные данные с непрерывной записью параметров движения. В качестве исходных экспериментальных данных могут быть использованы несколько вариантов параметров движения, в зависимости от которых будет меняться вид системы уравнений для определения $k_{ид}$, $k_{п}$. Если в качестве исходных принять следующие параметры, то система уравнений в каждом случае принимает вид:

- время разгона t и путь x , пройденный за это время:

$$x_i + \frac{1}{2A_{7i}} \ln \left[1 - \operatorname{th}^2(t_i \sqrt{A_{7i} B_{7i}}) \right] = 0, \quad (19)$$

$$i=1, 2 \dots n_3,$$

n_3 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными t и $\dot{x}$;

- время разгона t и скорость $\dot{x}$, которую ледокол развил за это время:

$$\dot{x}_i - \sqrt{\frac{B_i}{A_i}} \operatorname{th}(t_i \sqrt{A_{7i} B_{7i}}) = 0, \quad (20)$$

$$i=1, 2 \dots n_4,$$

n_4 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными t и $\dot{x}$;

- путь x и скорость $\dot{x}$, которую ледокол развил за этот пройденный путь:

$$x_i + \frac{1}{2A_{7i}} \ln \left[1 - \frac{\dot{x}_i^2 A_{7i}}{B_{7i}} \right] = 0, \quad (21)$$

$$i=1, 2 \dots n_5,$$

n_5 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными x и $\dot{x}$.

Непрерывная запись параметров движения ледокола, как отмечалась выше, может быть зафиксирована на всем этапе работы или неполностью, с момента времени t_1 до t_2 . Более надежными экспериментальными данными следует считать данные заверщенного процесса и их надо использовать в первую очередь. Тогда для заверщенного процесса $t=t_p$, $x=l_p$, $\dot{x}=v_p$ и уравнения (19) и (21) принимают вид (17) и (18) соответственно.

При подборе исходных данных с непрерывной записью процесса, в первую очередь следует ориентироваться на те параметры, которые непосредственно замерялись в эксперименте.

Составляя систему уравнений для нахождения коэффициентов $k_{ид}$, k_n можно использовать экспериментальные данные всех перечисленных категорий. При этом система уравнений будет состоять из уравнений видов (17), (18), (19), (20), (21), где $i=1, 2 \dots n$, $n=n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5$ - число уравнений в системе.

Рассмотрим процесс продвижения ледокола в сплошном ледяном покрове до полной остановки и приведем системы уравнений для определения эмпирических коэффициентов сплошного льда $k_{ов}$, k_p , $k_{ост}$.

В этом случае в качестве исходных экспериментальных данных заверщенного процесса могут быть использованы скорость входа в лед v_p , которую ледокол развил на этапе разбега, и путь продвижения во льду l_p . Тогда система уравнений с учетом того, что время определяется из выражения (15) при условии $\dot{x} = f(t) = 0$ принимает вид:

$$l_{pj} + \frac{1}{2A_{5j}} \ln \left[\frac{B_{5j}}{B_{5j} + v_{pj}^2 A_{5j}} \right] = 0, \quad (22)$$

$$j=1, 2 \dots m_1,$$

j - номер текущего уравнения в системе; m_1 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными параметрами v_p , l_p ; значения A_{5j} , B_{5j} зависят от характеристик ледокола, составляющих сопротивления при движении в сплошном льду,

коэффициента присоединенных масс воды и льда λ'_{11} , а также от коэффициентов $k_{ов}$, k_p , $k_{ост}$, компенсирующих неточность теоретической модели расчета ледового сопротивления.

Если вместо скорости v_p исходным считается время разбега t_p перед входом ледокола в лед, то с учетом (20) система уравнений принимает вид:

$$l_{pj} + \frac{1}{2A_{5j}} \ln \left[\frac{A_{5j} B_{5j}}{A_{5j} B_{5j} + A_{5j} B_{5j} \operatorname{th}^2(t_p \sqrt{A_{5j} B_{5j}})} \right] = 0, \quad (23)$$

$$j=1, 2 \dots m_2,$$

m_2 - число уравнений в системе с исходными данными l_p , t_p ; A_{5j} и B_{5j} определяются с учетом уже определенных эмпирических коэффициентов $k_{ид}$, k_n для битого льда.

В качестве исходных экспериментальных данных незавершенного процесса (неполная запись) могут быть использованы несколько вариантов параметров движения, в зависимости от которых будет меняться вид системы уравнений для определения $k_{ов}$, k_p , $k_{ост}$:

- скорость входа в лед v_p , время движения во льду t и пройденный путь x :

$$x_j + \frac{1}{2A_{5j}} \ln \left[\frac{B_{5j}}{C_{11j}} + \frac{B_{5j}}{C_{11j}} \operatorname{tg}^2((C_{12j} - t_j) \sqrt{A_{5j} B_{5j}}) \right] = 0, \quad (24)$$

$$j=1, 2 \dots m_3,$$

m_3 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными v_p , t и x ;

- скорость входа в лед v_p , время движения в сплошном льду t и скорость $\dot{x}$ в этот момент времени t :

$$\dot{x}_j - \sqrt{\frac{B_{5j}}{A_{5j}}} \operatorname{tg}((C_{12j} - t_j) \sqrt{A_{5j} B_{5j}}) = 0, \quad (25)$$

$$j=1, 2 \dots m_4,$$

m_4 - число уравнений в системе, равное числу экспериментальных опытов с исходными данными v_p , t и $\dot{x}$.

При составлении системы уравнений для нахождения коэффициентов $k_{ов}$, k_p , $k_{ост}$ можно использовать полный набор экспериментальных данных, перечисленных выше. В этом случае система уравнений будет состоять из уравнений типов (22) ... (25), где $j=1, 2 \dots m$; $m=m_1+m_2+m_3+m_4$ - число уравнений в системе.

Решаются перечисленные системы на ПЭВМ методом перебора с использованием метода наименьших квадратов на базе располагаемых результатов испытаний.

Для определения эмпирических коэффициентов было произведено обследование генеральной совокупности, и путем выбраковки экспериментальных данных с наибольшими относительными расхождениями по длинам разбега и продвижения получены выборочные совокупности для определения эмпирических коэффициентов битого и сплошного льда, отобранные хотя и направлено, но в конечном итоге случайным образом.

Результаты расчета эмпирических коэффициентов $k_{ов}$, k_p , $k_{ост}$, $k_{ид}$, k_n приведены в табл. 1. Они определялись методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных

данных по речным ледоколам проектов Р-47, 1191, 1105.

Использование экспериментальных данных сразу по трем проектам сделано не случайно, а для максимального изменения основных определяющих факторов, в частности толщины льда и коэффициентов формы корпуса ледоколов.

Коэффициенты $K_{ов}$; $K_{ост}$; $K_{ид}$; $K_{п}$ - безразмерные. Коэффициент K_p по физическому смыслу безразмерный. Однако, в виду того, что константы разрушения ледяного покрова, как правило, неизвестны заранее и не измерялись в ходе натурных испытаний ледопроеходимости, их целесообразно включить в соответствующий эмпирический коэффициент. Это обстоятельство не нарушает строгости построения теоретико-экспериментальной модели, так как численное значение K_p в этом случае совпадает с безразмерным при единичных значениях неизвестных физических констант.

В натурных данных, полученных при попутном эксперименте, на которые настроена математическая модель, содержится более бедная информация по характеристикам льда, чем та которая заложена в теоретические модели (17)...(25). В процессе попутных испытаний ледокола была неточно определена толщина льда или она вообще отсутствует. К недостающим характеристикам ледяного покрова относятся константы упругости E и μ , плотность льда ρ_l и коэффициент трения f . В расчетах эмпирических коэффициентов они принимались равными среднестатистическими для речного льда: $E=5 \cdot 10^6$ кПа; $\mu=0,33$; $\rho_l=0,9$ т/м³; $f=0,15$. Коэффициенты формы корпуса принимаются для условной посадки ледокола по КВЛ, хотя в процессе эксплуатации посадка несколько изменяется, но не была зафиксирована в опыте. Невозможность прямого измерения сопротивления R и тяги винтов в

значительной степени ухудшает качество натурных данных.

Существующие натурные данные немногочисленны и обладают неполной информацией о физико-механических характеристиках ледяного покрова [8, 9]. Вместе с тем при физическом моделировании движения судов в тяжелых льдах возможно детально измерить параметры ледовой среды. Поэтому актуальны полуэмпирические модели, настраиваемые на данные физических модельных экспериментов в ледовых опытовых бассейнах.

4. Экспериментальные исследования движения ледоколов набегами в опытовом бассейне

Испытания движения моделей ледоколов проектов 21900, 1191, 16 с различной формой корпуса (рис. 1, 2, 3) набегами на этапе продвижения в сплошном льду были проведены зимой 2025 года в опытовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева с естественным охлаждением. В качестве модели льда использовался «тонкий» естественный лед. Характеристики испытываемых моделей ледоколов приведены в табл. 2.

Естественный лед имеет при моделировании повышенную прочность по сравнению со строгой теорией моделирования, поэтому получило распространение о невозможности его использования [9, 10]. Однако, при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность модельного льда σ_m можно меньшей толщиной, чем требуется (моделируется разрушение ледяного покрова). Многолетний опыт нашей работы в ледовом бассейне НГТУ показал на возможность такого подхода [7].

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов

Обозначение	$K_{ов}$	K_p	$K_{ост}$	$K_{ид}$	$K_{п}$
Единица измерения	-	кПа ²	-	-	-
Значение	3,71	$2,45 \cdot 10^6$	1,77	1,38	0,70

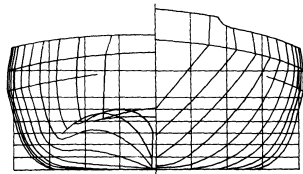


Рис. 1. Теоретический корпус ледокола проекта 16

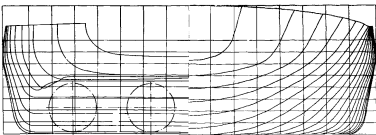


Рис. 2. Теоретический корпус ледокола проекта 1191

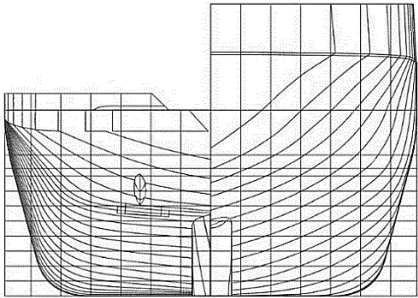


Рис. 3. Теоретический корпус ледокола проекта 21900

Таблица 2

Характеристики ледоколов и масштабы их моделей

Характеристики	Размерность	Проекты ледоколов		
		16	1191	21900
Водоизмещение, т	т	777	2180	14300
Длина по КВЛ, м	м	44,7	73,0	114,0
Ширина по КВЛ, м	м	11,4	16,0	28,02
Осадка по КВЛ, м	м	2,72	2,5	8,5
Мощность:	кВт			
- на фланцах двигателей				
- на гребных валах				
Скорость судна на чистой воде	м/с	5	6,94	8,22
Масштаб модели	-	1:35	1:50	1:100



Рис. 4. Фрагмент испытаний движения модели ледокола проекта 21900



Рис. 5. Фрагмент испытаний движения модели ледокола проекта 1191



Рис. 6. Фрагмент испытаний движения модели ледокола проекта 16

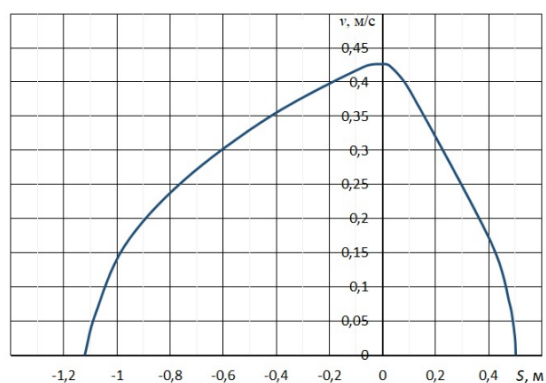
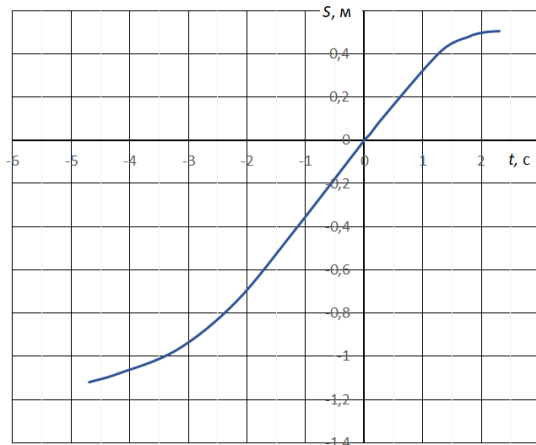
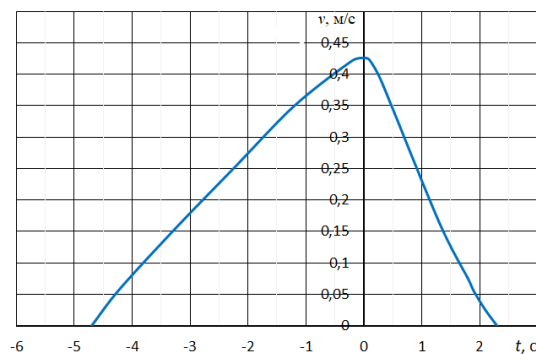


Рис. 7. Параметры движения модели ледокола пр. 21900 набегами во льду толщиной 5,63 мм (опыт № 8)

Таблица 3

Экспериментальные данные по работе моделей ледоколов набегам

Дата	Номер опыта	Время	Толщина льда ср. $h_{ср}$, мм	Длина разбега, см	Скорость разбега, м/с	Длина продвижения, см
Модель пр. 21900 (1:100), тяга 1,63 Н						
22.01.2025	8	12:04	5,63	114	0,425	41
	9	12:07	5,63	146	0,83	157
	14	12:17	5,63	182	0,685	69
	21	12:28	5,63	291	0,64	58
	23	12:31	5,63	380	0,675	58
	25	14:48	3,29	98	0,38	119
	26	14:51	3,29	149	0,47	95
	27	14:53	3,29	229	0,72	260
	29	17:35	4,45	70	0,47	92
	30	17:36	4,45	159	0,63	129
	31	17:38	4,45	224	0,64	96
	32	17:39	4,45	280	0,65	124
	33	17:41	4,45	339	0,82	131
Модель пр. 1191 (1:50), тяга 3,26 Н						
12.02.2025	1	11:25	5,2	66	0,46	183
	2	11:27	5,2	200	0,7	201
	4	11:30	5,2	125	0,55	320
	7	15:23	4,4	20	0,25	219
	9	15:27	4,37	76	0,41	210
	10	15:29	4,38	157	0,59	398
18.02.2025	13	12:23	5,9	44	0,32	46
	15	12:26	5,35	156	0,64	159
20.02.2025	19	17:23	4,7	94	0,5	405
	20	17:25	4,8	108	0,54	310
21.02.2025	22	19:19	7,7	207	0,62	139
	24	19:25	7,7	76	0,29	41
	25	19:27	7,6	150	0,44	117
Модель пр. 16 (1:35), тяга 2,61 Н						
22.02.2025	5	1:14	6,2	50	0,32	22
	6	1:16	6,2	95	0,44	33
	7	1:18	6,2	209	0,64	58
	8	1:21	6,2	250	0,675	84
	14	8:24	7,2	222	0,66	63
	15	8:29	7,3	340	0,88	82
	16	8:32	7,5	300	0,75	82
	17	8:34	6,9	400	0,85	136
	18	8:37	6,8	350	0,8	115
	19	8:39	7,2	450	0,85	104
	20	8:41	7,0	320	0,75	91
	23	8:50	7,2	150	0,54	58
	24	8:53	7,5	250	0,64	39

При моделировании в «тонком» естественном льду [7]:

- масштаб пересчета толщин льда λ_h

$$\lambda_h = \frac{h_n}{h_m} = \lambda^{4/3}; \quad (28)$$

- модуль пересчета сопротивления R при моделировании по Фруду

$$R_n = \lambda^3 R_m; \quad (29)$$

- скорость движения ледокола:

$$v_n = v_m \sqrt{\lambda}. \quad (30)$$

Равенство коэффициентов трения $f_n = f_m$ корпуса судна и модели о естественный и моделируемый лед можно обеспечить специальным покрытием модели. Испытания проводились в холодное время года с использованием естественного намораживания льда. Лед намораживался толщиной, которую

ледокол не может преодолеть непрерывным ходом. Движение осуществлялось с разбега. Разгон моделей ледоколов осуществлялся в поле битого льда после прохода модели или с чистой воды и являлся вспомогательным для определения скорости входа в ненарушенный ледяной покров, так как моделировался этап продвижения моделей ледокола в сплошном льду.

В протоколах записи параметров движения моделей ледоколов указывались: дата проведения испытаний, условия намораживания льда (снег, ветер), температура воздуха и воды, модель ледокола, ее масштаб и характеристики, толщина ледяного покрова, разгонный груз (если он был), буксировочный груз, длина разгонного участка, скорость входа модели в ненарушенный ледяной покров, путь продвижения в сплошном льду. Испытания проводились с одним буксировочным грузом для каждой модели ледокола,

соответствующим максимальной тяги. Толщина модели ледяного покрова измерялась штангенциркулем в нескольких точках по длине проложенного канала, а затем осреднялась. Плотность льда определена путем взвешивания льдинки вместе сосудом, в котором она плавает свободно и в притопленном состоянии на высокоточных весах [13]. Коэффициент трения пары корпус судна – ледяной покров f определен буксировкой корпуса модели по замороженному модельному ледяному покрову.

Фрагменты испытаний движения моделей ледоколов проектов 21900, 1191 и 16 набегам в сплошном льду, толщина которого превышала преодолеваемую непрерывным ходом, приведены на рис. 4, 5, 6. Выборочные результаты испытаний моделей ледоколов приведены в табл. 3. Во время движения моделей велась запись скорости движения от времени. Пример обработанной записи во время набега приведена на рис. 7.

Заключение

Проведенные исследования движения моделей ледоколов набегам позволяют определить эмпирические коэффициенты при движении только на этапе продвижения в сплошном льду.

Для настройки математической модели средней скорости движения ледоколов набегам запланированы испытания в битом льду, что имитирует движение ледокола на этапах отхода от ненарушенной кромки льда и разбега для набора кинетической энергии. В качестве модели ледяного покрова будут использованы плитки полиэтилена высокого давления различной толщины и размеров.

Полученные экспериментальные данные (табл. 3) будут использованы для настройки математической модели по определению средней скорости движения набегам.

С использованием данных модельных испытаний, где достоверно определяются характеристики ледяного покрова и параметры движения моделей судов, эмпирические коэффициенты будут уточнены. Увеличение количества и повышение качества данных экспериментов приводит к повышению надежности K_{ov} , K_p , $K_{ост}$, $K_{ид}$, K_n , следовательно, методики расчета движения ледокола набегам. То есть, приведенную теоретико-экспериментальную модель движения ледокола набегам следует рассматривать в единстве с используемыми экспериментальными данными.

Литература

1. Бокатова Е.А., Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Бабич Е.М., Крупина Н.А. Ледовые натурные испытания атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь». Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 3 (405). С. 71-80.
2. Васина Н.А. Движение ледокола в ровном ледовом поле при работе с разбега // Теория и прочность ледокольного корабля: Межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. Горький, 1980. с. 34-39.
3. Ионов Б.П., Дубов А.А., Леднев В.А. Экспериментальные исследования ходкости ледоколов при работе набегам // Проектирование средств продления навигации: Межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. - Горький, 1986. с.23-39.
4. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Математическая модель движения судов в сложной ледовой обстановке. Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Издательство «ЛЕМА», 2023. С. 462-466.
5. Калинина Н.В., Грамузов Е.М., Куркин А.А. Теоретическая модель сопротивления при движении ледокола в канале битого льда. Инженерная физика, № 2, 2023. с.3-9.
6. Девнин С.И. Аэродинамический расчет плохобтекаемых судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1967. 223с.
7. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов: – СПб.: Судостроение, 2013. – 502 с.
8. Игнатьев М.А., Рывлин А.Я. Экспериментальные исследования ледовых качеств судов в натурных условиях. Проблемы Арктики и Антарктики. 1970. Вып.23. с.119-123.
9. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 207с.
10. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021. 308 с.
11. Грамузов Е.М., Калинина Н.В. Использование натурных экспериментальных данных при прогнозировании ходкости ледоколов набегам. Журнал «Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» № 4(16), 2013. С. 83-92.
12. Калинина Н.В., Ларин А.Г., Грамузов Е.М., Куркин А.А. Экспериментальные исследования для настройки полумпирических моделей взаимодействия судов со льдом. Инженерная физика, № 5, 2023. с.3-11.
13. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Определение физико-механических свойств льда при прогнозировании ледовой ходкости судов в опытовом бассейне. Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск № 1, 2024. С.86-93.

References

1. Bokatova E.A., Dobrodeev A.A., Sazonov K.E., Babich E.M., Krupina N.A. Ledovye naturnye ispytaniya atomnyh ledokolov «Arktika» i «Sibir» [Full-scale ice tests of the nuclear icebreakers «Arctic» and «Siberia»]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2023. № 3 (405). S. 71-80.
2. Vasina N.A. Dvizhenie ledokola v rovnom ledovom pole pri rabote s razbega [Icebreaker movement in a flat ice field when running]. Teorija i prochnost' ledokol'nogo korablja: Mezhuuz. sb. Gor'kov. politehn. in-t. Gor'kij, 1980. s. 34-39.

3. Ionov B.P., Dubov A.A., Lednev V.A. Jeksperimental'nye issledovaniya hodkosti ledokolov pri rabote nabegami [Experimental studies of icebreaker seaworthiness during ramming]. Proektirovanie sredstv prodlenniya navigacii: Mezhdvuz. sb. Gor'kov. politehn. in-t. Gor'kij, 1986. s.23-39.
4. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Matematicheskaja model' dvizhenija sudov v slozhnoj ledovoj obstanovke [Mathematical model of vessel movement in difficult ice conditions]. Trudy Vserossijskoj konferencii «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki». SPb.: Izdatel'stvo «LEMA», 2023. S. 462-466.
5. Kalinina N.V., Gramuzov E.M., Kurkin A.A. Teoreticheskaja model' soprotivlenija pri dvizhenii ledokola v kanale bitogo l'da [Theoretical model of resistance during icebreaker movement in a channel of broken ice]. Inzhenernaja fizika, № 2, 2023. s.3-9.
6. Devnin S.I. Aerodinamicheskij raschet plohoobtekaemyh sudovyh konstrukcij. [Aerodynamic calculation of poorly streamlined ship structures]. L.: Sudostroenie, 1967. 223 s.
7. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
8. Ignat'ev M.A., Ryvlin A.Ja. Jeksperimental'nye issledovaniya ledovyh kachestv sudov v naturnyh uslovijah [Experimental studies of ice qualities of ships in natural conditions]. Problemy Arktiki i Antarktiki. 1970. Vyp.23. s.119-123.
9. Ryvlin A.Ja., Hejsin D.E. Ispytanija sudov vo l'dah [Testing ships in ice]. L.: Sudostroenie, 1980. 207 s.
10. Sazonov K.E. Model'nyy i naturnyy eksperimenty v morskoy ledotekhnike [Model and full-scale experiments in marine ice engineering]. Sankt-Peterburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2021.
11. Gramuzov E.M., Kalinina N.V. Ispolzovanie naturnyh jeksperimental'nyh dannyh pri prognozirovanii hodkosti ledokolov nabegami [The use of field experimental data in predicting the seaworthiness of icebreakers by ramming]. Zhurnal «Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta» № 4(16), 2013. S. 83-92.
12. Kalinina N.V., Larin A.G., Gramuzov E.M., Kurkin A.A. Jeksperimental'nye issledovaniya dlja nastrojki polujempiricheskikh modelej vzaimodejstvija sudov so l'dom [Experimental studies for setting up semi-empirical models of ships' interaction with ice]. Inzhenernaja fizika, № 5, 2023. s.3-11.
13. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Opredelenie fiziko- mehanicheskikh svojstv l'da pri prognozirovanii ledovoj hodkosti sudov v opytovom bassejne [Determination of physical and mechanical properties of ice when predicting the ice propulsion of ships in an experimental basin]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. Special'nyj vypusk № 1, 2024. S. 86-93.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калинина Надежда Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

Nadezhda V. Kalinina, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 01.11.2025.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.071>

Роль трения в сопротивлении движению судна в ровном сплошном льду

Грамузов Е.М.¹ terkor54@mail.ru, Калинина Н.В.¹ nvk5133@mail.ru,Солдаткин О.Б.¹ gdanovec@yandex.ru, Жуков А.Е.¹ zhukov@nntu.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Трение сплошного льда о корпус судна во время движения играет важную роль. Силы трения наружной обшивки ледокола о лёд являются существенной добавкой к ледовому сопротивлению. Большинство расчетных моделей ледового сопротивления их не учитывают в явном виде. Это препятствует осмыслению мероприятий по снижению ледового сопротивления, обусловленного трением. Трение сопровождается ломку ледяного покрова и локальное разрушение кромки льда в местах контакта с корпусом судна в районе ватерлинии, поворачивание, притапливание и раздвигание обломков льда в подводной части корпуса. Отмечены физические особенности этих процессов. При физическом моделировании сопротивления ледокола в ледовых бассейнах необходимо уделять внимание моделированию трения. Трение зависит от состояния ледяного покрова и покрытия наружной обшивки корпуса ледокола. Проиллюстрировано количественное влияние трения на примере ледокола проекта 1105. При прогнозировании ледового сопротивления судов необходимо учитывать коэффициент трения на этапе проектирования и оптимизации маршрутов при движении в сплошных льдах.

Ключевые слова: ледокол, сопротивление движению, трение, сплошной лед, наружная обшивка, математическое моделирование.

Для цитирования: Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Солдаткин О.Б., Жуков А.Е. Роль трения в сопротивлении движению судна в ровном сплошном льду, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 25—30. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.071

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.071>

The role of friction in resistance to the movement of ship in solid ice

Eugene M. Gramuzov¹ terkor54@mail.ru, Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru,Oleg B. Soldatkin¹ gdanovec@yandex.ru, Alexander E. Zhukov¹ zhukov@nntu.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. The friction of solid ice against the hull of the vessel during movement plays an important role. The friction forces of the icebreaker's outer skin against the ice are a significant addition to the ice resistance. Most calculation models of ice resistance do not take them into account explicitly. This hinders the understanding of measures to reduce ice resistance caused by friction. Friction accompanies breaking of ice cover and local destruction of ice edge at the points of contact with the ship's hull in the area of the waterline, turning, sinking and moving apart of ice fragments in the underwater part of the hull. The physical features of these processes are noted. When physically modeling the resistance of an icebreaker in ice basins, attention should be paid to modeling friction. The friction depends on the condition of the ice cover and the coating of the outer shell of the icebreaker hull. The quantitative effect of friction is illustrated using the example of the icebreaker project 1105. When predicting the ice resistance of ships, it is necessary to take into account the coefficient of friction at the stage of designing and optimizing routes when traveling in solid ice.

Keywords: icebreaker, resistance to movement, friction, solid ice, outer skin of hull, mathematical modeling.

For citation: Eugene M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Oleg B. Soldatkin, Alexander E. Zhukov. The role of friction in resistance to the movement of ship in solid ice, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 25—30. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.071

Введение

Трение льда о корпус судна играет важную роль в сопротивлении движению судна в ровном сплошном льду, оказывая значительное влияние на расход топлива, мощность двигателя и эксплуатационные характеристики судна.

Анализ исследований и наблюдений за работой ледоколов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] позволяет выделить основные причины возникновения ледового сопротивления. При движении судна в ровном сплошном льду затрачивается энергия на:

- ломку ледяного покрова;

- локальное разрушение кромки льда в местах контакта с корпусом судна;
- поворачивание, притапливание и раздвигание обломков льда;
- сопротивление снега;
- трение льда о корпус судна.

Сопротивление при движении в этих условиях складывается из различных составляющих, и трение льда о корпус сопутствует им. Знание закономерностей трения льда важно для моделирования движения судна во льдах. На трение льда о корпус судна влияют следующие факторы: форма корпуса, а именно наклон бортов к вертикали; свойства льда и наличие снега на ледяном покрове.

Прочность льда зависит от температуры воздуха и воды, количества примесей в воде и её солёности. Снежный покров на льду прилипает к корпусу судна и увеличивает трение. Плотность льда сказывается на плавучести льдин, а следовательно, на трении льдин о корпус судна.

Силы трения наружной обшивки ледокола о лёд, спроецированные на направление движения, являются существенной добавкой к ледовому сопротивлению. Однако большинство расчетных моделей ледового сопротивления их не учитывают в явном виде [1, 8]. Это препятствует осмыслению мероприятий по снижению ледового сопротивления, обусловленного трением. Таких как: гидроомывание и пневмоомывание корпуса, антифрикционные лакокрасочные покрытия корпуса, например абразивостойкое ледовое покрытие Inerta 160. Затрудняется пересчет результатов физических испытаний моделей ледоколов на натуре.

Таким образом, роль трения льда о корпус судна заключается в непосредственном воздействии на эффективность, безопасность и экономические показатели операций ледового плавания и требует учета в расчетных моделях сопротивления. Минимизация трения является одной из ключевых задач проектирования и эксплуатации современных морских судов, работающих в условиях Арктики и антарктических регионов.

1. Сопротивление разрушению льда при движении ледокола в ровном сплошном льду

Разделим силы трения наружной обшивки ледокола о лёд на:

- трение кромки ЛП о корпус в процессе ломки ледяного поля;
- трение обломков льда о корпус в подводной части в зоне облегания (ледяной рубашки).

В первом случае имеет место «сухое трение» при высоком контактном давлении, описываемое законом Кулона–Амонтона. Сила трения F прямо пропорциональна нормальному контактному усилию N :

$$F = f N, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения.

Во втором – «мокрое» трение с прослойкой заборной воды. Зависимость F от N , в этом случае, в корабельной ледотехнике мало изучено. Это дополнительно осложняется тем, что контактное давление находится на низком уровне. Для льдин толщиной 1 метр – менее 1 кПа, а для моделей судов еще в масштаб раз меньше. Однако, в сложившейся практике, используется зависимость типа (1) с увеличенным в 2...3 раза коэффициентом трения.

Для удобства теоретических и экспериментальных исследований чистое ледовое сопротивление будем считать состоящим из трех взаимно независимых частей

$$R = R_p + R_o + R_{сн}, \quad (2)$$

где R_p – сопротивление разрушению целого льда; R_o – сопротивление обломков льда; $R_{сн}$ – сопротивление снега.

Первое слагаемое сопротивление разрушению целого льда R_p объединяет в себе затраты энергии, связанные с нарушением целостности ледяной пластины, а именно: ломку, разрушение кромки и

трение о кромку целого льда. Сопротивление обломков льда R_o обусловлено взаимодействием корпуса судна с обломками разрушенного ледяного поля. Оно включает поворачивание, притапливание и раздвигание обломков льда, а также трение обломков льда о корпус.

Гипотеза о независимости составляющих сопротивления (2) общепринята, подвергалась экспериментальной проверке [3, 9], и положена в основу исследований.

Анализ процессов, происходящих при движении ледокола, позволяет установить различный характер действия отдельных составляющих ледового сопротивления. Составляющая R_p , связанная с дискретными процессами ломки ледяного покрова, существенно не постоянна как по величине, так и по месту приложения. Сопротивление обломков R_o , хотя и обусловлено движением неоднородной среды, имеет более установившийся характер, сравнимый с движением однородного слоя, отличной от воды плотности.

Приведенный характер действия отдельных составляющих ледового сопротивления основан на рассмотрении картины движения ледокола в сплошном льду и специальных модельных исследованиях, проведенных в ледовом опытовом бассейне [3].

Следовательно, под составляющими сопротивления (2) понимаются средние значения сопротивления.

Исходя из закона сохранения энергии, напомним уравнение энергетического баланса для некоторого отрезка пути:

$$A_T = A_p + A_o + A_{сн}, \quad (3)$$

где A_T – работа силы тяги винтов на гаке P_T , где тяга на гаке P_T определяется как полезная тяга ледокола P_e за вычетом сопротивления воды R_B : $P_T = P_e - R_B$; A_p – энергия разрушения целого ледяного покрова; A_o – энергия, затрачиваемая на поворот, притапливание, раздвигание обломков и на их трение о корпус и друг о друга; $A_{сн}$ – дополнительные затраты энергии, связанные с наличием снега.

Уравнение (3) учитывает, что единственным поставщиком энергии, затрачиваемой на преодоление составляющих сопротивления, является работа тяги винтов. Поделив уравнение (3) на путь l , получим формулу для вычисления ледового сопротивления

$$R = P_T = \frac{1}{l} (A_p + A_o + A_{сн}). \quad (4)$$

Учитывая постоянный характер составляющих, связанных с преодолением обломков льда, уравнение (4) перепишем в виде

$$R = \frac{1}{l} A_p + R_o + R_{сн}. \quad (5)$$

Первое слагаемое представляет собой формулу для определения сопротивления, связанного с разрушением ледяного покрова

$$R_p = \frac{1}{l} A_p. \quad (6)$$

Энергия, затрачиваемая ледоколом на разрушение сплошного ледяного покрова, складывается из энергий, затраченных на

разрушение в каждой точке контакта корпуса с кромкой целого ледяного поля

$$A_p = \sum A_{pi} \quad (7)$$

Полная работа разрушения льда в i -той точке контакта может быть вычислена по формуле [3, 10]

$$A_{pi} = (1 + f \gamma_{лти}) A_{zi} + A_{снi}, \quad (8)$$

где A_{zi} - работа вертикальных сил, ломающих ледяной покров; $\gamma_{лти} = (n_x^{-2} + n_z^{-2})^{1/2}$ - функция, характеризующая форму корпуса в точке контакта.

Учитывая, что $A_{zi} \gg A_{снi}$ для наших целей можно (с ошибкой в безопасную сторону) положить

$$A_{pi} = (1 + f \gamma_{лти}) A_{zi}. \quad (9)$$

Наблюдения и анализ кинематических схем разрушения льда показывают, что вероятность взаимодействия со льдом вдоль ватерлинии убывает от форштевня к средней части, но по ширине канала остается практически постоянной. Поэтому под средними геометрическими характеристиками ватерлинии будем понимать

$$\Phi_{лт} = \frac{2}{B} \int_0^{\frac{B}{2}} \gamma_{лтi}(y) dy = \frac{2}{B} \int_0^{\frac{B}{2}} \sqrt{\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2}} dy. \quad (10)$$

2. Трение корпуса о кромку ледяного покрова

Увеличение составляющей разрушения льда за счет трения кромки ледяного покрова о корпус будем характеризовать увеличивающим коэффициентом k_{pf} . Для этого уравнение (9) перепишем в виде

$$k_{pf} = A_{pi}/A_{zi} = (1 + f \gamma_{лти}) \quad (11)$$

или в среднем

$$k_{pf} = A_p/A_z = (1 + f \Phi_{лт}). \quad (12)$$

Коэффициент трения f зависит от состояния ледяного покрова и от покрытия наружной обшивки корпуса.

Расчеты, показывающие увеличение составляющей разрушения льда за счет трения кромки ледяного покрова о корпус выполнены на примере ледокола проекта 1105 «Капитан Чечкин» (рис. 1), характеристики которого приведены в табл. 1. Характеристики формы корпуса ледокола проекта 1105 приведены в табл. 2.



Рис. 1. Ледокол проекта 1105 «Капитан Чечкин»

Значения увеличивающего коэффициента k_{pf} получены с использованием зависимости (12) и приведена на рис. 2. Из рис. 2 видно, что составляющая сопротивления разрушения льда

существенно зависит от коэффициента сухого трения.

Таблица 1

Основные характеристики ледокола проекта 1105

№ п/п	Характеристика	Значение
1.	Класс судна по Российскому Речному Регистру	М-СП 3,5 (ледокол)
2.	Длина по КВЛ $L_{КВЛ}$, м	71,00
3.	Ширина судна B , м	16,00
4.	Высота борта H , м	4,80
5.	Максимальная осадка T , м	3,50
6.	Минимальная осадка без дифферента, м	3,25
7.	Водоизмещение D , т	2240
8.	Коэффициент общей полноты δ	0,610
9.	Мощность главных двигателей N , кВт	4650
10.	Скорость на чистой воде v , км/ч / м/с	25,7 / 7,10
11.	Тяга на швартовах, кН	414
12.	Предельная ледопроходимость, м	0,75
13.	Автономность, сутки	20
14.	Двигатель	3 ВФШ
15.	Площадь зоны облегаания льдом, м ²	510

Таблица 2

Характеристики формы корпуса ледокола проекта 1105

Функция	Значение
$\gamma_{лтф}$	3,468
$\gamma_{сф}$	0,697
$\Phi_{лт}$	5,830
$\Phi_{с}$	1,288
$\Phi_{п}$	0,065
$\Phi_{лт}$	0,735
$\Phi_{и}$	0,064
$\Phi_{ит}$	0,234
$\Phi_{г}$	0,005
$\Phi_{гт}$	0,018

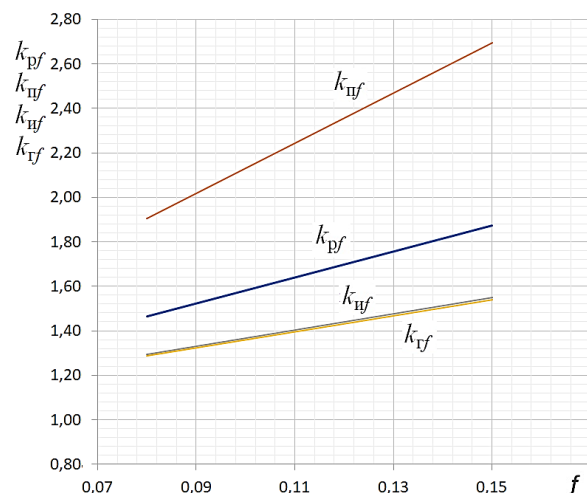


Рис. 2. Коэффициенты увеличения составляющих сопротивления разрушения, приталивания, инерционной и гидродинамической в зависимости от коэффициента трения f

3. Модель сопротивления обломков сплошного льда

Теоретическая модель сопротивления обломков льда при движении в ровном сплошном неразрушенном ледяном поле может быть записана следующим образом [3, 10]:

$$R_o = R_n + R_i + R_f =$$

$$= (\rho - \rho_l)gh\Omega_L(\Phi_n + f\Phi_{пт}) +$$

$$+ \rho_l h B v^2 \left(1 + \frac{0,019}{(0,215 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1\phi})} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{1}{\alpha h} \right) (\Phi_i + f\Phi_{ит}) +$$

$$+ 2 \frac{\rho}{\rho_l} \frac{\Omega_L}{Bh} (\Phi_f + f\Phi_{гт}) \quad (13)$$

где R_n - сопротивление, обусловленное притапливанием льдин ввиду их плавучести; R_i - инерционная составляющая сопротивления; R_f - гидродинамическая часть сопротивления, связанная с сопротивлением воды движению льдин; Φ_i - геометрические функции, характеризующие форму корпуса судна с точки зрения сопротивления обломков льда [3]:

$$\Phi_n = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_x n_z d\Omega; \quad \Phi_{пт} = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_z \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega;$$

$$\Phi_f = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_x^3 d\Omega; \quad \Phi_{гт} = \frac{1}{\Omega_n} \int_{\Omega_n} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega;$$

$$\Phi_i = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{n_x^2} dy; \quad \Phi_{ит} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy.$$

$$n_x = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}}; \quad n_z = \frac{\operatorname{tg} \varphi_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}};$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\rho g / d}; \quad d = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)};$$

n_x, n_z - направляющие косинусы нормали к судовой поверхности для произвольной точки поверхности; φ_1 - угол между касательной к ватерлинии и ДП; φ_2 - угол наклона шпангоута; B - ширина ледокола, м; f - коэффициент трения льда о корпус судна; h - толщина льда, м; $h_{сн}$ - толщина снега, м; g - ускорение свободного падения, м/с²; $Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ - число Фруда по толщине льда; v - скорость движения, м/с; Ω_n - площадь подводной части корпуса, обтекаемая льдом, м²; α - параметр изгиба пластины на упругом основании; d - цилиндрическая жесткость ледяной пластины; E - модуль упругости, кПа; μ - коэффициент Пуассона льда; ρ, ρ_l - плотность воды и льда, т/м³.

4. Трение обломков льда о подводную обшивку корпуса

Трение обломков льда о корпус характеризуется наличием водной смазки и низкими контактными давлениями. Поэтому выбор коэффициента трения является дискуссионным и требует дополнительных исследований. Тем не менее найдем значения коэффициентов увеличения составляющих сопротивления притапливания, инерционной и гидродинамической в зависимости от коэффициента трения.

Для этого воспользуемся линейными зависимостями.

Коэффициент увеличения составляющей сопротивления притапливания за счет трения равен

$$k_{пф} = 1 + f (\Phi_{пт} / \Phi_n); \quad (14)$$

для инерционной составляющей сопротивления

$$k_{иф} = 1 + f (\Phi_{ит} / \Phi_i); \quad (15)$$

и для гидродинамической составляющей сопротивления

$$k_{гф} = 1 + f (\Phi_{гт} / \Phi_f). \quad (16)$$

Значения увеличивающих коэффициентов $k_{пф}$, $k_{иф}$, $k_{гф}$ получены с использованием зависимостей (14), (15) и (16) на примере ледокола проекта 1105 и приведена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что значение составляющая сопротивления притапливания $k_{пф}$ существенно зависит от коэффициента трения. Коэффициенты увеличения инерционной составляющей сопротивления $k_{иф}$ и гидродинамической составляющей сопротивления $k_{гф}$ зависят от величины коэффициента «мокрого» трения и незначительно увеличивают сопротивление при движении в сплошном льду.

Заключение

Трение льда о корпус существенно увеличивает сопротивление сплошного льда движению ледокола.

Трение сопровождается ломкой ледяного покрова и локальное разрушение кромки льда в местах контакта с корпусом судна в районе ватерлинии, поворачивание, притапливание и раздвигание обломков льда в подводной части корпуса. Отмечены физические особенности этих процессов.

При физическом моделировании сопротивления ледокола в ледовых бассейнах необходимо уделять внимание моделированию трения. Трение зависит от состояния ледяного покрова и покрытия наружной обшивки корпуса ледокола. Количественно это влияние проиллюстрировано на примере ледокола проекта 1105 «Капитан Чечкин».

Показано, что трение при ломке ледяного покрова существенно зависит от коэффициента сухого трения. В тоже время, «мокрое» трение обломков льда более чувствительно к величине коэффициента трения для составляющей сопротивления, связанной с притапливанием обломков льда. Однако, следует заметить, что «мокрое» трение обломков льда менее изучено и его линейная зависимость не доказана. Это необходимо учитывать соблюдая требования к физическому моделированию сопротивления ледоколов и судов ледового плавания в опытовых бассейнах.

Изучение трения играет важную роль при прогнозировании сопротивления судна при движении в ровном сплошном льду. Необходимо учитывать коэффициент трения при проектировании судов для эксплуатации в ледовых условиях и оптимизации маршрутов.

Литература

1. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 207 с.
2. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. Санкт-Петербург, 2010. 274 с.
3. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2013. 504 с.
4. Калинина Н.В., Солдаткин О.Б. Теоретико-экспериментальные исследования влияния состояния ледяного покрова на ходкость судов в условиях продленной навигации. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 60, 2019. Нижний Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. С.53-62.
5. Поздняк И.И. Фрикционные характеристики модели ледокола. Труды ААНИИ. Ледовые качества судов, том 376. Л.: Гидрометеиздат, 1981. с.88-94.
6. Каневский Г.И., Сазонов К.Е., Клубничкин А.М. Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. СПб: Крыловский государственный научный центр, 2019. 160 с.
7. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021. 308 с.
8. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986. 207 с.
9. Каштелян В.И., Поздняк И.И., Рывлин А.Я. Сопrotивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968. 238 с.
10. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Теоретическая модель сопротивления разрушения льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле. Экологические системы и приборы, № 10, 2022. С.25-35.

References

1. Ryvlin A.Ja., Hejsin D.E. Ispytanija sudov vo l'dah [Testing ships in ice]. L.: Sudostroenie, 1980. 207 s.
2. Sazonov K.E. Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dah [Theoretical foundations of navigation of ships in the ice]. Sankt-Peterburg, 2010.
3. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
4. Kalinina N.V., Soldatkin O.B. Teoretiko-jeksperimental'nye issledovanija vlijaniya sostojanija ledjanogo pokrova na hodkost' sudov v uslovijah prodlennoj navigacii [Theoretical and experimental studies of the effect of the state of the ice cover on the propulsion of ships in conditions of extended navigation]. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. Vypusk 60, 2019. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2019. S.53-62.
5. Pozdnjak I.I. Frikcionnye harakteristiki modeli ledokola [Friction characteristics of the icebreaker model]. Trudy AANII. Ledovye kachestva sudov, tom 376. L.: Gidrometeoizdat, 1981. s.88-94.
6. Kanevskij G.I., Sazonov K.E., Klubnichkin A.M. Prognozirovanie harakteristik hodkosti mnogoval'nyh sudov [Prediction of performance characteristics of multi-shaft vessels]. SPb: Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr, 2019. 160 s.
7. Sazonov K.E. Model'nyy i naturnyy eksperimenty v morskoy ledotekhnike [Model and full-scale experiments in marine ice engineering]. SPb.: FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr», 2021. 308 s.
8. Zuev, V.A. Sredstva prodlenija navigacii na vnutrennih vodnyh putjah [Means of prolonging navigation on inland waterways]. L.: Sudostroenie, 1986. 207 s.
9. Kashteljan V.I., Poznjak I.I., Ryvlin A.Ja. Soprotivlenie l'da dvizheniju sudna [Ice resistance to ship movement]. L.: Sudostroenie, 1968. 238 s.
10. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Teoreticheskaja model' soprotivlenija razrushenija l'da pri dvizhenii ledokola v rovnom sploshnom ledjanom pole [Theoretical model of ice destruction resistance when an icebreaker moves in a solid ice]. Jekologicheskie sistemy i pribory, № 10, 2022. S.25-35.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Грамузов Евгений Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: terkor@nntu.ru

Eugene M. Gramuzov, Dr. Sci. (Eng.), assistant professor, Professor of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: terkor@nntu.ru

Калинина Надежда Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

Солдаткин Олег Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Жуков Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: zhukov@nntu.ru

Nadezhda V. Kalinina, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Oleg B. Soldatkin, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department «Power plants and thermal engines», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Alexander E. Zhukov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department «Aero-Hydrodynamics, Machine Strength and Strength of Materials», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: zhukov@nntu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 25.10.2025.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.072>**Динамика движения ледокола в различных ледовых условиях**Калинина Н.В.¹ nvk5133@mail.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Эксплуатация ледоколов осуществляется в различных ледовых условиях: в мелкобитых природных льдах, в битых льдах в канале, в ровных сплошных льдах или торосах непрерывным ходом и набегами. Изучение динамики движения ледоколов в различных ледовых условиях является актуальным и способствует оптимальному проектированию и эксплуатации судов ледовых классов. Рассмотрен аналитический подход для изучения динамики движения ледоколов в различных ледовых условиях. Записаны дифференциальные уравнения движения судов. Рассмотрены внешние силы, действующие на ледокол при его движении в продольной вертикальной плоскости. Приведены зависимости для определения тяги и сопротивления судов при движении в различных ледовых условиях. Дифференциальные уравнения движения судна записаны для различных ледовых условий при движении в сплошном и битом льду на различных режимах: ускоренном и при торможении с учетом значений внешних сил. Решая приведенные дифференциальные уравнения, можно определять не только путь, пройденный ледоколом, но и время, среднюю скорость продвижения. Определение этих параметров представляет практический интерес для решения задач ходкости. Аналитические решения дифференциальных уравнений движения ледокола позволяют более эффективно решать задачи проектирования судов. Понимание динамики движения ледоколов позволяет оптимизировать форму корпуса судов, оптимизировать маршруты следования, учитывая состояние льда и погодные условия, повысить безопасность плавания в сложных ледовых условиях.

Ключевые слова: ледокол, сплошной лед, битый лед, режимы движения, дифференциальные уравнения движения.

Для цитирования: Калинина Н.В. Динамика движения ледокола в различных ледовых условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 31—38. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.072

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.072>**Dynamics of icebreaker movement in various ice conditions**Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. Icebreakers operate in various ice conditions: in small-sized natural ice, in broken ice in a channel, in smooth solid ice or hummocks, continuously moving and by ramming. Studying the dynamics of icebreaker movement in various ice conditions is relevant and contributes to the optimal design and operation of ice class vessels. An analytical approach for studying the dynamics of icebreaker movement in various ice conditions is considered. The differential equations of motion of ships are written down. The external forces acting on the icebreaker during its movement in the longitudinal vertical plane are considered. The dependences for determining the thrust and resistance of vessels when moving in various ice conditions are given. The differential equations of motion of the vessel are written for various ice conditions when moving in solid and broken ice at various modes: accelerated and decelerated, taking into account the values of external forces. By solving the given differential equations, it is possible to determine not only the path traveled by the icebreaker, but also the time and average speed of movement. Determining these parameters is of practical interest for solving problems of propulsion. Analytical solutions of differential equations of icebreaker motion will allow more effective solution of ship design problems. Understanding the dynamics of icebreaker motion allows optimizing the shape of the ship hull, optimizing the routes, taking into account the state of ice and weather conditions, and increasing the safety of navigation in difficult ice conditions.

Keywords: icebreaker, solid ice, broken ice, modes of movement, differential equations of movement.

For citation: Nadezhda V. Kalinina Dynamics of icebreaker movement in various ice conditions, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 31—38. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.072

Введение

При эксплуатации ледоколов различают движение в битых, сплошных льдах и торосах. В битых льдах движение осуществляется в поле природного битого льда или в канале. В сплошных льдах движение ледокола осуществляется либо непрерывным ходом с постоянной скоростью, либо набегами в тяжелых льдах, когда толщина льда

превышает предельную и движение непрерывным ходом невозможно [1, 2].

Изучение динамики движения ледоколов в различных ледовых условиях является актуальным и способствует оптимальному проектированию и эксплуатации судов ледовых классов. Прогнозирование движения судна в различных ледовых условиях позволяет оптимизировать форму корпуса, конструкцию и систему управления для повышения эффективности и безопасности операций.

Для изучения динамики движения ледоколов применяют различные методы.

1. Экспериментальные исследования [2, 3, 4]. Эксперименты проводятся в опытовых бассейнах и ледовых полигонах.

2. Численное моделирование [5, 6]. Численные модели основаны на методах вычислительной гидродинамики и учитывают такие факторы, как вязкость жидкости, трение, деформации льда и взаимодействие корпуса с водой и льдом.

3. Статистический подход [3, 7]. Анализ реальных данных эксплуатации ледоколов помогает выявить закономерности и разработать рекомендации по улучшению формы корпуса и эксплуатационных характеристик.

4. Аналитические зависимости [8] которые учитывают сопротивление льда движению ледокола с заданной скоростью и тягу. Их можно получить, решив уравнения движения судна в различных ледовых условиях.

Рассмотрим аналитический подход для изучения динамики движения ледоколов в различных ледовых условиях.

1. Уравнения движения судна

Для составления уравнений движения судна введем систему координат (рис. 1): инерциальную (неподвижную) $Ox'y'z'$ и неинерциальную (подвижную, связанную с судном) $Gxyz$. При этом в начальный момент времени начала координат обеих систем совпадают и расположены в центре тяжести судна. Оси Oz' и Gz направлены вертикально вниз; Ox' и Gx – в сторону движения судна; Oy' и Gy – на правый борт.

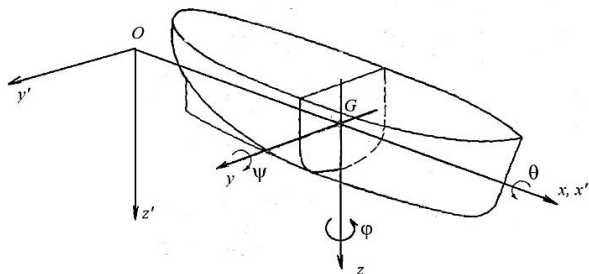


Рис. 1. Система координат

Если рассматривать движение судна в инерциальной (неподвижной) системе отсчета, то уравнение движения судна в общем случае определяется на основании второго закона динамики двумя векторными уравнениями:

$$m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_i; \quad (1)$$

$$J\vec{\varepsilon} = J \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \sum \vec{M}_i, \quad (2)$$

где m – масса судна с учетом присоединенной массы воды; $a = \frac{dv}{dt}$ – линейное ускорение судна; F_i – сумма всех сил, действующих на судно в процессе движения; v – скорость и t – время движения; J – момент инерции судна с учетом присоединенного момента инерции масс воды относительно той же оси; угловое ускорение $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$, ω – угловая скорость; $\vec{M}_i$ – момент внешних сил относительно оси вращения судна.

Первое уравнение (1) представляет собой равенство главного вектора $\vec{F}_i$ (резльтирующей силы) внешних сил $\vec{F}_i$ произведению массы судна с учетом присоединенной массы воды m на линейное ускорение судна $\frac{d\vec{v}}{dt}$. Это уравнение характеризует поступательное движение центра тяжести судна.

Второе уравнение (2) представляет собой равенство вектора главного момента внешних сил относительно оси вращения судна $\vec{M}_i$ произведению момента инерции судна с учетом присоединенного момента инерции масс воды относительно той же оси J на угловое ускорение $\frac{d\vec{\omega}}{dt}$. Это уравнение характеризует вращательное движение центра инерции судна.

Для того чтобы решить задачу о движении судна, необходимо знать законы действующих на судно сил и их моментов, которые можно подразделить на два вида:

- силы и моменты инерционной природы (внутренние силы), возникающие в результате действующих на судно ускорений;
- силы и моменты гидроаэродинамической природы (внешние силы).

Для судна, имеющего шесть степеней свободы и движущегося во льдах уравнения (1) и (2) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} &= \sum F_x; \\ D(1 + \lambda'_{22})\ddot{y} &= \sum F_y; \\ D(1 + \lambda'_{33})\ddot{z} &= \sum F_z; \\ J_x(1 + \lambda'_{44})\ddot{\theta} &= \sum M_x; \\ J_y(1 + \lambda'_{55})\ddot{\psi} &= \sum M_y; \\ J_z(1 + \lambda'_{66})\ddot{\varphi} &= \sum M_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где D – массовое водоизмещение судна; λ'_{11} , λ'_{22} и λ'_{33} – коэффициенты присоединенных масс воды и льда по осям x , y и z соответственно; λ'_{44} , λ'_{55} , λ'_{66} – коэффициенты присоединенного момента инерции от масс воды при вращении вокруг осей x , y , z ; J_x , J_y , J_z – моменты инерции ледокола относительно осей x , y , z ; F_x , F_y , F_z – сумма проекций всех сил на оси x , y , z ; M_x , M_y , M_z – суммы моментов всех сил относительно центра тяжести; $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt}$ – продольное ускорение судна; $\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dv_y}{dt}$ – поперечное ускорение судна; $\ddot{z} = \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{dv_z}{dt}$ – вертикальное ускорение судна; x, y, z – перемещение судна вдоль осей x, y, z ; $\ddot{\theta} = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$ – угловое ускорение вокруг оси x ; $\ddot{\psi} = \frac{d^2 \psi}{dt^2}$ – угловое ускорение вокруг оси y ; $\ddot{\varphi} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ – угловое ускорение вокруг оси z ; θ, ψ, φ – углы поворота относительно осей x, y, z .

Если рассматривать прямолинейное движение судна в продольной вертикальной плоскости в ледовых условиях, исключив смещение судна вдоль оси y , крен (θ) и рыскание (φ), то уравнения движения можно записать:

$$\begin{aligned} D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} &= \sum F_x; \\ D(1 + \lambda'_{33})\ddot{z} &= \sum F_z; \end{aligned} \quad (4)$$

$$J_y(1 + \lambda'_{55})\ddot{\psi} = \sum M_y.$$

Движение ледокола можно рассматривать как движение системы координат $Gxyz$ относительно $Ox'y'z'$. Будем полагать, что при движении ледокола его посадка меняется незначительно. Более того, Enkvist'ом были поставлены специальные опыты со свободной и жесткой запряжкой модели [1], показывающие независимость сопротивления от изменения осадки и дифферента. Это не оспаривалось учеными на протяжении более сорока лет. Поэтому перемещение $Gxyz$ будем рассматривать только вдоль оси Ox' , обозначим его x . Тогда при исследованиях динамики движения ледокола будем решать уравнение:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = \sum F_x. \quad (5)$$

При составлении уравнений будем считать, что движение судна происходит в горизонтальной плоскости с изменяющейся линейной скоростью v . В качестве внешних сил $\sum F_x$ выступает полезная тяга движителей ледокола P_e на переднем или заднем ходу и ледовое сопротивление R_l , определяемое для различных условий движения.

Здесь и в дальнейшем будем оперировать чистым ледовым сопротивлением R и тягой на гаке P_r (называемой по аналогии с буксирами), имея в виду индексы «пх» для переднего и «зх» заднего хода.

Чистое ледовое сопротивление R определяются за вычетом сопротивления воды R_v движению ледокола:

$$R = R_l - R_v.$$

Тяга на гаке, называемая по аналогии с буксирами, определяется как разность между полезной тягой движителей P_e и сопротивлением воды R_v при данной скорости движения:

$$P_r = P_e - R_v.$$

Коэффициент λ'_{11} присоединенных масс воды λ_{11} и льда $\Delta\lambda_{11}$ определяется:

$$\lambda'_{11} = \lambda_{11} + \Delta\lambda_{11}.$$

Коэффициент присоединенных масс воды λ_{11} [9]:

$$\lambda_{11} = \frac{5,91 \left(\frac{B}{L}\right)^2 + 7,76 \left(\frac{B}{L}\right) - 0,269}{48,4 - 6,89 \left(\frac{B}{T}\right) + 1,47 \left(\frac{B}{T}\right)^2 - 0,0475 \left(\frac{B}{T}\right)^3 + 0,176 a_{11} \delta Fr \left[1,09 - 0,015 \left(\frac{B}{T}\right)\right]},$$

где $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$; L – длина судна; $a_{11} = 0,918$ – для ускоренного движения; $a_{11} = 1,176$ – для замедленного движения.

Приращение коэффициента присоединенных масс, учитывающее влияние битого льда [9]:

$$\Delta\lambda_{11} = 6,37 \left(\frac{h}{T}\right)^{1,23} S^{1,33} \left(\frac{L}{B}\right)^{-1,34},$$

где S – сплоченность битого льда.

Рассмотрим внешние силы, действующие на ледокол при его движении в продольной вертикальной плоскости.

2. Определение тяги ледокола

Тяга ледокола на гаке $P_r = f(v)$ для приближенных расчетов может быть аппроксимирована выражением [1]:

$$P_r = P_{ш} \left[1 - 0,4 \left(\frac{v}{v_0}\right) - 0,6 \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right],$$

где $P_{ш}$ – тяга ледокола на швартовых на заднем или переднем ходу, кН; v – скорость ледокола в текущий момент времени, м/с; v_0 – скорость движения на чистой воде при заданной мощности, м/с.

Предварительный анализ дифференциального уравнения (5) на предмет получения его аналитического решения позволил тягу на гаке, фигурирующую в уравнении аппроксимировать выражением

$$P_r = P_{ш} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0}\right)^2\right], \quad (6)$$

где $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ – скорость движения.

Расхождение выражения (6) от первоначальной зависимости на скоростях в ледовых условиях составляет не более 5 %.

Тяга на гаке P_r на переднем $P_{рпх}$ или заднем ходу $P_{рзх}$ вычисляется в зависимости режима движения ледокола на переднем (пх) или заднем (зх) ходу.

3. Ледовое сопротивление при движении ледокола в сплошном ледяном поле

Для определения чистого ледового сопротивления при непрерывном движении в сплошном ледяном поле воспользуемся методом, который себя хорошо зарекомендовал и включает не только основные характеристики ледокола, физико-механические свойства льда и снега, скорость движения, но и форму корпуса судна [1, 10, 11]:

$$R = R_{pv} + R_{рст} + R_{ов} + R_{ост} + R_{сн}, \quad (7)$$

где R_{pv} – зависящая от скорости движения составляющая сопротивления разрушению; $R_{рст}$ – статическая составляющая сопротивления разрушению; $R_{ов}$ – зависящая от скорости составляющая сопротивления обломков льда; $R_{ост}$ – статическая составляющая сопротивления обломков льда; $R_{сн}$ – сопротивление снега.

Для решения дифференциального уравнения (5) и получения аналитического решения будем использовать модель сопротивления (7), но исключив зависимость от скорости, оставив только зависимость от $\dot{x}^2$. Поскольку в сплошных льдах суда движутся с небольшими скоростями, то отличие сопротивления по моделям составляет не более 3 %:

$$\begin{aligned} R = & k_{ов} \rho_l h B \left[\left(1 + \frac{0,19}{(0,215 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1\phi})} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{1}{ah}\right) \times \right. \\ & \times (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + \frac{2\rho}{\rho_l B h} (\Phi_r + f \Phi_{рт}) \left. \right] \dot{x}^2 + \\ & + k_p \frac{h^4}{\alpha d} \left[(1 + f \gamma_{лтф}) + k_{сф} \gamma_{сф} \frac{d\alpha^2}{h} \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \varphi_{2\phi}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2\phi}}} + \right. \\ & + 0,66(1 + f \Phi_{пт}) B \alpha + \frac{k_{сб} \Phi_c d \alpha^3 B}{h} \left. \right] \\ & + k_{ост} (\rho - \rho_l) g h \Omega_l (\Phi_{и} + f \Phi_{пт}) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +k_{\text{сн}}(\rho - \rho_{\text{сн}})gh_{\text{сн}}\Omega_{\text{л}}(\Phi_{\text{п}} + f\Phi_{\text{пт}}); \\
 & k_{\text{сф}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}; k_{\text{сб}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}; \\
 & k_{\text{сн}} = 0,429; \gamma_{\text{лпф}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{хф}}^2} + \frac{1}{n_{\text{зф}}^2}}; \gamma_{\text{сф}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{зф}}^2} - 1}; \\
 & \Phi_{\text{лт}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2}} dy; \Phi_{\text{с}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_z^2} - 1} dy; \\
 & \Phi_{\text{п}} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_x n_z d\Omega; \Phi_{\text{пт}} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_z \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \\
 & \Phi_{\text{г}} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_x^3 d\Omega; \Phi_{\text{гт}} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \\
 & \Phi_{\text{и}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x^2 dy; \Phi_{\text{ит}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy; \\
 & n_x = \frac{\text{tg } \varphi_2}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_2 + \text{tg}^2 \varphi_3}}; n_z = \frac{\text{tg } \varphi_3}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi_2 + \text{tg}^2 \varphi_3}}; \\
 & \alpha = \sqrt[4]{\rho g / d}; d = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)};
 \end{aligned} \quad (8)$$

где $k_{\text{ов}}=3,71$, $k_{\text{р}}=2,45 \cdot 10^6$ кПа, $k_{\text{ост}}=1,77$ - эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления сплошного льда, настроенные на натурные данные по работе ледоколов набегами; B - ширина ледокола, м; f - коэффициент трения льда о корпус судна; h - толщина льда, м; $h_{\text{сн}}$ - толщина снега, м; g - ускорение свободного падения, м/с²; $\text{Fr}_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ - число Фруда по толщине льда; v - скорость движения, м/с; $\Omega_{\text{л}}$ - площадь подводной части корпуса, обтекаемая льдом, м²; n_x , n_z - направляющие косинусы внешней нормали к обшивке судна с продольной Ox и вертикальной Oz осями; φ_1 , φ_2 , φ_3 - углы наклона батокса к горизонту, ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали в некоторой точке судовой поверхности; $\varphi_{1\text{ф}}$, $\varphi_{2\text{ф}}$, $\varphi_{3\text{ф}}$, $n_{\text{хф}}$, $n_{\text{зф}}$ - углы и направляющие косинусы на форштевне в районе действующей ватерлинии; α - параметр изгиба пластины на упругом основании; d - цилиндрическая жесткость ледяной пластины; E - модуль упругости, кПа; μ - коэффициент Пуассона льда; ρ , $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{сн}}$ - плотность воды, льда и снега, т/м³.

Переписав (8) в более удобном виде имеем:

$$\begin{aligned}
 R &= k_1 \dot{x}^2 + k_2, \\
 k_1 &= k_{\text{ов}} \rho_{\text{л}} h B \left[\left(1 + \frac{0,19}{(0,215 + \text{Fr}_h \text{tg } \varphi_{1\text{ф}})} \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}} \frac{1}{\alpha h} \right) \times \right. \\
 & \quad \times (\Phi_{\text{и}} + f\Phi_{\text{ит}}) + \frac{2\rho}{\rho_{\text{л}}} \frac{\Omega_{\text{л}}}{Bh} (\Phi_{\text{г}} + f\Phi_{\text{гт}}) \Big] \\
 k_2 &= k_{\text{р}} \frac{h^4}{\alpha d} \left[\left(1 + f\gamma_{\text{лпф}} \right) + k_{\text{сф}} \gamma_{\text{сф}} \frac{d\alpha^2}{h} \sqrt{\frac{\text{tg } \varphi_{2\text{ф}}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_{2\text{ф}}}} + \right. \\
 & \quad + 0,66(1 + f\Phi_{\text{лт}}) B \alpha + \frac{k_{\text{сб}} \Phi_{\text{с}} d \alpha^3 B}{h} \Big] + \\
 & \quad + k_{\text{ост}}(\rho - \rho_{\text{л}})gh\Omega_{\text{л}}(\Phi_{\text{п}} + f\Phi_{\text{пт}}) + \\
 & \quad + k_{\text{сн}}(\rho - \rho_{\text{сн}})gh_{\text{сн}}\Omega_{\text{л}}(\Phi_{\text{п}} + f\Phi_{\text{пт}}),
 \end{aligned} \quad (9)$$

где $\dot{x}$ - скорость движения.

В выражении (9) сопротивление R вычисляется для переднего хода. Соответственно в выражения

для определения k_1 и k_2 подставляются функции геометрии для переднего хода.

4. Ледовое сопротивление при движении ледокола в битом льду

Для определения чистого ледового сопротивления битого льда воспользуемся разработанным методом [12]:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{бл}} &= R_1 + R_2 + R_3 = \\
 &= k_{\text{ид}} \left(c_{\text{и}} \rho_{\text{л}} h \frac{B}{2} v^2 (\Phi_{\text{и}} + f\Phi_{\text{ит}}) + \right. \\
 & \quad + c_{\text{г}} \rho v^2 h \frac{B}{2} (\Phi_{\text{г}}' + f\Phi_{\text{гт}}') \Big) + \\
 & \quad + k_{\text{п}}(\rho - \rho_{\text{л}})ghbB(\Phi_{\text{п}}' + f\Phi_{\text{пт}}'); \\
 \Phi_{\text{и}} &= \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x^2 dy; \Phi_{\text{ит}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy; \\
 \Phi_{\text{г}}' &= \frac{2}{B} \int_{L_{\text{вл}}} n_x^3 dL_{\text{вл}}; \Phi_{\text{гт}}' = \frac{2}{B} \int_{L_{\text{вл}}} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} dL_{\text{вл}}; \\
 \Phi_{\text{п}}' &= \frac{2}{B} \int_{L_{\text{вл}}} n_x n_z dL_{\text{вл}}; \Phi_{\text{пт}}' = \frac{2}{B} \int_{L_{\text{вл}}} n_z \sqrt{1 - n_x^2} dL_{\text{вл}}
 \end{aligned} \quad (10)$$

Коэффициент $c_{\text{и}}$, учитывающий влияние присоединенных масс воды, зависит от размеров обломков льда и его можно оценить по формуле Пабста [13] для присоединенной массы прямоугольной пластины:

$$c_{\text{и}} = 1 + \frac{0,218 b}{h} \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}} = 1 + \frac{0,068}{h \alpha} \frac{\rho}{\rho_{\text{л}}}.$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления льдин $c_{\text{г}}$ при их поперечном обтекании можно оценить с использованием данных [1]. Для пластины, обтекаемой аналогично, $c_{\text{г}} = 2$. Средняя протяженность обломков льда b , зависящая от его толщины, определяется изгибом пластин на упругом основании и приближенно может быть принята из соотношения $b\alpha = 0,312 = \text{const}$.

Эмпирические коэффициенты $k_{\text{ид}}$, $k_{\text{п}}$, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления битого льда были настроены на натурные данные по работе ледоколов набегами и составили $k_{\text{ид}} = 1,38$; $k_{\text{п}} = 0,70$.

Перепишем выражение (10) в более удобной для исследований форме:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{бл}} &= k_3 \dot{x}^2 + k_4, \\
 k_3 &= k_{\text{ид}} \left(c_{\text{и}} \rho_{\text{л}} h \frac{B}{2} (\Phi_{\text{и}} + f\Phi_{\text{ит}}) + c_{\text{г}} \rho h \frac{B}{2} (\Phi_{\text{г}}' + f\Phi_{\text{гт}}') \right), \\
 k_4 &= k_{\text{п}}(\rho - \rho_{\text{л}})ghbB(\Phi_{\text{п}}' + f\Phi_{\text{пт}}').
 \end{aligned} \quad (11)$$

В выражении (11) сопротивление $R_{\text{бл}}$ может вычисляться как для переднего $R_{\text{бл пх}}$, так и для заднего $R_{\text{бл зх}}$ хода в зависимости режима движения ледокола. Соответственно в выражения для определения $k_{3 \text{ пх}}$ и $k_{4 \text{ пх}}$ или $k_{3 \text{ зх}}$ $k_{4 \text{ зх}}$ подставляются функции геометрии $\Phi_{\text{и}}$, $\Phi_{\text{ит}}$, $\Phi_{\text{г}}'$, $\Phi_{\text{гт}}'$, $\Phi_{\text{п}}'$, $\Phi_{\text{пт}}'$ для переднего хода или заднего хода.

5. Дифференциальные уравнения движения ледокола в ровном сплошном льду

Основным режимом движения ледокола в сплошных льдах неопредельной толщины является непрерывное движение носом с постоянной или переменной скоростью.

В сплошном ровном льду суда могут двигаться ускоренно, замедленно и с постоянной скоростью.

Рассмотрим каждый вариант движения последовательно, учитывая только движение носом вперед.

Ускоренное движение происходит за счет превышения тяги ледокола над ледовым сопротивлением при соответствующих скоростях. Уравнение поступательного движения имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_r - R. \quad (12)$$

Подставляя в уравнение (12) выражения для P_r (6) и R (9) перепишем (12) в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2$$

или

$$\ddot{x} + A_1 \dot{x}^2 = B_1, \quad (13)$$

$$A_1 = \frac{1,4P_{\text{ш}} + k_1 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_1 = \frac{P_{\text{ш}} - k_2}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

Рассмотрим вариант движения: торможение ледокола до полной остановки.

Торможение происходит за счет того, что сопротивление превышает тягу винтов, или тяга винтов равна нулю (холостой ход), или направлена в сторону, противоположную движению ледокола ($P_{\text{ш}}$).

Уравнение поступательного движения на холостом ходу имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -R, \quad (14)$$

С учетом (9) перепишем дифференциальное уравнение (14) в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -k_1 \dot{x}^2 - k_2$$

или

$$\ddot{x} + A_2 \dot{x}^2 = -B_2, \quad (15)$$

$$A_2 = \frac{k_1}{(1 + \lambda'_{11})D}; B_2 = \frac{k_2}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

Торможение ледокола может осуществляться при работе гребных винтов на задний ход. Тогда уравнение движения ледокола на переднем ходу имеет вид:

$$\bullet \quad D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -P_r - R, \quad (16)$$

С учетом (6), (9) перепишем дифференциальное уравнение (16) в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -P_{\text{ш}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2. \quad (17)$$

Уравнение (17) имеет два решения:

- для случая $1,4P_{\text{ш}} > k_1 v_0^2$

$$\ddot{x} - A_3 \dot{x}^2 = -B_3, \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{1,4P_{\text{ш}} - k_1 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_3 = \frac{P_{\text{ш}} + k_2}{(1 + \lambda'_{11})D}$$

- для случая $1,4P_{\text{ш}} < k_1 v_0^2$

$$\ddot{x} + A_4 \dot{x}^2 = -B_4, \quad (19)$$

$$A_4 = \frac{k_1 v_0^2 - 1,4P_{\text{ш}}}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_4 = B_3 = \frac{P_{\text{ш}} + k_2}{(1 + \lambda'_{11})D}$$

При торможении ледокола за счет того, что сопротивление превышает тягу винтов, уравнение поступательного движения имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_r - R. \quad (20)$$

С учетом (6), (9) перепишем (20):

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2$$

или

$$\ddot{x} + A_5 \dot{x}^2 = B_5, \quad (21)$$

$$A_5 = \frac{1,4P_{\text{ш}} + k_1 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_5 = -\frac{P_{\text{ш}} - k_2}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

В выражении для постоянной величины B_5 $P_{\text{ш}} < k_2$ и B_5 принимает положительное значение. Это соответствует торможению ледокола вплоть до полной остановки во льду толщиной больше предельной.

При торможении ледокола возможен случай, когда толщина льда окажется меньше предельной. В этом случае скорость ледокола уменьшается не до нуля, а до установившейся скорости в сплошном ледяном поле. Для этого случая $P_{\text{ш}} > k_2$. Дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\ddot{x} + A_5 \dot{x}^2 = B_6, \quad B_6 = \frac{P_{\text{ш}} - k_2}{(1 + \lambda'_{11})D}. \quad (22)$$

6. Дифференциальные уравнения движения ледокола в канале битого льда

В битом льду суда могут двигаться ускоренно, замедленно и с постоянной скоростью. Рассмотрим каждый вариант движения последовательно.

Уравнение поступательного движения при ускоренном движении имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_r - R_{\text{бл}}, \quad (23)$$

С учетом (6) и (11), уравнение (23) перепишем в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_3 \dot{x}^2 - k_4$$

или

$$\ddot{x} + A_7 \dot{x}^2 = B_7, \quad (24)$$

$$A_7 = \frac{1,4P_{\text{ш}} + k_3 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_7 = \frac{P_{\text{ш}} - k_4}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

Рассмотрим вариант движения - торможение ледокола до полной остановки.

Торможение происходит за счет того, что сопротивление превышает тягу винтов, или тяга винтов равна нулю (холостой ход), или направлена в сторону, противоположную движению ледокола ($P_{\text{ш}}$).

Уравнение поступательного движения на холостом ходу имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -R_{\text{бл}}, \quad (25)$$

С учетом (11) перепишем дифференциальное уравнение (13) в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -k_3 \dot{x}^2 - k_4$$

или

$$\ddot{x} + A_8 \dot{x}^2 = -B_8, \quad (26)$$

$$A_8 = \frac{k_3}{(1 + \lambda'_{11})D}; B_8 = \frac{k_4}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

Торможение ледокола может осуществляться при работе гребных винтов на задний ход. Тогда уравнение движения ледокола на переднем ходу имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -P_{\Gamma} - R_{\text{бл}}. \quad (27)$$

или

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -P_{\text{ш}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_3 \dot{x}^2 - k_4. \quad (28)$$

Уравнение (28) имеет два решения по аналогии с (17):

- для случая $1,4P_{\text{ш}} > k_3 v_0^2$

$$\ddot{x} - A_9 \dot{x}^2 = -B_9, \quad (29)$$

$$A_9 = \frac{1,4P_{\text{ш}} - k_3 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_9 = \frac{P_{\text{ш}} + k_4}{(1 + \lambda'_{11})D}$$

- для случая $1,4P_{\text{ш}} < k_3 v_0^2$

$$\ddot{x} + A_{10} \dot{x}^2 = -B_{10}, \quad (30)$$

$$A_{10} = \frac{k_3 v_0^2 - 1,4P_{\text{ш}}}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_{10} = \frac{P_{\text{ш}} + k_4}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

При торможении ледокола за счет того, что сопротивление превышает тягу винтов, уравнение поступательного движения имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\Gamma} - R_{\text{бл}}. \quad (31)$$

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_3 \dot{x}^2 - k_4$$

или

$$\ddot{x} + A_{11} \dot{x}^2 = B_{11}, \quad (32)$$

$$A_{11} = \frac{1,4P_{\text{ш}} + k_3 v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; B_{11} = -\frac{P_{\text{ш}} - k_4}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

В выражении для постоянной величины B_{11} $P_{\text{ш}} < k_4$ и она принимает положительное значение.

Это соответствует торможению ледокола вплоть до полной остановки в битом сплоченном и наложенном льду.

7. Практическое применение

Важной характеристикой, определяющей ледокольные качества судна при работе в любых ледовых условиях, является не только путь, пройденный ледоколом, но и время, средняя скорость продвижения судна.

Определение этих параметров представляет практический интерес для решения задач ходкости при работе ледокола в различных ледовых условиях. Для этого представленные уравнения динамики решены и получены их аналитические решения для прямолинейного движения ледокола в различных ситуациях, ориентируясь на те варианты, которые возможны при движении в условиях сложной ледовой обстановки: работа набегами или движение в торосах. Полученные аналитические решения дифференциальных уравнений движения ледокола позволяют более эффективно решать задачи проектирования судов.

Понимание динамики движения ледоколов позволяет: оптимизировать форму корпуса судов; оптимизировать маршруты следования, учитывая состояние льда и погодные условия; повысить безопасность плавания в сложных ледовых условиях.

Заключение

Математические модели позволяют теоретически описать движение ледокола в различных ледовых условиях: в битом или сплошном льду, непрерывным ходом или набегами, в ровных льдах или в торосистых. Они служат основой для теоретических и полужемпирических моделей с привлечением данных натурных и модельных экспериментов, а также позволяют прогнозировать ходкость ледокола при движении в любой ледовой обстановке, в том числе сложной.

Таким образом, изучение динамики движения ледоколов является необходимым условием для успешного освоения Арктики и Антарктики, способствуя эффективности и безопасности навигации в экстремальных климатических зонах, выбору правильной тактики движения в сложных условиях маневрирования.

Литература

1. Ионов Б.П. Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб.: Судостроение, 2013. 504 с.
2. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021. 308 с.
3. Бокатова Е.А., Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Бабич Е.М., Крупина Н.А. Ледовые натурные испытания атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь». Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 3 (405). С. 71...80.
4. Ионов Б.П., Дубов А.А., Леднев В.А. Экспериментальные исследования ходкости ледоколов при работе набегами. Проектирование средств продления навигации: Межуз. сб., Горьков. политехн. ин-т. Горький, 1986. с.23...39.
5. Махин В.П., Страшко А.Н. Математическое моделирование движения судов во льдах. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова. 2015, выпуск 2. С. 1...11.
6. Таровик О.В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития. Арктика: экология и экономика, т. 11, № 3, 2021. С. 422...435.

7. Апполонов Е.М., Беяшов В.А., Сазонов К.Е., Скрыбин Д.С., Игошин Е.В. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море. Судостроение, 2011, № 4. С. 9...12.
8. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Математическая модель движения судов в сложной ледовой обстановке. Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Издательство «ЛЕМА», 2023. С. 462...466.
9. Благовещенский С. Н., Холодильник А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Том 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение, 1976. 176 с.
10. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Теоретическая модель сопротивления разрушения льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле. Экологические системы и приборы, № 10, 2022 г. С.25...35.
11. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Теоретическая модель сопротивления обломков льда при движении ледокола в ровном сплошном ледяном поле. Экологические системы и приборы, № 10, 2022 г. С.59...66.
12. Калинина Н.В., Грамузов Е.М., Куркин А.А. Теоретическая модель сопротивления при движении ледокола в канале битого льда. Инженерная физика, № 2, 2023. с.3...9.
13. Девнин С.И. Аэродинамический расчет плохобтекаемых судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1967. 223с.

References

1. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
2. Sazonov K.E. Model'nyy i naturnyy eksperimenty v morskoy ledotekhnike [Model and full-scale experiments in marine ice engineering]. Sankt-Peterburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2021. 308 s.
3. Bokanova E.A., Dobrodeev A.A., Sazonov K.E., Babich E.M., Krupina N.A. Ledovye naturnye ispytaniya atomnykh ledokolov «Arktika» i «Sibir» [Full-scale ice tests of the nuclear icebreakers Arctic and Siberia]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2023. № 3 (405). S. 71...80.
4. Ionov B.P., Dubov A.A., Lednev V.A. Jeksperimental'nye issledovaniya hodnosti ledokolov pri rabote nabegami [Experimental studies of icebreaker seaworthiness by ramming]. Proektirovanie sredstv prodleniya navigacii: Mezhdvuz. sb., Gor'kov. politehn. in-t. Gor'kij, 1986. s.23...39.
5. Mahin V.P., Strashko A.N. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya sudov vo l'dah [Mathematical modeling of ship movement in ice]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarov. 2015, vypusk 2. S. 1...11.
6. Tarovik O.V. Modeli dlja prognozirovaniya parametrov rejsov sudov v Arktike: sushhestvujushhie podhody i vozmozhnye puti razvitiya [Models for forecasting the parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible ways of development]. Arktika: jekologija i jekonomika, t. 11, № 3, 2021. S. 422...435.
7. Appolonov E.M., Beljashov V.A., Sazonov K.E., Skryabin D.S., Igoshin E.V. Issledovanie ledovoj hodnosti ledokola «Sankt-Peterburg» v Karskom more [Investigation of the ice strength of the icebreaker "Saint Petersburg" in the Kara Sea]. Sudostroenie, 2011, № 4. S. 9...12.
8. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Matematicheskaja model' dvizheniya sudov v slozhnoj ledovoj obstanovke [Mathematical model of vessel movement in difficult ice conditions]. Trudy Vserossijskoj konferencii «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki». SPb.: Izdatel'stvo «LEMA», 2023. S. 462...466.
9. Blagoveshhenskij S. N., Holodilnik A.N. Spravochnik po statike i dinamike korablja [Handbook of Ship Statics and Dynamics]: Monografiya V dvuh tomah. Tom 2. Dinamika (kachka) korablja. L.: Sudostroenie, 1976. 176 s.
10. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Teoreticheskaja model' soprotivleniya razrushenija l'da pri dvizhenii ledokola v rovnom sploshnom ledjanom pole [Theoretical model of ice breaking resistance during icebreaker movement in a flat continuous ice field]. Jekologicheskie sistemy i pribory, № 10, 2022 g. S.25...35.
11. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Teoreticheskaja model' soprotivleniya oblomkov l'da pri dvizhenii ledokola v rovnom sploshnom ledjanom pole [Theoretical model of ice fragment resistance when an icebreaker moves in a flat continuous ice field]. Jekologicheskie sistemy i pribory, № 10, 2022 g. S.59...66.
12. Kalinina N.V., Gramuzov E.M., Kurkin A.A. Teoreticheskaja model' soprotivleniya pri dvizhenii ledokola v kanale bitogo l'da [Theoretical model of resistance when moving an icebreaker in a broken ice channel]. Inzhenernaja fizika, № 2, 2023. s.3...9.
13. Devnin S.I. Aerodinamicheskij raschet plohoobtekaemykh sudovykh konstrukcij [Aerodynamic calculation of poorly streamlined ship structures]: Monografiya, L.: Sudostroenie, 1967. 223s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калинина Надежда Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

Nadezhda V. Kalinina, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 22.10.2025.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.073>

Исследование динамики движения ледокола в торосистых льдах

Калинина Н.В.¹ nvk5133@mail.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. При прокладке канала в условиях продленной навигации ледоколы часто встречаются с нестационарными условиями движения. Таким является движение на торосистых участках акватории. Торосы представляют собой значительные препятствия, затрудняющие движение судна. Если методики оценки ходкости в ровных сплошных льдах при установившемся движении существуют, то прогнозирование ходкости ледоколов во льдах, отличающихся торосистостью, является актуальным на сегодняшний день. Для сохранения Россией лидирующих позиций в освоении арктической зоны необходимо проектирование новых ледоколов и прогнозирование ледовой ходкости на начальных этапах проектирования, в том числе в тяжелых ледовых условиях через гряды торосов, когда движение является неустановившемся. Описано движение ледокола в тяжелых ледовых условиях в торосистых льдах: непрерывным ходом и набегами, когда толщина льда больше преодолеваемой непрерывным ходом. Приведены дифференциальные уравнения движения и получены аналитические решения этих уравнений. Аналитические решения дифференциальных уравнений используются для нахождения средней скорости движения в торосистых льдах и позволяют прогнозировать время прибытия в пункт назначения. Знание времени прибытия позволяет капитану заранее планировать маневры, выбирать оптимальные маршруты, что помогает лучше организовать работу судовых служб и повысить эффективность эксплуатации ледоколов в сложных условиях Арктики.

Ключевые слова: ледокол, тяжелые ледовые условия, торосы, дифференциальные уравнения движения, работа набегами, параметры движения.

Для цитирования: Калинина Н.В. Исследование динамики движения ледокола в торосистых льдах, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 39—46. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.073

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.073>

Investigation of the dynamics of icebreaker movement in hummocky ice

Nadezhda V. Kalinina¹ nvk5133@mail.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. Icebreakers often encounter unstable traffic conditions when laying a channel in conditions of extended navigation. This is the movement in hummocky areas of the water area. Hummocks are significant obstacles that impede the movement of the vessel. Methods for assessing propulsion in solid ice with steady movement exist, and forecasting the seaworthiness of icebreakers in hummocky ice has been little studied, but is relevant today. In order for Russia to maintain its leading position in the development of the Arctic zone, it is necessary to design new icebreakers and predict ice propulsion at the initial stages of design, including in severe ice conditions through hummock ridges when movement is unsteady. The movement of an icebreaker in severe ice conditions in hummocky ice is described: continuous movement and by ramming, when the thickness of the ice is greater than that overcome by continuous movement. Differential equations of motion are given and analytical solutions of these equations are obtained. Analytical solutions of differential equations are used to find the average speed of movement in hummocky ice and make it possible to predict the time of arrival at the destination. Knowing the time of arrival allows the captain to plan maneuvers in advance, choose optimal routes, which helps to better organize the work of ship services and increase the efficiency of icebreakers in difficult Arctic conditions.

Keywords: icebreaker, heavy ice conditions, hummocks, differential equations of motion, work by ramming, motion parameters.

For citation: Nadezhda V. Kalinina Investigation of the dynamics of icebreaker movement in hummocky ice, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 39—46. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.073

Введение

Северный морской путь (СМП), пролегающий вдоль арктического побережья России, представляет собой важнейшую транспортную артерию, соединяющую Европу и Азию. Эффективность и безопасность его эксплуатации во многом зависят от способности ледоколов успешно справляться с различными ледовыми условиями [1]. При прокладке канала в условиях продленной навигации ледоколы часто встречаются с нестационарными условиями

движения. Таким может быть движение на торосистых участках акватории, которое является неустановившимся и осуществляется непрерывным ходом или набегами [2, 3]. Если методики оценки ходкости в ровных сплошных льдах при установившемся движении существуют [4, 5], то прогнозирование ходкости ледоколов во льдах, отличающихся торосистостью, является актуальной на сегодняшний день.

Для сохранения Россией лидирующих позиций в освоении арктической зоны и развитии морских

путей, обеспечивающих доступ к ресурсам региона и повышение экономической выгоды от международной торговли необходимо проектирование новых ледоколов и прогнозирование ледовой ходкости на начальных этапах проектирования, в том числе в тяжелых ледовых условиях через гряды торосов, когда движение является неустановившимся.

1. Непрерывное движение ледокола в торосах

Движение ледокола в торосистых льдах не является установившимся. Оно состоит из отдельных этапов: торможения при встрече с грядой торосов либо до полной остановки, либо до минимальной скорости; разгона при встрече с ровным сплошным льдом и достижения скорости установившегося движения. Эта работа повторяется циклически и в идеализированных ледовых условиях при непрерывном движении без заклинивания и остановок может быть описана следующим образом.

Ледокол движется в сплошном ледяном покрове постоянной толщины h , покрытом снегом толщиной h_c , непрерывным ходом курсом перпендикулярным к грядам торосов приведенной толщины h_T и шириной b_T . При этом ледокол попеременно преодолевает меньшее сопротивление ровного сплошного льда и большее сопротивление при прохождении торосов. Расстояние между грядами торосов b .

Очевидно, что при безостановочном движении скорость ледокола будет колебаться, возрастая в ровном льду и уменьшаясь в торосе. Поэтому среднюю скорость движения ледокола – скорость прокладки трассы, как основной показатель ходкости, за один цикл можно рассчитать по формуле

$$v = \frac{b+b_T}{t+t_T}, \quad (1)$$

где t и t_T – время движения в ровном льду и торосе за один цикл.

2. Приведенная толщина торосистого участка

Торос имеет сложную геометрию [6, 7], которую трудно заложить в расчётные методики ледовой ходкости (рис. 1). Поэтому в расчетных методиках используются приведённые характеристики торосистых участков: приведённая толщина h_T ; ширина гряды торосов b_T .

Приведённую толщину гряды торосов можно определить, как отношение общей площади поперечного сечения к ширине этой гряды:

$$h_{пр} = \frac{S_T}{b_T}, \text{ м},$$

где S_T – общая площадь тороса, м^2 ;

Общую площадь тороса можно представить в виде суммы трех ее составляющих площадей его составляющих:

$$S_T = S_n + S_k + S_{kc},$$

где S_n – площадь паруса, м^2 ; S_k – площадь киль, м^2 ; S_{kc} – площадь консолидированного слоя, м^2 .

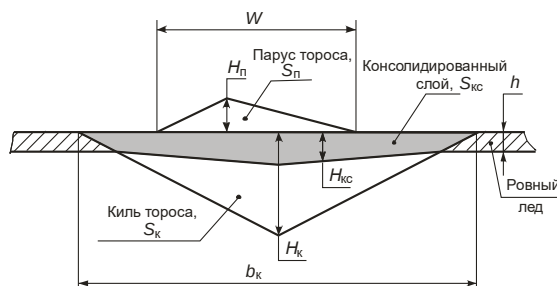


Рис. 1. Геометрия тороса

3. Динамика непрерывного движения ледокола на торосистых участках

Для определения скорости движения ледокола (1) рассмотрим решения дифференциальных уравнений. При составлении уравнений будем считать, что движение судна происходит в горизонтальной плоскости с изменяющейся линейной скоростью v . В качестве внешних сил $\sum F_x$ выступает полезная тяга движителей ледокола P_e на переднем или заднем ходу и ледовое сопротивление R_n , определяемое для различных условий движения:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = \sum F_x, \quad (2)$$

где D – массовое водоизмещение судна; λ'_{11} – коэффициент присоединенных масс воды и льда по оси x ; $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt}$ – продольное ускорение судна; x – перемещение судна вдоль оси x ; t – время движения.

Здесь и в дальнейшем будем оперировать чистым ледовым сопротивлением R и тягой на гаке P_r (называемой по аналогии с буксирами), имея в виду индексы «пх» для переднего и «зх» заднего хода.

Чистое ледовое сопротивление R определяются за вычетом сопротивления воды R_b движению ледокола:

$$R = R_n - R_b.$$

Тяга на гаке, называемая по аналогии с буксирами, определяется как разность между полезной тягой движителей P_e и сопротивлением воды R_b при данной скорости движения:

$$P_r = P_e - R_b.$$

Тяга ледокола на гаке $P_r = f(v)$ для приближенных расчетов может быть аппроксимирована выражением [5]:

$$P_r = P_{ш} \left[1 - 0,4 \left(\frac{v}{v_0} \right) - 0,6 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right],$$

где $P_{ш}$ – тяга ледокола на швартовых на заднем или переднем ходу, кН; v_0 – скорость движения на чистой воде при заданной мощности, м/с.

Предварительный анализ дифференциального уравнения (2) на предмет получения его аналитического решения позволил тягу на гаке, фигурирующую в уравнении аппроксимировать выражением

$$P_r = P_{ш} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = v$ – скорость движения.

Расхождение выражения (3) от первоначальной зависимости на скоростях в ледовых условиях составляет не более 5 %.

Тяга на гаке P_{Γ} на переднем $P_{\Gamma \text{ пх}}$ или заднем ходу $P_{\Gamma \text{ зх}}$ вычисляется в зависимости режима движения ледокола на переднем (пх) или заднем (зх) ходу.

Для определения чистого ледового сопротивления при непрерывном движении в сплошном ледяном поле воспользуемся методом, который себя хорошо зарекомендовал и включает в себя не только основные характеристики ледокола, физико-механические свойства льда и снега, скорость движения, но и форму корпуса судна [5]:

$$R = k_1 \dot{x}^2 + k_2, \quad (4)$$

$$k_1 = k_{ov} \rho_{\text{л}} h B \left[\left(1 + \frac{0,19}{(0,215 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1\text{ф}}) \rho_{\text{л}} \alpha h} \right) \times \right. \\ \left. \times (\Phi_{\text{и}} + f \Phi_{\text{ит}}) + \frac{2 \rho_{\text{л}} \Omega_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}} B h} (\Phi_{\Gamma} + f \Phi_{\Gamma\Gamma}) \right] \\ k_2 = k_p \frac{h^4}{\alpha d} \left[(1 + f \gamma_{\text{лпф}}) + k_{\text{сф}} \gamma_{\text{сф}} \frac{d \alpha^2}{h} \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \varphi_{2\text{ф}}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2\text{ф}}}} + \right. \\ \left. + 0,66(1 + f \Phi_{\text{пт}}) B \alpha + \frac{k_{\text{сб}} \Phi_{\text{с}} d \alpha^3 B}{h} \right] + \\ + k_{\text{ост}} (\rho - \rho_{\text{л}}) g h \Omega_{\text{л}} (\Phi_{\text{п}} + f \Phi_{\text{пт}}) + \\ + k_{\text{сн}} (\rho - \rho_{\text{сн}}) g h \Omega_{\text{л}} (\Phi_{\text{п}} + f \Phi_{\text{пт}}), \\ k_{\text{сф}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}; k_{\text{сб}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}; \\ k_{\text{сн}} = 0,429; \gamma_{\text{лпф}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{хф}}^2} + \frac{1}{n_{\text{зф}}^2}}; \gamma_{\text{сф}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{зф}}^2} - 1}; \\ \Phi_{\text{пт}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2}} dy; \Phi_{\text{с}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_x^2} - 1} dy; \\ \Phi_{\text{п}} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_x n_z d\Omega; \Phi_{\text{пт}} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_z \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \\ \Phi_{\Gamma} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_x^3 d\Omega; \Phi_{\Gamma\Gamma} = \frac{1}{\Omega_{\text{л}}} \int_{\Omega_{\text{л}}} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \\ \Phi_{\text{и}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x^2 dy; \Phi_{\text{ит}} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy; \\ n_x = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}}; n_z = \frac{\operatorname{tg} \varphi_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}}; \\ \alpha = \sqrt[4]{\rho g / d}; d = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)};$$

где $k_{ov}=3,71$, $k_p=2,45 \cdot 10^6$ кПа, $k_{ост}=1,77$ - эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления сплошного льда, настроенные на натурные данные по работе ледоколов набегами; B - ширина ледокола, м; f - коэффициент трения льда о корпус судна; h - толщина льда, м; $h_{\text{сн}}$ - толщина снега, м; g - ускорение свободного падения, м/с²; $Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ - число Фруда по толщине льда; v - скорость движения, м/с; $\Omega_{\text{л}}$ - площадь подводной части корпуса, облегаемая льдом, м²; n_x , n_z - направляющие косинусы внешней нормали к обшивке судна с продольной Ох и вертикальной Оз осями; φ_1 , φ_2 , φ_3 - углы наклона батокса к горизонту, ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали в некоторой точке судовой поверхности;

$\varphi_{1\text{ф}}$, $\varphi_{2\text{ф}}$, $\varphi_{3\text{ф}}$, $n_{\text{хф}}$, $n_{\text{зф}}$ - углы и направляющие косинусы на форштевне в районе действующей ватерлинии; α - параметр изгиба пластины на упругом основании; d - цилиндрическая жесткость ледяной пластины; E - модуль упругости, кПа; μ - коэффициент Пуассона льда; ρ , $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{сн}}$ - плотность воды, льда и снега, т/м³.

В выражении (4) сопротивление R вычисляется для переднего хода. Соответственно в выражения для определения k_1 и k_2 подставляются функции геометрии для переднего хода.

Запишем уравнение (2) для различных режимов движения:

- ускоренное движение на переднем ходу (тяга превышает ледовое сопротивление)

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} - R_{\text{пх}}, \quad (5)$$

а с учетом (3) и (4):

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2 \text{ пх}; \\ \ddot{x} + A_1 \dot{x}^2 = B_1, \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{1,4 P_{\text{ш пх}} + k_1 \text{ пх } v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; B_1 = \frac{P_{\text{ш пх}} - k_2 \text{ пх}}{(1 + \lambda'_{11}) D};$$

- замедленное движение (ледовое сопротивление превышает тягу) на переднем ходу до некоторой установившейся скорости

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} - R_{\text{пх}}, \quad (7)$$

с учетом (3) и (4) перепишем (7):

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2 \text{ пх}$$

или для этого случая $P_{\text{ш пх}} > k_2 \text{ пх}$:

$$\ddot{x} + A_2 \dot{x}^2 = B_3,$$

$$A_2 = \frac{1,4 P_{\text{ш}} + k_1 \text{ пх } v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; B_3 = \frac{P_{\text{ш пх}} - k_2 \text{ пх}}{(1 + \lambda'_{11}) D}. \quad (8)$$

- торможение ледокола до полной остановки за счет того, что сопротивление превышает тягу винтов на переднем ходу:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} - R_{\text{пх}}, \quad (9)$$

с учетом (3) и (4) перепишем (9):

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_1 \dot{x}^2 - k_2 \text{ пх}$$

или для этого случая $P_{\text{ш пх}} < k_2 \text{ пх}$:

$$\ddot{x} + A_2 \dot{x}^2 = B_2, \quad (10)$$

$$A_2 = \frac{1,4 P_{\text{ш пх}} + k_1 \text{ пх } v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; B_2 = -\frac{P_{\text{ш пх}} - k_2 \text{ пх}}{(1 + \lambda'_{11}) D}.$$

Решение уравнения (6) будем искать с учетом начальных условий, соответствующих началу маневра: при $t=0$ $x=0$, $\dot{x} = v_0$, где v_0 - скорость движения в момент времени равный нулю.

Для решения уравнения (6) сделаем замену переменных:

$$Q(x) = \dot{x}^2; \frac{1}{2} Q'(x) = \ddot{x}. \quad (11)$$

Выражения (11) подставляем в уравнение (6):

$$Q'(x) = 2(B_1 - A_1 Q(x))$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем:

$$Q(x) = \frac{B_1 - C_1 e^{(-2A_1 x)}}{A_1}; \quad (12)$$

$$t = \sqrt{A_1} \int \frac{dx}{\sqrt{B_1 - C_1 e^{(-2A_1 x)}}} + C_2, \quad (13)$$

где C_1, C_2 - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

Интеграл (13) для случая $B_1 > (B_1 - C_1 e^{(-2A_1 x)}) > 0$ имеет решение:

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_1 B_1}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{B_1 - C_1 e^{(-2A_1 x)}}{B_1}} + C_2. \quad (14)$$

Аналитическая зависимость $x(t)$ имеет вид:

$$x(t) = -\frac{1}{2A_1} \ln \left[\frac{B_1}{C_1} \left(1 - \operatorname{th}^2(\sqrt{A_1 B_1} (t - C_2)) \right) \right]. \quad (15)$$

Соответственно:

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_1}{A_1}} \operatorname{th}(\sqrt{A_1 B_1} (t - C_2));$$

$$\ddot{x} = \frac{B_1}{\operatorname{ch}^2(\sqrt{A_1 B_1} (t - C_2))}. \quad (16)$$

Из уравнения (12) находим C_1 , а из уравнения (14) - C_2 с учетом начальных условий и получаем

$$C_1 = B_1 - v_0^2 A_1; C_2 = -\frac{1}{\sqrt{A_1 B_1}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{v_0^2 A_1}{B_1}}. \quad (17)$$

Таким образом, ускоренное движение ледокола описывается уравнениями (14)...(17).

Уравнение (8) имеет аналогичное решение с уравнением (6). Поэтому сразу приведем его решение с учетом начальных условий, соответствующих началу маневра при $t=0, x=0, \dot{x}=v_0$, где v_0 - скорость движения в момент времени равный нулю:

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_2 B_3}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{B_3 - C_3 e^{(-2A_2 x)}}{B_3}} + C_4;$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_2} \ln \left[\frac{B_3}{C_3} \left(1 - \operatorname{cth}^2(\sqrt{A_2 B_3} (t - C_4)) \right) \right].$$

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_3}{A_2}} \operatorname{cth}(\sqrt{A_2 B_3} (t - C_4)); \quad (18)$$

$$\ddot{x} = -\frac{B_3}{\operatorname{sh}^2(\sqrt{A_2 B_3} (t - C_4))};$$

$$C_3 = B_3 - v_0^2 A_2; C_4 = -\frac{1}{\sqrt{A_2 B_3}} \operatorname{Arcth} \sqrt{\frac{v_0^2 A_2}{B_3}},$$

где C_3, C_4 - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

В уравнении (10) для постоянной величины $B_5, P_{\text{ш}} < k_2$ и она принимает положительное значение. Это соответствует торможению ледокола вплоть до полной остановки во льду толщиной больше предельной.

Решая уравнение (10) с учетом начальных условий, соответствующих началу маневра (при $t=0, x=0, \dot{x}=v_0$, где v_0 - скорость движения в момент времени равный нулю) получим решение:

$$t = -\frac{1}{\sqrt{A_2 B_2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{C_5 e^{(-2A_2 x)} - B_2}{B_2}} + C_6; \quad (19)$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_2} \ln \left[\frac{B_2}{C_5} \left(\operatorname{tg}^2((C_6 - t)\sqrt{A_2 B_2}) + 1 \right) \right];$$

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_2}{A_2}} \operatorname{tg}((C_6 - t)\sqrt{A_2 B_2}); \ddot{x} = \frac{B_2}{\cos^2((C_6 - t)\sqrt{A_2 B_2})};$$

$$C_5 = v_0^2 A_2 + B_2; C_6 = \frac{1}{\sqrt{A_2 B_2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{v_0^2 A_2}{B_2}},$$

где C_5, C_6 - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

Таким образом, замедленное движение ледокола до полной остановки описывается уравнениями (19).

В результате решения дифференциальных уравнений с учетом начальных условий могут быть получены параметры ускоренного и замедленного движения ледокола: время t , путь x , скорость $\dot{x}$ и ускорение $\ddot{x}$.

Воспользовавшись аналитическими решениями дифференциальных уравнений, можно определить параметры $t, t_r, b=x(t), b_r=x(t_r)$ и соответственно среднюю скорость движения на участках акватории с торосистыми образованиями, спрогнозировать время прибытия в пункт назначения.

4. Движение ледокола набегам при преодолении гряд торосов

Практика эксплуатации и натурные испытания судов показывают [8, 9, 10, 11, 12], что в тяжелых льдах в суровые зимы торосы достигают размеров, которые ледокол не способен преодолеть непрерывным ходом.

Если торосистые образования окажутся непреодолимыми непрерывным ходом, то ледокол будет прибегать к работе набегам.

Процесс движения судна при форсировании торосистого образования можно разделить на четыре этапа:

- первый этап – движение в ровном льду, в непосредственной окрестности торосистого образования;
- второй – взаимодействие с торосом вплоть до остановки в нем;
- третий – отход судна на дистанцию разбега;
- четвертый – разгон на переднем ходу в канале и вторичное взаимодействие с торосистым образованием.

Далее этапы со второго по четвертый повторяются до тех пор, пока судно окончательно не пройдет торосистое образование [11].

В этом случае для прогнозирования ходкости можно воспользоваться разработанной математической моделью для определения средней скорости движения набегам [13]. В зависимости от характеристик торосистой гряды (ширины b_T , приведенной толщины h_T) можно определить за сколько набегов будет преодолена гряда торосов. Параметры ходкости тогда можно определить следующим образом:

- количество циклов n для преодоления гряды шириной b_T :

$$n = \frac{b_T}{l_{\text{np}}}; \quad (20)$$

- средняя скорость движения

$$v_T = \frac{b_T}{n(t_{OT} + t_{3П} + t_P + t_{ПР} + t_{ПЗ} + t_{ОЗ})} = \frac{n l_{ПР}}{\sum t}, \quad (21)$$

где $l_{ПР}$ - путь продвижения в сплошном льду за цикл; t_{OT} - время отхода назад ледокола за цикл; $t_{3П}$ - время реверса ЭУ (энергетической установки) с заднего хода на передний; t_P - время разбега за цикл; $t_{ПР}$ - время продвижения в сплошном льду за цикл; $t_{ПЗ}$ - время реверса ЭУ с переднего хода на задний; $t_{ОЗ}$ - время освобождения от заклинивания за цикл; $\sum t$ - суммарное время, затраченное на преодоление торосистого участка за n циклов.

5. Динамика движения ледокола при преодолении торосов набегами

Для определения скорости движения ледокола набегами при преодолении торосистой гряды (21) рассмотрим дифференциальные уравнения движения и их решения.

Взаимодействие с торосом (продвижение) вплоть до остановки в нем описывается уравнением (9) или (10) с решением (19).

Отход судна на дистанцию разбега осуществляется в собственном канале битого льда за два этапа: ускоренное движение ледокола задним ходом (затрачивается время t_P) и торможения ледокола задним ходом до полной остановки (затрачивается время $t_{3П}$).

Уравнение поступательного ускоренного движения задним ходом имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{ГЗХ} - R_{6ЛЗХ}, \quad (22)$$

Для определения чистого ледового сопротивления битого льда воспользуемся разработанным методом [12]:

$$R_{6Л} = k_3 \dot{x}^2 + k_4, \quad (23)$$

$$k_3 = k_{ид} \left(c_{и} \rho_{л} h \frac{B}{2} (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + c_{г} \rho h \frac{B}{2} (\Phi_{г'} + f \Phi_{гт'}) \right);$$

$$k_4 = k_{п} (\rho - \rho_{л}) g h b B (\Phi_{п'} + f \Phi_{пт'});$$

$$\Phi_{и} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x^2 dy; \quad \Phi_{ит} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy;$$

$$\Phi_{г'} = \frac{2}{B} \int_{L_{ВЛ}} n_x dL_{ВЛ}; \quad \Phi_{гт'} = \frac{2}{B} \int_{L_{ВЛ}} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dL_{ВЛ};$$

$$\Phi_{п} = \frac{2}{B} \int_{L_{ВЛ}} n_x n_x dL_{ВЛ}; \quad \Phi_{пт} = \frac{2}{B} \int_{L_{ВЛ}} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dL_{ВЛ};$$

$$c_{и} = 1 + \frac{0,218 b}{h} \frac{\rho}{\rho_{л}} = 1 + \frac{0,068}{h \alpha} \frac{\rho}{\rho_{л}};$$

$$c_{г} = 2; \quad b \alpha = 0,312 = \text{const.}$$

Эмпирические коэффициенты $k_{ид}$, $k_{п}$, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления битого льда были настроены на натурные данные по работе ледоколов набегами и составили $k_{ид} = 1,38$; $k_{п} = 0,70$.

В выражении (23) сопротивление $R_{6Л}$ может вычисляться как для переднего $R_{6ЛПХ}$, так и для заднего $R_{6ЛЗХ}$ хода в зависимости режима движения ледокола. Соответственно в выражения для определения $k_{3ПХ}$ и $k_{4ПХ}$ или $k_{3ЗХ}$ $k_{4ЗХ}$ подставляются

функции геометрии $\Phi_{и}$, $\Phi_{ит}$, $\Phi_{г'}$, $\Phi_{гт'}$, $\Phi_{п'}$, $\Phi_{пт'}$ для переднего хода или заднего хода.

С учетом выражений для $P_{Г}$ (3) и $R_{6Л}$ (23) дифференциальное уравнение ускоренного движения при отходе ледокола от ненарушенного ледяного покрова:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{ШЗХ} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_{3ЗХ} \dot{x}^2 - k_{4ЗХ}$$

или

$$\ddot{x} + A_7 \dot{x}^2 = B_7, \quad (24)$$

$$A_7 = \frac{1,4 P_{ШЗХ} + k_{3ЗХ} v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; \quad B_7 = \frac{P_{ШЗХ} - k_{4ЗХ}}{(1 + \lambda'_{11}) D}.$$

Решение уравнения (24) по аналогии (6) с учетом начальных условий, соответствующих началу маневра: при $t=0$ $x=0$, $\dot{x} = v_0$, где v_0 - скорость движения в момент времени равный нулю:

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_7 B_7}} \text{Arth} \sqrt{\frac{B_7 - C_7 e^{(-2A_7 x)}}{B_7}} + C_8; \quad (25)$$

$$x(t) = - \frac{1}{2A_7} \ln \left[\frac{B_7}{C_7} \left(1 - \text{th}^2(\sqrt{A_7 B_7} (t - C_8)) \right) \right];$$

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_7}{A_7}} \text{th}(\sqrt{A_7 B_7} (t - C_8)); \quad \ddot{x} = \frac{B_7}{\text{ch}^2(\sqrt{A_7 B_7} (t - C_8))};$$

$$C_7 = B_7 - v_0^2 A_7; \quad C_8 = - \frac{1}{\sqrt{A_7 B_7}} \text{Arth} \sqrt{\frac{v_0^2 A_7}{B_7}},$$

где C_7 , C_8 - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

Таким образом, ускоренное движение ледокола задним ходом описывается уравнениями (25).

Рассмотрим второй этап - торможение ледокола задним ходом до полной остановки.

Торможение происходит за счет того, что тяга винтов ледокола направлена в сторону, противоположную движению ледокола, то есть при работе гребных винтов на передний ход. Тогда уравнение движения ледокола на заднем ходу имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -P_{ГПХ} - R_{6ЛЗХ}. \quad (26)$$

С учетом (3), (23) перепишем дифференциальное уравнение (26) в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = -P_{ШПХ} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_{3ПХ} \dot{x}^2 - k_{4ПХ}. \quad (27)$$

Уравнение (27) имеет два решения:

- для случая $1,4 P_{ШПХ} > k_{3ПХ} v_0^2$

$$\ddot{x} - A_9 \dot{x}^2 = -B_9; \quad (28)$$

$$A_9 = \frac{1,4 P_{ШПХ} - k_{3ПХ} v_0^2}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; \quad B_9 = \frac{P_{ШПХ} + k_{4ПХ}}{(1 + \lambda'_{11}) D},$$

- для случая $1,4 P_{ШПХ} < k_{3ПХ} v_0^2$

$$\ddot{x} + A_{10} \dot{x}^2 = -B_{10}; \quad (29)$$

$$A_{10} = \frac{k_{3ПХ} v_0^2 - 1,4 P_{ШПХ}}{(1 + \lambda'_{11}) D v_0^2}; \quad B_{10} = \frac{P_{ШПХ} + k_{4ПХ}}{(1 + \lambda'_{11}) D}.$$

Решение уравнений (28) и (29) приведем с учетом начальных условий, соответствующих началу маневра: при $t=0$ $x=0$, $\dot{x} = v_0$.

Решение уравнения (28):

$$t = -\frac{1}{\sqrt{A_9 B_9}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{C_9 e^{(2A_9 x)} + B_9}{B_9}} + C_{10};$$

$$x(t) = \frac{1}{2A_9} \ln \left[\frac{B_9}{C_9} \left(\operatorname{th}^2((C_{10} - t)\sqrt{A_9 B_9}) - 1 \right) \right];$$

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_9}{A_9}} \operatorname{th}((C_{10} - t)\sqrt{A_9 B_9}); \quad (30)$$

$$\ddot{x} = -\frac{B_9}{\operatorname{ch}^2((C_{10} - t)\sqrt{A_9 B_9})};$$

$$C_9 = v_0^2 A_9 - B_9; \quad C_{10} = \frac{1}{\sqrt{A_9 B_9}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{v_0^2 A_9}{B_9}},$$

где C_9 , C_{10} - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

Решение уравнения (29):

$$t = -\frac{1}{\sqrt{A_{10} B_{10}}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{C_{11} e^{(-2A_{10} x)} + B_{10}}{B_{10}}} + C_{12};$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_{10}} \ln \left[\frac{B_{10}}{C_{11}} \left(\operatorname{tg}^2((C_{12} - t)\sqrt{A_{10} B_{10}}) + 1 \right) \right];$$

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_{10}}{A_{10}}} \operatorname{tg}((C_{12} - t)\sqrt{A_{10} B_{10}}); \quad (31)$$

$$\ddot{x} = -\frac{B_{10}}{\cos^2((C_{12} - t)\sqrt{A_{10} B_{10}})};$$

$$C_{11} = v_0^2 A_{10} + B_{10}; \quad C_{12} = \frac{1}{\sqrt{A_{10} B_{10}}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{v_0^2 A_{10}}{B_{10}}},$$

где C_{11} , C_{12} - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

Таким образом, замедленное движение ледокола задним ходом при работе гребных винтов на обратный (передний) ход описывается уравнениями (30) или (31) в зависимости от соотношения величин $1,4P_{\text{ш пх}}$ и $k_3 v_0^2$.

После полной остановки ледокол начинает разбег в собственном канале. При этом происходит ускоренное движение за счет превышения тяги ледокола над ледовым сопротивлением при соответствующих скоростях. На этом этапе скорость

ледокола возрастает от нуля до некоторого значения v_p , с которой ледокол входит в контакт с ненарушенным ледяным покровом.

Уравнение поступательного движения при ускоренном движении имеет вид:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{г пх}} - R_{\text{бл пх}}.$$

С учетом (3) и (23) перепишем в развернутом виде:

$$D(1 + \lambda'_{11})\ddot{x} = P_{\text{ш пх}} \left[1 - 1,4 \left(\frac{\dot{x}}{v_0} \right)^2 \right] - k_3 \text{ пх} \dot{x}^2 - k_4 \text{ пх}$$

или

$$\ddot{x} + A_6 \dot{x}^2 = B_6, \quad (32)$$

$$A_6 = \frac{1,4P_{\text{ш пх}} + k_3 \text{ пх} v_0^2}{(1 + \lambda'_{11})D v_0^2}; \quad B_6 = \frac{P_{\text{ш пх}} - k_4 \text{ пх}}{(1 + \lambda'_{11})D}.$$

Решение уравнения (32) с учетом начальных условий, соответствующих началу маневра: при $t=0$ $x=0$, $\dot{x} = v_0$, где v_0 - скорость движения в момент времени равный нулю для случая $B_6 > (B_6 - C_{13} e^{(-2A_6 x)}) > 0$ имеет аналогичное решение с уравнением (24):

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_6 B_6}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{B_6 - C_{13} e^{(-2A_6 x)}}{B_6}} + C_{14};$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_6} \ln \left[\frac{B_6}{C_{13}} \left(1 - \operatorname{th}^2(\sqrt{A_6 B_6} (t - C_{14})) \right) \right];$$

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{B_6}{A_6}} \operatorname{th}(\sqrt{A_6 B_6} (t - C_{14}));$$

$$\ddot{x} = \frac{B_6}{\operatorname{ch}^2(\sqrt{A_6 B_6} (t - C_{14}))}; \quad (33)$$

$$C_{13} = B_6 - v_0^2 A_6; \quad C_{14} = -\frac{1}{\sqrt{A_6 B_6}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{v_0^2 A_6}{B_6}},$$

где C_{13} , C_{14} - постоянные, определяемые с учетом начальных условий.

Зная параметры торосистого участка с его приведенной толщиной и воспользовавшись решениями дифференциальных уравнений (19), (25), (30), (31), (33) определяем число циклов n для преодоления гряды (20) и среднюю скорость продвижения в гряде торосов v_t (21).

Таблица 1

Параметры движения ледокола в торосистых льдах

Характеристики торосов					
Длина гряды тороса, м	24	45	24	71	61
Ширина паруса W, м	7	8	7	21	19
Высота паруса Нп, м	1,5	1,5	2	2,6	3,2
Глубина киля Нк, м	6	6	8,5	9,7	11,5
Ширина киля bk, м	21	31	21	52	50
Толщина консолидированного слоя Нкс, м	0,98	0,98	1,77	2,06	2,52
Общая площадь тороса St, м2	56,6	81,7	82,5	241,3	275,8
Приведенная толщина тороса ht, м	2,7	2,6	3,9	4,6	5,5
Параметры движения ледокола проекта 21900					
Продвижение за цикл, м	17,4	18,2	9,1	5,9	2,6
Количество циклов n, шт.	2	2	3	9	20
Общее время на операции, мин.	5	5	9	32	66
Средняя скорость преодоления гряды vt, м/с	0,115	0,123	0,050	0,028	0,013

6. Прогнозирование ходкости ледокола при движении в торосистых льдах

Математическая модель расчета средней скорости движения набегам в торосистых льдах (20), (21) апробирована на примере ледокола проекта 21900 типа Москва с ледопродоимостью 1,4 метра.

Ледовые условия соответствовали условиям в юго-западной части Карского моря, в частности в Байдарацкой губе. Торосы достигали следующих размеров. Средняя высота их парусов составляла более 3 м, а средняя глубина килей превышала 11м при средней толщине торосов равной 13,3 м. Максимальная высота паруса составляла 4,5 м,

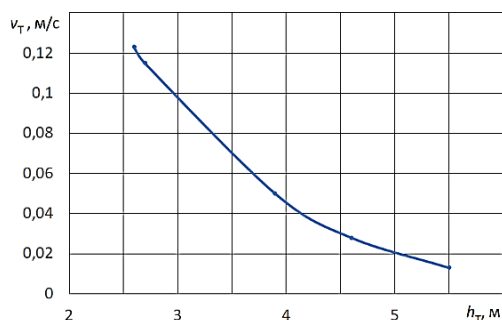


Рис. 2. Зависимость средней скорости преодоления торосистого участка

Заключение

Расчеты показывают, что в зависимости от размеров гряд торосов ледокол будет их преодолевать за несколько циклов, начиная с двух. При этом средняя скорость движения в торосах зависит от количества циклов. Данные натурных испытаний ледоколов проекта 21900М «Владивосток» и «Мурманск» [10], проведенные сотрудниками Крыловского государственного научного центра, подтверждают правильность расчетов.

максимальная глубина килей превышала 15 м, а максимальная толщина тороса была около 20 м [6].

Характеристики некоторых гряд торосов, принятые в расчетах, с учётом вычисления приведённых характеристик, приведены в табл. 1.

Так как приведённая толщина встречающихся гряд торосов больше предельной толщины льда, преодолеваемой непрерывным ходом, то, очевидно, что ледокол будет преодолевать их набегам. С учётом тактики движения набегам, рассчитано количество циклов n , необходимых для преодоления гряд торосов в зависимости от их геометрии и размеров (табл. 1). Полученные характеристики приведены на рис. 2 и 3.

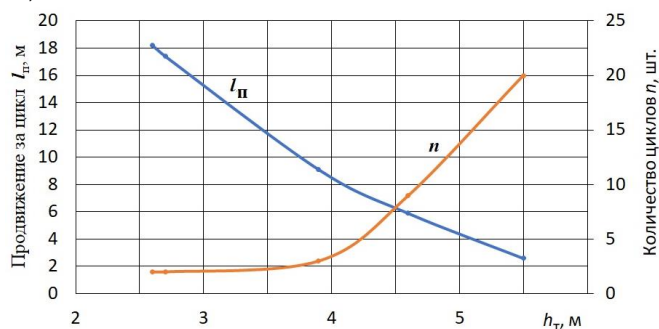


Рис. 3. Зависимость длины продвижения за цикл и количества циклов при преодолении торосистого участка от его приведенной толщины

Торосы представляют собой значительные препятствия, затрудняющие движение судна. Аналитические решения дифференциальных уравнений движения используются для нахождения средней скорости движения в тяжелых ледовых условиях и позволяют прогнозировать время прибытия в пункт назначения. Знание времени прибытия позволяет капитану заранее планировать маневры, выбирать оптимальные маршруты, что помогает лучше организовать работу судовых служб и повысить эффективность эксплуатации ледоколов в сложных условиях Арктики.

Литература

1. Сазонов К.Е. Влияние ледовых условий на безопасность судоходства в Арктике. Судостроение. 2012. № 6 (805). С. 19...21.
2. Сазонов К.Е. Оценка предельной толщины льда, преодолеваемой ледоколом при работе набегам. Судостроение. 2017. № 4 (833). С. 9...10.
3. Сазонов К.Е. Расчет максимального усилия, действующего на судно при взаимодействии с торосами. Судостроение, №5, 2013. С. 30...32.
4. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2021. 308 с.
5. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2013. 504 с.
6. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии тороса в юго-западной части Карского моря. Проблемы Арктики и Антарктики. СПб.: ААНИИ. № 3 (89), 2011. С. 49...61.
7. Харитонов В.В. Торосы пролива Шокальского (архипелаг Северная Земля). Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 3. С. 52...60.
8. Калинина Н.В., Грамузов Е.М., Солдаткин О.Б. Сопротивление транспортных судов при движении в битых льдах. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 2-1(68). С. 43...51.
9. Апполонов Е.М., Беляшов В.А., Сазонов К.Е., Скрыбин Д.С., Игошин Е.В. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море. Судостроение, 2011, № 4. С. 9...12.
10. Ионов Б.П., Дубов А.А., Леднев В.А. Экспериментальные исследования ходкости ледоколов при работе набегам. Проектирование средств продления навигации: Межвуз. сб.: Горьков. политехн. ин-т. Горький, 1986. с.23...39.

11. Костылев А.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я., Егизаров Д.Н., Штрамбрант В.И. Ледовые натурные испытания ледокола «Владивосток». Судостроение, 2016, № 6. С. 9...12.
12. Лопашев К.А., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Ледовые натурные испытания ледокола «Новороссийск» в Карском море. Труды Крыловского государственного научного центра, 2017, № 3 (381). С. 35...42.
13. Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Куркин А.А. Математическая модель движения судов в сложной ледовой обстановке. Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Издательство «ЛЕМА», 2023. С. 462...466.

References

1. Sazonov K.E. Vliyanie ledovykh uslovij na bezopasnost' sudohodstva v Arktike [The impact of ice conditions on the safety of navigation in the Arctic]. Sudostroenie. 2012. № 6 (805). S. 19...21.
2. Sazonov K.E. Ocenka predel'noj tolshhiny l'da, preodolevaemoj ledokolom pri rabote nabegami [Assessment of the maximum ice thickness overcome by an icebreaker during ramming operations]. Sudostroenie. 2017. № 4 (833). S. 9...10.
3. Sazonov K.E. Raschet maksimal'nogo usilija, dejstvujushhego na sudno pri vzaimodejstvii s torosami [Calculation of the maximum force acting on the vessel when interacting with hummocks]. Sudostroenie, №5, 2013. S. 30...32.
4. Sazonov K.E. Model'nyy i naturnyy eksperimenty v morskoy ledotekhnike [Model and full-scale experiments in marine ice engineering]. Sankt-Peterburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2021. 308 s.
5. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
6. Mironov E.U., Porubaev V.S. Statisticheskaya model' morfometrii torosa v jugo-zapadnoj chasti Karskogo morja [Statistical model of hummock morphometry in the southwestern part of the Kara Sea]. Problemy Arktiki i Antarktiki. SPb.: AANIL. № 3 (89), 2011. S. 49...61.
7. Haritonov V.V. Torosy proлива Shokal'skogo (arhipelag Severnaya Zemlja) [Shokalsky Strait Hummocks (Severnaya Zemlya Archipelago)]. Kriosfera Zemli. 2019. T. 23. № 3. S. 52...60.
8. Kalinina N.V., Gramuzov E.M., Soldatkin O.B. Soprotivlenie transportnykh sudov pri dvizhenii v bitykh l'dah [Resistance of transport ships when moving in broken ice]. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2025. № 2-1(68). S. 43...51.
9. Appolonov E.M., Belyashov V.A., Sazonov K.E., Skryabin D.S., Igoshin E.V. Issledovanie ledovoy khodkosti ledokola «Sankt-Peterburg» v Karskom more [Study of the ice propulsion of the icebreaker "St. Petersburg" in the Kara Sea]. Sudostroenie, 2011, № 4. S. 9-12.
10. Ionov B.P., Dubov A.A., Lednev V.A. Jeksperimental'nye issledovaniya hodkosti ledokolov pri rabote nabegami. Proektirovanie sredstv prodleniya navigacii [Experimental studies of icebreaker propulsion during ramming]: Mezhdvuz. sb.: Gor'kov. politehn. in-t. Gor'kij, 1986. s.23...39.
11. Kostylev A.I., Sazonov K.E., Timofeev O.Ya., Egizarov D.N., Shtrambrant V.I. . Ledovye naturnye ispytaniya ledokola «Vladivostok» [Ice full-scale tests of the icebreaker «Vladivostok»]. Sudostroenie, 2016, № 6. S. 9...12.
12. Lopashev K.A., Sazonov K.E., Timofeev O.Ya. Ledovye naturnye ispytaniya ledokola «Novorossiysk» v Karskom more [Ice full-scale tests of the Novorossiysk icebreaker in the Kara Sea]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2017, № 3 (381). S. 35-42.
13. Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Kurkin A.A. Matematicheskaya model' dvizheniya sudov v slozhnoj ledovoj obstanovke [Mathematical model of ship movement in difficult ice conditions]. Trudy Vserossijskoj konferencii «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki». SPb.: Izdatel'stvo «LEMA», 2023. S. 462...466.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калинина Надежда Викторовна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

Nadezhda V. Kalinina, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: nvk5133@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 22.10.2025.

Научная статья

УДК 629.122

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.074>

Прогноз ресурса пневмобаллонного ограждения шасси на воздушной подушке летательных аппаратов

Морозов В.П.¹ vpmorozovnn@mail.ru, Садовский А.А.² sadovskiy_a_a@mail.ru,

Гладышев Н.С.^{1,3} mr.gladnik@yandex.ru, Румянцев Н.Е.^{1,2} rnikita00@gmail.com

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород,

²Центральное конструкторское бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород,

³Нижегородский авиастроительный завод «Сокол», Нижний Новгород

Аннотация. Цель работы заключается в разработке методики прогнозирования ресурса пневмобаллонного ограждения шасси на воздушной подушке для различных типов летательных аппаратов. Основное внимание уделено анализу факторов износа покрышек, включая усталостные разрушения, механические повреждения и фрикционный износ, в зависимости от условий эксплуатации. Новизна исследования состоит в создании математических моделей, позволяющих количественно оценить износ оболочек пневмобаллонов на основе таких параметров, как тип поверхности, удельное давление и частота посадок.

Проведённые расчёты показали, что максимальный износ наблюдается при эксплуатации на бетонных и асфальтовых поверхностях, тогда как на водных и ледовых покрытиях он минимален. Для самолёта с шасси на воздушной подушке «Динго» годовой износ составил 1,4 мм при ресурсе около трёх лет, в то время как для экраноплана «ЭП-100» эти показатели составили 1,1 мм и пять лет соответственно. Важным выводом стало подтверждение экономической эффективности экранопланов, которые, несмотря на большую массу, демонстрируют лучшие показатели ресурса благодаря ограниченному контакту с абразивными поверхностями. Разработанные формулы позволяют не только прогнозировать износ, но и оптимизировать программу экспериментальных исследований. Полученные результаты имеют практическое значение для повышения надёжности и снижения эксплуатационных затрат амфибийных летательных аппаратов, особенно в условиях неразвитой аэродромной инфраструктуры. Исследование подтверждает перспективность использования экранопланов как экономически выгодной альтернативы традиционным самолётам в специфических условиях эксплуатации.

Ключевые слова: пневмобаллон, воздушная подушка, шасси на воздушной подушке, экраноплан, самолет, амфибийный аппарат, ресурс, износ.

Для цитирования: Морозов В.П., Садовский А.А., Гладышев Н.С., Румянцев Н.Е. Прогноз ресурса пневмобаллонного ограждения шасси на воздушной подушке летательных аппаратов, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 47—53. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.074

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.074>

Prediction of the Service Life of Pneumatic Cushion Skirt for Air Cushion Landing Systems of Aircraft

Victor P. Morozov¹ vpmorozovnn@mail.ru, Aleksey A. Sadovskiy² sadovskiy_a_a@mail.ru,

Nikita S. Gladyshev^{1,3} mr.gladnik@yandex.ru, Nikita E. Rumyantsev^{1,2} rnikita00@gmail.com

¹Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation,

²Alekseev Central Hydrofoil Design Bureau, Nizhny Novgorod, Russian Federation,

³Sokol Nizhny Novgorod Aircraft Manufacturing Plant, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The aim of this work is to develop a methodology for predicting the service life of pneumatic cushion skirts for air cushion landing systems in various types of aircraft. The primary focus is on analyzing factors affecting tire wear, including fatigue failure, mechanical damage, and frictional wear, depending on operating conditions. The novelty of the research lies in the development of mathematical models that quantitatively assess the wear of pneumatic cushion envelopes based on parameters such as surface type, specific pressure, and landing frequency.

Calculations have shown that maximum wear occurs during operation on concrete and asphalt surfaces, while minimal wear is observed on water and ice. For the «Dingo» aircraft with an air cushion landing system, annual wear was 1.4 mm with a service life of about three years, whereas for the «EP-100» ekranoplan, these figures were 1.1 mm and five years, respectively. A key finding was the confirmation of the economic efficiency of ekranoplans, which, despite their greater mass, demonstrate better service life due to limited contact with abrasive surfaces.

The developed formulas not only predict wear but also optimize the experimental research program. The obtained results have practical significance for improving the reliability and reducing operational costs of amphibious aircraft, especially in underdeveloped airfield infrastructure conditions. The study confirms the promise of ekranoplans as a cost-effective alternative to conventional aircraft in specific operational environments.

Keywords: pneumatic cushion, air cushion, air cushion landing system, ekranoplan, aircraft, amphibious vehicle, service life, wear.

For citation: Victor P. Morozov, Aleksey A. Sadovskiy Nikita S. Gladyshev, Nikita E. Rumyantsev. Prediction of the Service Life of Pneumatic Cushion Skirt for Air Cushion Landing Systems of Aircraft. Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 47—53. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.074

Введение

В статье предложена методика прогнозирования ресурса пневмобаллонного ограждения шасси на воздушной подушке, основанная на математическом моделировании износа оболочек. Разработанный подход учитывает ключевые эксплуатационные факторы: тип поверхности, удельное давление в баллоне и частоту посадок. На основе экспериментальных данных выведены расчетные зависимости, позволяющие количественно оценить интенсивность износа в различных условиях.

Практическая апробация методики проведена для двух типов летательных аппаратов - самолета "Динго" и экраноплана "ЭП-100". Установлено, что максимальный износ происходит при эксплуатации на твердых покрытиях (бетон, асфальт), тогда как на водных и ледовых поверхностях он минимален. Полученные результаты демонстрируют преимущества экранопланов по ресурсу пневмобаллонов благодаря особенностям их эксплуатации.

Предложенная методика позволяет не только прогнозировать остаточный ресурс, но и оптимизировать программы обслуживания, что особенно актуально для амфибийных летательных аппаратов, работающих в условиях неразвитой инфраструктуры.

Пневмобаллонное ограждение шасси на воздушной подушке (ШВП) используется на ряде летательных аппаратов (ЛА), например, «Демонстратор», «Динго», «Волга-2», «Поиск-02» и других [1,2,3,8,9].



а)



б)

Рис. 1. Летательные аппараты с шасси на воздушной подушке.

а) самолет с ШВП «Динго» [1], б) проект речного экраноплана с ШВП [2].

Ресурс ШВП в основном определяется ресурсом покрышек пневмобаллонов, играющих роль боковых элементов гибкого ограждения воздушной подушки (ВП). Ресурс покрышек определяется временем безопасной эксплуатации ШВП, и, в частности, критическим состоянием оболочек. Работоспособность оболочек, не зависимо от конструкции, определяется несколькими важными факторами, в том числе:

- а) усталостным разрушением оболочек;
- б) механическим повреждением;
- в) фрикционным износом подошвы.

Усталостное разрушение вызвано высокочастотными колебаниями оболочек, причины которых могут быть разные. Например, самовозбуждающиеся колебания оболочек при пульсирующем истечении воздуха из камеры ВП. Такие колебания, как правило, возникают на ровной гладкой поверхности. Другой вид колебаний - флагеллирование - колебания оболочки в полете. Третий вид колебаний - движение ЛА при разбеге на небольшом волнении типа «стиральная доска». При этих видах колебаний оболочка может разрушаться в местах перепада жесткости, например, за уступом срывника-редана или в местах крепления с металлическим каркасом. Эти виды разрушений описаны в работе [4].

Механическое разрушение - это разрыв или отрыв оболочек при наезде на препятствие, например, на кусок рваного железа, острый арматурный прут, торос, обрубок дерева.

Фрикционный износ характеризуется уносом части материала в следствие воздействия сил трения на подошву. В практике ограждений воздушной подушки ЛА баллонного типа этот вид воздействия на ресурс является основным. Схема сечения баллона, как вида ограждений, показана на рис. 2 [5].

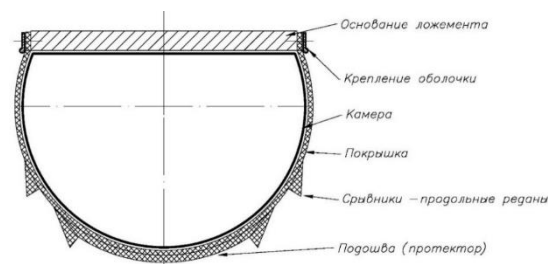


Рис. 2. Общий вид-схема сечения пневмобаллона

Очевидно, что ресурс ограждения самолётного ШВП существенно зависит от условий эксплуатации ЛА. Для регионов России ориентировочно частота взлётов-посадок (полетных циклов) с определённого вида поверхности аэродрома (гидродрома) в процентах от суммарного годового налёта показана в табл. 1 (области интенсивного и среднего износа затушеваны).

Таблица 1

Доля лётного времени в % от годового налёта амфибии «Динго»

Тип и прочность ВПП	Лето	Осень	Зима	Весна	За год в долях
Бетон/асфальт	5	5	5	5	0,05
Грунт 3 ... 5 даН/см ²	55	50	10	50	0,4125
Вода/болото	40	40	5	40	0,3125
Снег/лед	0	5	80	5	0,225

Аналогично самолету с ШВП (СШВП) частота взлётов-посадок (полетных циклов) для экранопланов (ЭП) по видам посадочной поверхности ориентировочно показана в табл. 2. При этом посадка ЭП во всех случаях происходит либо на воду, либо снег или лёд. В этих условиях можно

считать, что фрикционного износа оболочек пневмобаллонного ограждения ШВП не происходит. Износ будет наблюдаться только при маневрировании на грунтовых и бетонных площадках перед приёмом груза, пассажиров и техническом обслуживании.

Таблица 2

Примерное распределение лётного времени в % от годового налёта речного ЭП

Тип и прочность опоры	Лето	Осень	Зима	Весна	За год	За год в долях
Бетон/асфальт	2	2	2	2	2	0,02
Грунт 3... 5 даН/см ²	12	10	8	10	10	0,10
Вода	86	83	10	83	65,5	0,655
Снег/лед	0	5	80	5	22,5	0,225

Износ оболочек ограждения ВП зависит от ряда факторов:

- покрытие аэродрома (бетон, асфальт, грунт и др.)
- конструкция ШВП, материала и конструкции баллонов;
- методика посадки воздушного судна,
- эффективность реверса маршевых двигателей;
- наличие дополнительных тормозных устройств (колес, грунтовых лыж, пневмоопор и др.);
- тип воздушного судна (СШВП, ЭП с ШВП)

Большое значение имеет методика посадки ЛА с ШВП. Например, речной ЭП с ШВП камерного типа в основном эксплуатируется на воде, совершает взлёт и посадку на воду и выходит на береговые площадки для загрузки-выгрузки пассажиров и груза. Период рулёжки на береговых площадках происходит при 100% разгрузке силами ВП, и лишь при кратковременных торможениях при маневрировании нагрузка на оболочку равна давлению в пневмобаллоне.

В отличие от ЭП самолёт с ШВП типа «Динго» производит посадку на грунтовые площадки с

большим углом тангажа, чем ЭП и большой вертикальной скоростью, нормируемой АП-23 (FAR-23). Нагрузки на оболочку при этом кратковременные, максимальные и локальные, в большей степени изнашивается кормовая часть пневмобаллонов. В СШВП «Динго» в момент посадки включается реверс воздушного винта и только при достижении скорости менее 40 км/час выключается ВП. Торможение происходит фрикционным методом за счёт контакта специального усиленного участка-подошвы пневмобаллона (смотрите рис. 2). В отличие от момента касания нагрузка на оболочку длительна и более равномерна по длине пневмобаллона. Важно отметить, что СШВП «Динго» не имеет дополнительных колес или лыж для торможения. Без них ЛА с ШВП способен безопасно двигаться с большими углами скольжения.

Для ориентировочной оценки износа важно задаться конкретными параметрами лётной эксплуатации ЛА с ШВП. Исходя из средних статистических значений годового налета самолётов разного класса примем годовой налет легкого многоцелевого самолёта с ШВП - 500 л.ч., годового налёт речного 102 местного ЭП с ШВП - 1550 л.ч., в среднем, 3 выхода в неделю (см. табл. 3.).

Таблица 3

Примерный налет ЛА с ШВП

	Налет в летных часах (л.ч.)				
	Годовой налёт в летных часах	Радиус действия ЛА	Среднестатистическое время одного полета до посадки	Количество посадок за одно полетное задание (туда и обратно)	Дистанция пробега - торможения
Легкий самолёт с ШВП	500	400 км	1,0 час	2	150 м
Пассажирский речной ЭП с ШВП	1550	800 км	1,0 час	8	50 м

Примерная схема полетного маршрута ЭП на одной заправке за один день показана на рис.3. Именно такая схема с использованием частых промежуточных посадок по оценкам экспертов ЦАГИ

позволяет ЭП иметь значительное экономическое и социальное преимущество перед колесными самолётами в регионах с неразвитой аэродромной сетью.

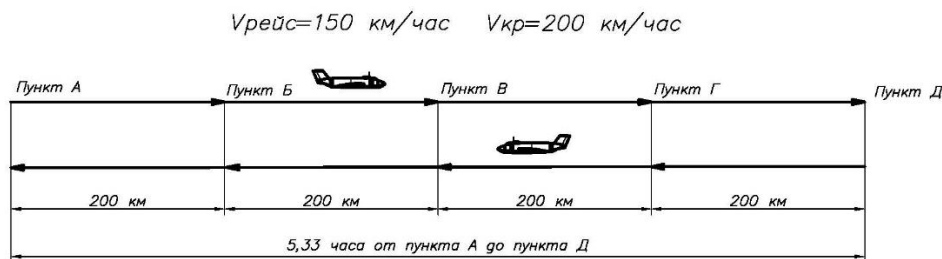


Рис. 3. Принципиальная схема движения экраноплана по маршруту

Полётное задание легкого самолёта с ШВП включает в себя полет на максимальную дальность около 400 км с максимальной полезной нагрузкой, посадку и возвращение в пункт вылета без дозаправки по маршруту. В реальных условиях эксплуатации удобно измерять и контролировать износ обочонок с помощью специальных индикаторов, подобных индикаторам автомобильных шин. Поэтому искомым параметром износа в нашей работе будет толщина снятого трением материала обочонки $\Delta h_{изн}$. Для дальнейшего исследования процессов износа введём, опираясь на работу [3, 4], ряд понятий: коэффициент интенсивности износа I_w и коэффициент линейного износа I_L . В данной статье мы сохраняем принятые в работе [3, 4] размерности.

Коэффициент интенсивности износа I_w в г/кг·км, представляет собой потерю массы материала в граммах на 1 км пути при 1 кг нагрузки в кг на обочонку:

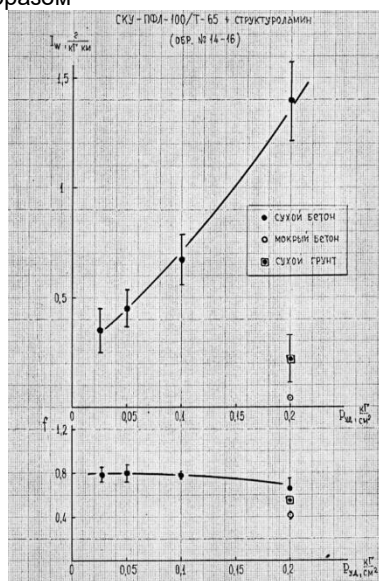
$$I_w = \frac{\Delta m_{изн}}{G L_{ск}}, \quad (1)$$

где $\Delta m_{изн}$ – уменьшение массы при испытаниях образца в граммах; G – суммарная нагрузка на образцы в кг; $L_{ск}$ – путь скольжения образца в км.

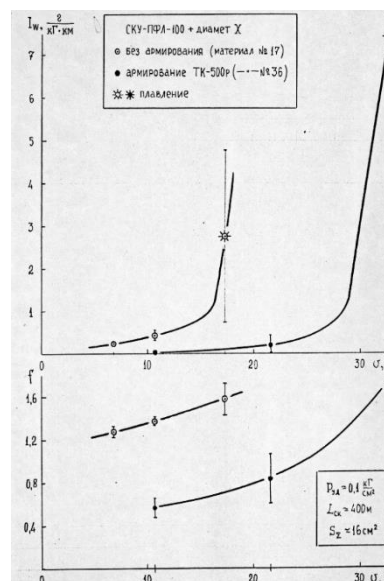
Параметр I_w связан с линейной интенсивностью износа

$$I_L = \frac{\Delta h_{изн}}{L_{ск}}, \quad (2)$$

следующим образом



а)



б)

Рис. 4. Характер интенсивности и формы износа в зависимости от удельного давления на обочонку и скорости буксировки

а) интенсивность износа от нагрузки, б) фаза плавления * от скорости движения

Покажем возможность прогнозирования износа оболочек на примерах для двух типов ЛА: - СШВП «Динго» и ЭП-100. Данные по ЭП-100 взяты из работы [6]. Примем условия:

- длина участка торможения СШВП равна половине длины пробега с учётом реверса, износ при первом касании и движении на рулѐжных дорожках не учитываем;

- длина участка торможения при маневрировании ЭП на береговых площадках примерно равна двум длинам взлётной полосы;

- удельная нагрузка на оболочку равна внутреннему давлению зарядки пневмобаллона (стояночному давлению) которое принимаем равным нагрузке на ложемент;

- износ на грунте при равных условиях нагружения в 5 раз меньше.

Таблица 4

Посадочные характеристики ЛА с ШВП

	Взлѐтная масса	Крейсерская скорость	Посадочная скорость	Стояночное давление в пневмобаллонах $p_{уд}$	Длина пробега $L_{проб}$	Длина участка торможения
СШВП «Динго»	3700 кг	275 км/час	135 км/час	4,0 кПа (0,040 кг/см ²)	300 м (0,30 км)	0,5 $L_{проб}$
ЭП-100	43500 кг	200 км/час	150 км/час	7,5 кПа (0,075 кг/см ²)	1200 м	50 м

Подставляя в формулу (4) значения пробега по бетону за год $L_{ск}^{бет} = \frac{T_{год} \bar{T}_{бет} 0,5 L_{проб}}{t_{сред}}$ и аналогично для

грунта $L_{ск}^{гр} = \frac{T_{год} \bar{T}_{гр} 0,5 L_{проб}}{t_{сред}}$ получим для СШВП суммарное для бетона и грунта значение износа в сантиметрах в следующей форме

$$h_{сшвп} = \Delta h_{бет} + \Delta h_{гр} = \frac{p_{уд} T_{год}}{\rho_m t_{сред}} 0,5 L_{проб} (J_W^{бет} \bar{T}_{бет} + J_W^{гр} \bar{T}_{гр}). \quad (5)$$

Принимая $J_W^{гр} = 0,2 J_W^{бет}$ получим

$$h_{сшвп} = \frac{p_{уд} T_{год}}{\rho_m t_{сред}} J_W^{бет} 0,5 L_{проб} (\bar{T}_{бет} + 0,2 \bar{T}_{гр}) \quad (6)$$

Подобным образом для ЭП принимая длину участка торможения 0,04 км получим годовой износ покрышки на бетоне и грунте по формуле

$$h_{эп} = \frac{p_{уд} T_{год}}{\rho_m t_{сред}} J_W^{бет} 0,05 (\bar{T}_{бет} + 0,2 \bar{T}_{гр}) \quad (7)$$

Принимая заданные условия расчёта, беря из графика рис.4 значения параметров $J_W^{бет}$ при заданном стояночном давлении в пневмобаллонах СШВП и ЭП, взяв материал протекторной подошвы - полиуретан с плотностью 1,2 г/см³ и подставляя текущие параметры из таблиц 1, 2 и 3 в формулы (6) и (7) получим

$$h_{сшвп} = 0,14 \text{ см или } 1,4 \text{ мм,}$$

$$h_{эп} = 0,106 \text{ см, или } 1,1 \text{ мм.}$$

Таким образом при заданной схеме эксплуатации полиуретановый протектор толщиной 5 мм может обеспечить более трёх лет работы комплекта оболочек для СШВП «Динго» и почти 5 лет для оболочек ЭП. Интересно, что ЭП, который в 11 раз более тяжѐлый, чем самолѐт с ШВП, с годовым налѐтом, превышающим СШВП в 3 раза имеет существенное преимущество по ресурсу оболочек. Этот факт дополнительно показывает экономические перспективы амфибийных всесезонных ЭП особенно в условиях неопределѐнности каких-либо альтернатив в решении вопросов транспортной доступности населения на обширных территориях России.

Формулы (6) и (7) позволяют не только прогнозировать ресурс оболочек, но и разрабатывать программу экспериментальных исследований износостойкости покрышек ограждения ШВП с учётом всех факторов, которые могут влиять на ресурс оболочек.

Заключение

Разработанная методика прогнозирования ресурса пневмобаллонного ограждения шасси на воздушной подушке позволяет количественно оценивать износ оболочек с учетом ключевых эксплуатационных факторов. Проведенные расчеты подтвердили значительное преимущество экранопланов по сравнению с традиционными самолетами в плане ресурса пневмобаллонов. Полученные результаты имеют важное практическое значение для повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат амфибийных летательных аппаратов, особенно при работе в условиях ограниченной инфраструктуры. Предложенный подход открывает возможности для дальнейшей оптимизации конструкций и режимов эксплуатации шасси на воздушной подушке.

Литература

1. Лёгкий самолёт нормальной категории с шасси на воздушной подушке «Динго». В.П. Морозов. Спецификация -АРИК 01.790061.179, 1995 г., 57 с.
2. Формирование новой концепции экранопланов. В.В. Коровин, Н.С. Гладышев, В.П. Морозов, И.Н. Петров, А.А. Садовский. // СибАК, Студенческий научный журнал, выпуск №6, часть 1, ISSN:2541-9412, с.67-75, 24.02.2025, 2025 г, 9 с.
3. Техническая справка о результатах работы, выполненной на этапе 6 темы 48906-ПЦ. Работа проводится по договору №32/1с-88 от 2.01.89 г. с Научно-производственным объединением Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях. В.Б. Крамер. С.А. Смирнов, А.М. Овчинников, Н.И. Седов. 1990 г., 12 с.
4. Техническая справка о результатах работы, выполненной на этапе 4 темы 48906-ПЦ. Работа проводится по договору №32/1с-88 от 2.01.89 г. с Научно-производственным объединением Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях. В.Б. Крамер. С.А. Смирнов, А.М. Овчинников, Н.И. Седов. 1990 г. 21с.
5. Кульбеда В.Е., Морозов В.П. Транспортная эффективность летательных аппаратов безаэродромного базирования. - НИИ-Природа, 2003. - 230 с.
6. Морозов В.П., Соколянский В.П., Мусатов Р.А., Долгополов А.А., Захарченко Ю.А., Мерзликин Ю.Ю., Чесноков С.В., Дунаевский А.И. (Москва). Роль воздушных амфибий в развитии транспортной системы России. Сборник докладов 1X научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон- 2012». Москва, ЦАГИ.2012. Сентябрь 7-8. 2012. Часть 1.
7. David J. Perez. The Development and Flight Testing of the XC-8A Air Cushion Landing System (ACLS)/ Report 760920 / Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting. Town & Country, San Diego. Nov.29-Dec.2. 1976. p.33
8. Основы проектирования экранопланов: учеб. пособие / В.П. Морозов, П.Л. Спехов: Нижегород. госуд. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. - Нижний Новгород, 2025.-163 с.
9. Формирование новой концепции экранопланов. В.В. Коровин, Н.С. Гладышев, В.П. Морозов, И.Н. Петров, А.А. Садовский. // СибАК, Студенческий научный журнал, выпуск №6, часть 1, ISSN:2541-9412, с.67-75, 24.02.2025, 2025 г, 9 с.
10. Техническая справка о результатах работы, выполненной на этапе 6 темы 48906-ПЦ. Работа проводится по договору №32/1с-88 от 2.01.89 г. с Научно-производственным объединением Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях. В.Б. Крамер. С.А. Смирнов, А.М. Овчинников, Н.И. Седов. 1990 г., 12 с.
11. Техническая справка о результатах работы, выполненной на этапе 4 темы 48906-ПЦ. Работа проводится по договору №32/1с-88 от 2.01.89 г. с Научно-производственным объединением Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях. В.Б. Крамер. С.А. Смирнов, А.М. Овчинников, Н.И. Седов. 1990 г. 21с.

References

1. Morozov V.P. *Light Aircraft of Normal Category with Air Cushion Landing System «Dingo»*. Specification ARIK 01.790061.179, 1995, 57 p. (in Russian)
2. Korovin V.V., Gladyshev N.S., Morozov V.P., Petrov I.N., Sadovskiy A.A. *Development of a New Concept for Ekranoplans*. SibAK, Student Scientific Journal, no. 6, part 1, ISSN:2541-9412, pp. 67-75, February 24, 2025, 9 p. (in Russian)
3. Kramer V.B., Smirnov S.A., Ovchinnikov A.M., Sedov N.I. *Technical Report on the Results of Work Performed at Stage 6 of Research Topic 48906-PTs*. Work carried out under Contract No. 32/1s-88 dated January 2, 1989 with the Central Hydrofoil Design Bureau Research and Production Association. 1990, 12 p. (in Russian)
4. Kramer V.B., Smirnov S.A., Ovchinnikov A.M., Sedov N.I. *Technical Report on the Results of Work Performed at Stage 4 of Research Topic 48906-PTs*. Work carried out under Contract No. 32/1s-88 dated January 2, 1989 with the Central Hydrofoil Design Bureau Research and Production Association. 1990, 21 p. (in Russian)
5. Kulbeda V.E., Morozov V.P. Transport efficiency of aerodrome-free aircraft. - NIA-Priroda, 2003. - 230 p. (in Russian)
6. Morozov V.P., Sokolyansky V.P., Musatov R.A., Dolgopolov A.A., Zakharchenko Yu.A., Merzlikin Yu.Y., Chesnokov S.V., Dunaevsky A.I. (Moscow). The role of amphibious aircraft in the development of the Russian transport system. Collection of reports of the 1st scientific conference on hydroaviation "Gidroaviasalon- 2012". Moscow, TsAGI.2012. September 7-8. 2012. Part 1. (in Russian)
7. David J. Perez. The Development and Flight Testing of the XC-8A Air Cushion Landing System (ACLS)/ Report 760920 / Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting. Town & Country, San Diego. Nov.29-Dec.2. 1976. p.33
8. Fundamentals of ekranoplane design: textbook. manual / V.P. Morozov, P.L. Spekhov: Nizhegorod. the state. tech. R.E. Alekseev University. - Nizhny Novgorod, 2025. -163 p.
9. Formation of a new concept of ekranoplanes. V.V. Korovin, N.S. Gladyshev, V.P. Morozov, I.N. Petrov, A.A. Sadovsky. // SibAK, Student Scientific Journal, issue No. 6, part 1, ISSN:2541-9412, pp.67-75, 02/24/2025, 2025, 9 p.
10. Technical information on the results of the work performed at stage 6 of topic 48906-PC. The work is carried out under contract No. 32/1c-88 dated January 2, 2019 with the Scientific and Production Association of the Central Design Bureau for Underwater Vessels. V.B. Kramer, S.A. Smirnov, A.M. Ovchinnikov, N.I. Sedov. 1990, 12 p.

11. Technical information on the results of the work performed at stage 4 of topic 48906-PC. The work is carried out under contract No. 32/1c-88 dated January 2, 2019 with the Scientific and Production Association of the Central Design Bureau for Underwater Vessels. V.B. Kramer, S.A. Smirnov, A.M. Ovchinnikov, N.I. Sedov. 1990, 21c.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Морозов Виктор Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24к1, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru

Victor P. Morozov, Ph.D. (Eng), Assistant Professor at the Department of «Shipbuilding and Aircraft Engineering», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minin St., 24 bldg. 1, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru

Садовский Алексей Александрович, начальник отдела аэрогидродинамики центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева, 603033, Нижний Новгород, ул. Свободны, 51, e-mail: sadovskiy_a_a@mail.ru

Aleksey A. Sadovsky, head of the aerohydrodynamics department of the central hydrofoil bureau named after R.E. Alekseev, 603033, Nizhny Novgorod, Svobody St., 51, e-mail: sadovskiy_a_a@mail.ru

Гладышев Никита Сергеевич, аспирант кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24к1, e-mail: mr.gladnik@yandex.ru

Nikita S. Gladyshev, graduate student at the Department of «Shipbuilding and Aircraft Engineering», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minin St., 24 bldg. 1, e-mail: mr.gladnik@yandex.ru

Румянцев Никита Евгеньевич, аспирант кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24к1, e-mail: rnikita00@gmail.com

Nikita E. Rumyantsev, graduate student at the Department of «Shipbuilding and Aircraft Engineering», Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minin St., 24 bldg. 1, e-mail: rnikita00@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 01.11.2025.

Научная статья

УДК 629.12.011

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.075>

Экспериментальное определение сопротивления битого льда

Ларин А.Г.¹ alexandr_ks1@mail.ru, Ларина Е.М.¹ rohmistrovaliza@mail.ru,¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Статья посвящена исследованию взаимодействия различных моделей судов с битым льдом. Для нахождения сопротивления битого льда используется методика, разработанная в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. При моделировании льда используются плитки полиэтилена высокого давления. Данные испытания можно проводить в опытовых бассейнах и не требуют искусственного или естественного холода и могут проводиться в любое время года, что делает данную методику универсальной. Представлены результаты модельного эксперимента по определению сопротивления битого льда в ледовом опытовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Приведена методика пересчета результатов испытаний на натурные суда. Получены кривые сопротивления судна в битом льду. Полученные результаты моделирования и пересчета могут быть использованы для уточнения полуэмпирических формул расчета ледового сопротивления и прогнозирования ледового сопротивления, близких по обводам и размерениям судов. Целью данной работы является обеспечение безопасной эксплуатации судов в ледовых условиях замерзающих вод.

Ключевые слова: судно, ледовые условия, битый лед, ледовое сопротивление, ледовый опытовый бассейн.

Для цитирования: Ларин А.Г., Ларина Е.М. Экспериментальное определение сопротивления битого льда, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 54—59. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.075

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.075>

Experimental determination of the resistance of broken ice

Aleksandr G. Larin¹ alexandr_ks1@mail.ru, Elizaveta M. Larina¹ rohmistrovaliza@mail.ru,¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. This article examines the interaction of various vessel models with broken ice. A technique developed at R.E. Alekseev NSTU is used to determine the ice resistance. High-density polyethylene tiles are used for ice modeling. These tests can be conducted in experimental tanks and do not require artificial or natural cold. They can be carried out at any time of year, making this technique universal. The article presents the results of a model experiment to determine the ice resistance in the ice experimental tank of R.E. Alekseev NSTU. A technique for converting the test results to full-scale vessels is presented. Vessel resistance curves in broken ice are obtained. The obtained modeling and conversion results can be used to refine semi-empirical formulas for calculating ice resistance and predicting the ice resistance of vessels with similar contours and dimensions. The purpose of this work is to ensure the safe operation of vessels in icy conditions of freezing waters

Keywords: vessel, ice conditions, broken ice, ice strength, ice test tank

For citation: Aleksandr G. Larin, Elizaveta M. Larina Experimental determination of the resistance of broken ice, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 54—59. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.075

Введение

Значительная часть акваторий в нашей стране расположены в северных широтах и замерзает в зимнее время. Для плавания в таких условиях предусмотрены суда ледового класса. Для хождения в сплошных льдах или создания канала в них для проводки судов предусмотрены ледоколы, а для плавания в битом льду суда ледового плавания. При этом, суда ледового плавания составляют подавляющее большинство.

Согласно «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2036 года и на дальнейшую перспективу до 2050 года» планируется строительство только для Северного морского пути новых 32 судов ледового плавания и 10 ледоколов к 2036г. при базовом сценарии развития, и 37 судов ледового плавания и 12 ледоколов при оптимистичном сценарии развития отрасли. Таким образом общее число судов ледового плавания к 2036г. для Северного морского пути составит 51

судно ледового класса 69 ледоколов при базовом сценарии развития, и 61 судно ледового класса 78 ледоколов при оптимистичном сценарии развития [1]. Согласно данным Российского морского регистра судоходства [2] на сегодняшний день более половины судов, находящихся под надзором Регистра, имеют ледовую категорию. Порядка 500 судов имеют категорию Arc4 и выше. Поэтому, возможность прогнозирования ледового сопротивления в битых льдах является актуальной задачей. Это необходимо для выбора мощности главной энергетической установки таких судов и для определения достижимой скорости в заданных ледовых условиях.

В данной статье приведены сведения о составляющих ледового сопротивления битого льда. Также описано экспериментальное исследование сопротивления битого льда в ледовом опытовом бассейне и приведены результаты модельных экспериментов и результаты пересчетов на натуру. Полученные данные могут быть использованы для

уточнения существующих аналитических моделей определения ледового сопротивления в битых льдах. Кроме того, полученные зависимости могут применяться для определения сопротивления в битом льду для близких по размерениям и обводам судов.

1. Методика моделирования и пересчета результатов

Исследования моделей и пересчет результатов на натуре проводятся по методике, разработанной на кафедре «Кораблестроение и авиационная техника» для ледового бассейна НГТУ.

Испытания моделей судна в битых льдах в НГТУ проводятся в плитках полиэтилена высокого давления, толщина которых должна быть меньше толщины натурного льда в геометрический масштаб λ .

Испытания проводятся в мелкобитом льду заданной сплоченности и толщины.

Условия подобия при моделировании в битом льду определяются зависимостями [5, 6, 7, 9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_H}{L_M} = \frac{B_H}{B_M} = \dots = \frac{h_H}{h_M} = \lambda, \\ \text{числа Фруда } Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} = idem, \\ \text{отношение плотностей } \frac{\rho_L}{\rho_B} = idem, \\ \text{сплоченность } S = idem, \\ \text{коэффициент трения } f = idem \end{aligned} \right\} (1)$$

где L , B , h – линейные размеры судна и льда натуре и модели.

По данным [6, 8] плотность однолетнего морского льда составляет $\rho_L = 0,86 \div 0,92 \text{ т/м}^3$, коэффициент трения льда о сталь составляет $0,08 \div 0,12$.

У полиэтилена высокого давления плотность модели льда $0,915 \text{ т/м}^3$. Коэффициент трения полиэтилена о корпус окрашенной модели составляет $0,11 \div 0,13$. Можно считать условия (1) выполненными при моделировании.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают достаточно сложным точно и определено зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку (в том числе толщину, форму и размеры льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте приближенно моделируется движение судна в некоторой условной среде с осредненными характеристиками. Условия подобия соблюдаются лишь в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщин, сплоченности, ширине канала, плотности и коэффициента трения обломков льда о корпус).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью полиэтиленовых плиток одинаковой формы и размеров $\frac{l}{h} = const$ и обеспечить повторяемость опытов.

При моделировании сопротивления битого льда принято [3, 4] из общего сопротивления битого льда $R_{\text{Л}}^M$ принято выделять чистое ледовое

сопротивление $R_{\text{ЛЛ}}^M$. Оно получается при вычитании из общего сопротивления битого льда $R_{\text{Л}}^M$ сопротивления воды R_B^M :

$$R_{\text{ЛЛ}}^M = R_{\text{Л}}^M - R_B^M \quad (2)$$

Это обусловлено тем, что эти силы моделируются исходя из разных условий. Чистое ледовое сопротивление $R_{\text{ЛЛ}}^M$ пересчитывается по закону подобия Фруда.

Чистое ледовое сопротивление можно представить в виде:

$$R_{\text{ЛЛ}}^M = R_{\text{ЛЛ}}^M + R_{\text{СК}}^M \quad (3)$$

где $R_{\text{ЛЛ}}^M$ – прямое сопротивление, не зависящее от скорости (при $v \rightarrow 0$); $R_{\text{СК}}^M$ – скоростное сопротивление, зависящее от скорости.

Прямое сопротивление льда пересчитывается по формуле:

$$R_{\text{ЛЛ}}^H = \lambda^3 \cdot \frac{\rho_{\text{с}}^H - \rho_{\text{л}}^H}{\rho_{\text{с}}^M - \rho_{\text{л}}^M} \cdot R_{\text{ЛЛ}}^M \quad (4)$$

Скоростное сопротивление в обломках льда пересчитывается так:

$$R_{\text{СК}}^H = \lambda^3 \cdot \frac{\rho_{\text{с}}^H}{\rho_{\text{с}}^M} \cdot R_{\text{СК}}^M \quad (5)$$

После составляющие складываются и находится чистое ледовое сопротивление для натуре. К данному сопротивлению добавляется сопротивление на чистой воде для натуре и находится полное ледовое сопротивление.

2. Экспериментальное исследование

Опытный бассейн предназначен для испытаний моделей в воде, в сплошном и мелкобитом льду. Общий вид бассейна показан на рис. 1. Буксировка моделей осуществляется с помощью буксировочной системы гравитационного типа. Схема буксировочной системы показана на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид бассейна при испытаниях в битом льду

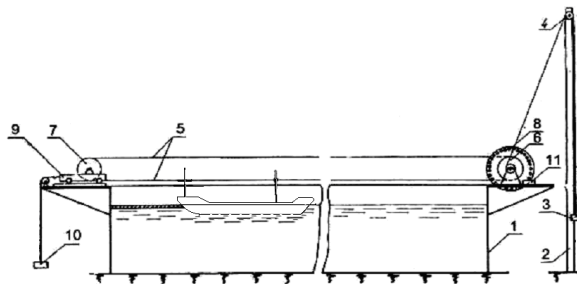


Рис. 2. Схема гравитационной буксировочной системы ледового бассейна НГТУ:

1 – бассейн, 2 – мачта, 3 – буксировочный груз, 4 – направляющий блок, 5 – бесконечный трос, 6 – ведущий шкив, 7 – ведомый шкив, 8 – диск с отверстиями, 9 – тележка устройства натяжения, 10 – груз натяжения, 11 – датчик скорости

Модель битого льда представляет плитки из полиэтилена высокого давления необходимых толщин и размеров в плане. Данные исследования были выполнены для 5 проектов судов на 6 моделях. Данные моделей судов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики моделей судов

Характеристики	Номер проекта					
	Р-47	16	1105	1191	2190	
Масштаб модели	1:30	1:35	1:50	1:50	1:75	1:100
Длина модели по КВЛ $L_{КВЛ}$, м	0,90	1,28	1,42	1,46	1,52	1,14
Ширина модели по КВЛ В, м	0,26	0,33	0,32	0,32	0,37	0,28
Высота борта модели Н, м	0,10	0,11	0,10	0,09	0,17	0,12
Осадка модели T_{max} , м	0,066	0,078	0,070	0,050	0,113	0,085
Масса модели, кг	8,0	18,1	19,8	17,4	33,9	14,3
Скорость судна на глубокой тихой воде, м/с	0,93	0,85	0,98	0,98	0,95	0,82

Модели судов показаны на рисунках 3-4.



Рис. 3. Модели ледоколов проектов 16, Р-47, 1105, 1191



Рис. 4. Модели ледокола проекта 21900 в разных масштабах

Результаты испытаний моделей показаны на рис. 5-10.

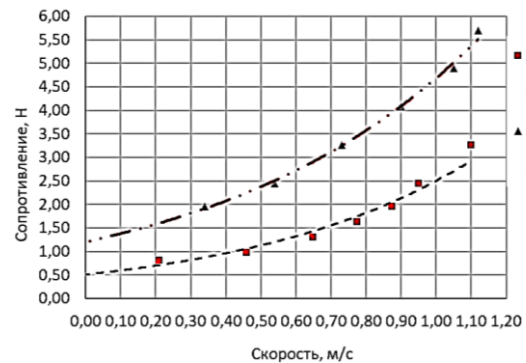


Рис. 5 Сопротивление модели судна проекта Р-47 (М1:30) в мелкобитом искусственном льду толщиной 10 и 20мм (S=10 баллов).

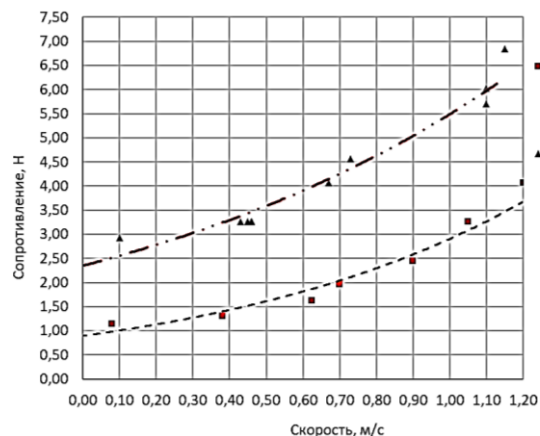


Рис. 6 Сопротивление модели судна проекта 16 (М1:35) в мелкобитом искусственном льду толщиной 10 и 20мм (S=10 баллов).

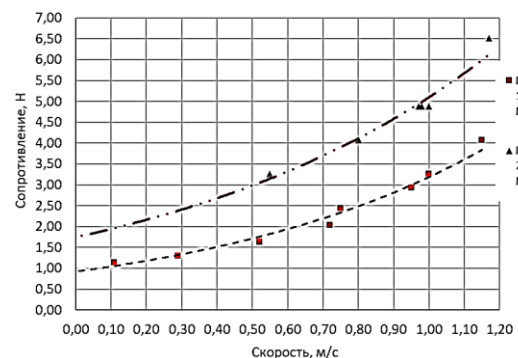


Рис. 7 Сопротивление модели судна проекта 1105 (М1:50) в мелкобитом искусственном льду толщиной 10 и 20мм (S=10 баллов).

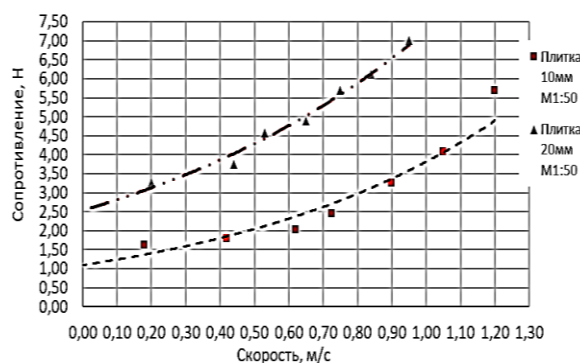


Рис. 8 Сопротивление модели судна проекта 1191 (M1:50) в мелкобитом искусственном льду толщиной 10 и 20мм (S=10 баллов).

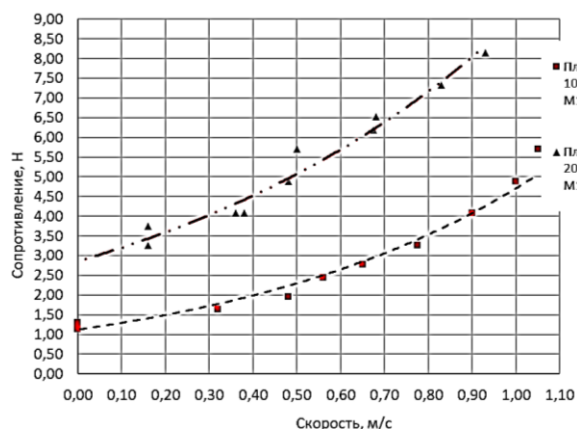


Рис.9 Сопротивление модели ледокола проекта 21900 (M1:75) в мелкобитом искусственном льду толщиной 10 и 20мм (S=10 баллов).

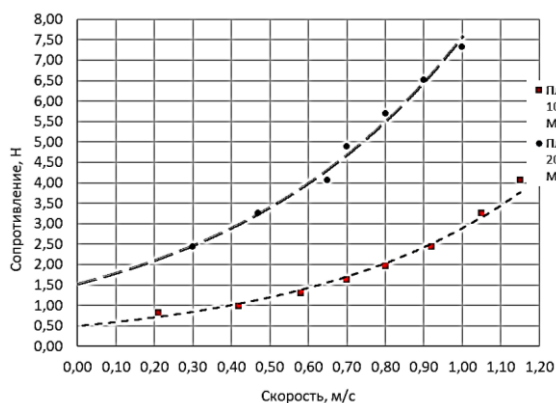


Рис. 10 Сопротивление модели ледокола проекта 21900 (M1:100) в мелкобитом искусственном льду толщиной 10 и 20мм (S=10 баллов).

3. Пересчет результатов эксперимента на натуру

В результате пересчета данных модельного эксперимента на натуру по методике, изложенной выше были получены кривые полного ледового сопротивления для натуральных судов. Данные пересчета показаны на рис.11-16.

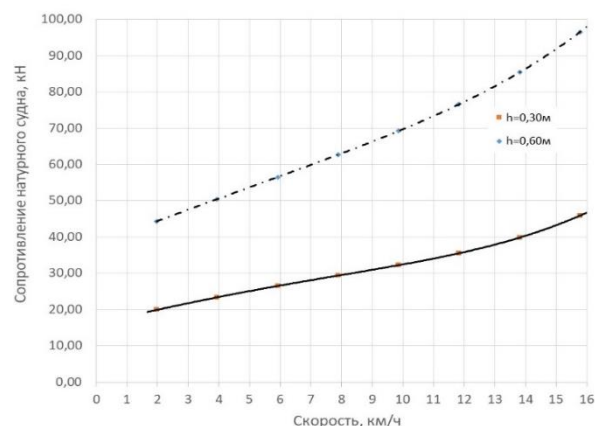


Рис 11 Кривая полного ледового сопротивления при движении судна проекта Р-47 в битом льду (S=10 баллов).

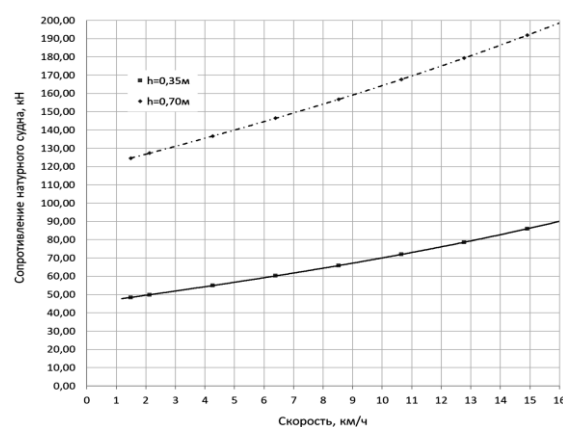


Рис.12 Кривая полного ледового сопротивления при движении судна проекта 16 в битом льду (S=10 баллов).

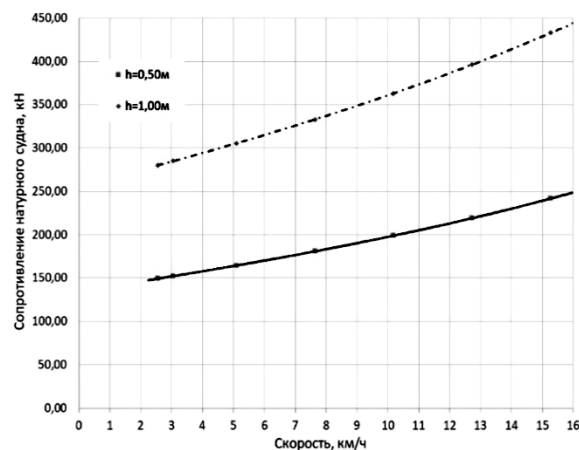


Рис. 13 Кривая полного ледового сопротивления при движении судна проекта 1105 в битом льду (S=10 баллов).

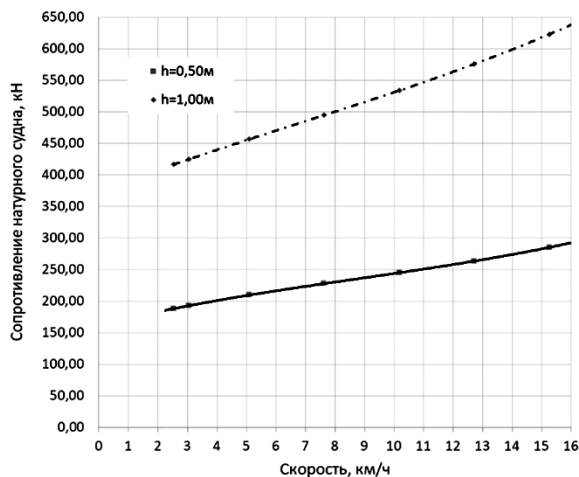


Рис. 3.14 Кривая полного ледового сопротивления при движении судна проекта 1191 в битом льду ($S=10$ баллов).

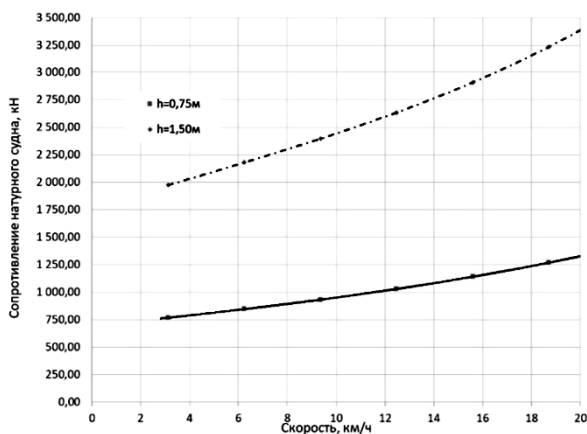


Рис. 3.15 Кривая полного ледового сопротивления при движении судна проекта 2190 (1:75) в битом льду ($S=10$ баллов).

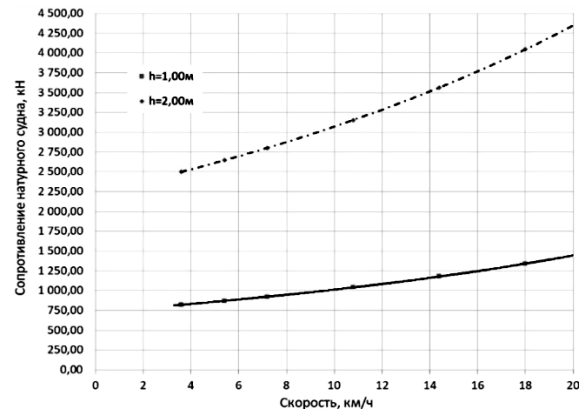


Рис. 3.16 Кривая полного ледового сопротивления при движении судна проекта 2190 (1:100) в битом льду ($S=10$ баллов).

Заключение

Разработанная в НГТУ методика моделирования взаимодействия судов с битым льдом позволяет прогнозировать ледовое сопротивление. Данные испытания не требуют искусственного или естественного холода и могут проводиться в любое время года.

Полученные результаты моделирования и пересчета могут быть использованы для уточнения полуэмпирических формул расчета ледового сопротивления и прогнозирования ледового сопротивления, близких по обводам и размерениям судов.

Литература

1. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2036 года и на дальнейшую перспективу до 2050 года. / распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 г. № 2553-р (в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 12 мая 2025 г. № 1181-р).
2. <https://rs-class.org/news/general/razvitie-sudov-ledovogo-klassa-pod-tekhnicheskim-nablyudeniem-rs/>
3. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях, Судостроение, Ленинград 1986г.
4. Грамузов, Е.М. Ледовая ходкость судов/ Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001 – 512с.
5. Зуев В.А., Грамузов Е.М. Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов. Полярная механика, г. Владивосток, 2016.
6. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. СПб, 2014, 512 с.
7. Методика проведения модельных испытаний судов в ледовых условиях в бассейне НГТУ. НГТУ, 2019 г.
8. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.. Судостроение, 1980, 207 с.
9. Ларин А.Г. Экспериментальные исследования взаимодействия судов со льдом / Ларин А.Г., Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Ларина Е.М. Транспортные системы № 2 (28), 2023, стр.50-59 DOI: 10.46960/2782-5477_2023_2_50.
10. Ларин А.Г. Прогнозирование ходкости грузопассажирского парома при движении в битых льдах / Ларин А.Г., Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Ларина Е.М. Научные проблемы водного транспорта. 2022. № 73. С. 15-26.

References

1. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2036 and for the further perspective up to 2050. / Order of the Government of the Russian Federation of October 28, 2019 No. 2553-r (as amended by the Order of the Government of the Russian Federation of May 12, 2025 No. 1181-r).
2. <https://rs-class.org/news/general/razvitie-sudov-ledovogo-klassa-pod-tekhnicheskim-nablyudeniem-rs/>
3. Zuev V.A. Means of extending navigation on inland waterways, Shipbuilding, Leningrad 1986.
4. Gramuzov, E.M. Ice propulsion of ships / B.P. Ionov, E.M. Gramuzov. – SPb.: Sudostroenie, 2001 – 512 p.

5. Zuev V.A., Gramuzov E.M. New approaches to modeling the ice environment during model tests of ships. Polar mechanics, Vladivostok, 2016.
6. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Design of icebreakers. SPb, 2014, 512 p.
7. Methodology for conducting model tests of ships in ice conditions in the NSTU basin. NSTU, 2019
8. Ryvlin A.Ya., Kheisin D.E. Testing ships in ice. L.. Sudostroenie, 1980, 207 p.
9. Larin A.G. Experimental studies of the interaction of ships with ice / Larin A.G., Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Larina E.M. Transport systems No. 2 (28), 2023, pp. 50-59 DOI: 10.46960/2782-5477_2023_2_50.
10. Larin A.G. Forecasting the propulsion of a cargo-passenger ferry when moving in broken ice / Larin A.G., Gramuzov E.M., Kalinina N.V., Larina E.M. Scientific problems of water transport. 2022. No. 73. P. 15-26.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ларин Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: alexander_ks1@mail.ru

Aleksandr G. Larin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: alexander_ks1@mail.ru

Ларина Елизавета Михайловна старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: rohmistrovaliza@mail.ru

Elizaveta M. Larina senior lecturer of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: rohmistrovaliza@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 13.11.2025.

Научная статья

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.076>

Применение энергетического подхода к определению сопротивления ледокольного судна

Блинов К.Д.¹ blinov.kirill@yandex.ru, Жуков А.Е.¹ zhukov@nntu.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье представлен энергетический подход к определению сопротивления ледокольного судна при движении в сплошном льду. Метод основан на математическом моделировании составляющих сопротивления с учетом физико-механических свойств льда, включая работу его разрушения и цилиндрическую жесткость. Проведены экспериментальные исследования в ледовом опытовом бассейне с моделями речных ледоколов и двумя типами модельного льда: льдом Зуева — Грамузова и композитным льдом. Получены коэффициенты полуэмпирической модели сопротивления, позволяющие пересчитывать результаты модельных испытаний на натурные условия. Сравнение с натурными данными подтвердило эффективность предложенного подхода, особенно при использовании композитного льда, который более точно имитирует свойства реального ледяного покрова. Результаты исследования могут быть применены для оптимизации проектных характеристик ледоколов и судов арктического плавания.

Ключевые слова: ледокол, сплошной ледяной покров, опытовый бассейн, модельный лёд, полуэмпирическая модель, модельный эксперимент.

Для цитирования: Блинов К.Д., Жуков А.Е. Применение энергетического подхода к определению сопротивления ледокольного судна, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 60—65. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.076

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.076>

The use of an energy approach to calculation the level ice resistance of icebreaker vessel

Kirill D. Blinov¹ blinov.kirill@yandex.ru, Alexander E. Zhukov¹ zhukov@nntu.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. The article presents an energy approach to determining the resistance of an icebreaker when moving in solid ice. The method is based on mathematical modeling of the components of resistance, taking into account the physical and mechanical properties of ice, including work on its destruction and cylindrical rigidity. Experimental studies were conducted in an ice experimental basin with models of river icebreakers and two types of model ice: Zuev-Gramuzov ice and composite ice. The coefficients of the semi-emergency resistance model were obtained, which make it possible to recalculate the results of model tests to field conditions. Comparison with field data confirmed the effectiveness of the proposed approach, especially when using composite ice, which more accurately mimics the properties of a real ice sheet. The results of the study can be applied to optimize the design characteristics of icebreakers and Arctic vessels.

Keywords: icebreaker, level ice, ice, model ice, semi-empirical model, model test

For citation: Kirill D. Blinov, Alexander E. Zhukov The use of an energy approach to calculation the level ice resistance of icebreaker vessel. Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 60—65. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.076

Введение

В современном судостроении, особенно при проектировании ледоколов и судов арктического плавания, актуальной задачей является точное определение сопротивления, возникающего при движении судна во льдах. Традиционные методы пересчета данных модельных испытаний на натурные условия зачастую не учитывают всех особенностей взаимодействия корпуса судна с ледяным покровом, что может приводить к значительным погрешностям. В данной статье предлагается энергетический подход к определению сопротивления ледокольного судна, основанный на математическом моделировании составляющих сопротивления и учете физико-механических свойств льда.

Классический способ пересчета ледового сопротивления с модельного эксперимента в опытовом ледовом бассейне впервые предложенный Ногидом и Шиманским [1,2] широко используется в настоящее время во многих странах мира. Одним из новых способов предсказания параметров движения ледокола является способ [3] который получил название: теоретико – экспериментальное моделирование ледовой ходкости и представляет собой использование полуэмпирической модели сопротивления ледокола для пересчета с модельного эксперимента в опытовом ледовом бассейне на сопротивление натурного судна. Данный метод основан на феноменологическом описании движения ледокола в сплошном льду и состоит из четырех слагаемых, каждое из которых описывает некую составляющую чистого ледового сопротивления и безразмерные коэффициенты

перед каждым из слагаемых. Для реализации данного способа необходимо во время экспериментальных исследований помимо значений толщины модельного льда, скорости и сопротивления модели необходимо получить значение физико-механических свойств модельного льда. Далее находятся коэффициенты при каждом из членов уравнения для модельных испытаний ледокола. При пересчете на натуру в данную полуэмпирическую модель подставляются значения для натуральных данных судна и ледяного покрова, постулируется равенство коэффициентов для модели и для натуре.

1. Определение параметров движения моделей ледоколов в опытовом бассейне и определение физико-механических свойств модельного льда

В рамках исследования были проведены эксперименты с моделями речных ледоколов в ледовом опытовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева. В качестве модельного льда были приняты лед Зуева – Грамузова [4] и лед композитной конструкции с диаметром шариков 20 мм [5]. При движении модели ледокола во льду Зуева – Грамузова распределение составляющих сопротивления не соответствует натуре, а именно сильно смещено в сторону увеличения составляющих разрушения. В случае с композитным льдом его несущая способность уменьшается путем включения в него шариков полиэтилена высокого давления, однако при этом меняется масса льдинок, взаимодействующих с корпусом модели ледокола, что в свою очередь приводит к увеличению составляющих взаимодействия корпуса с обломками льда. Фрагменты экспериментальных исследований ходкости моделей речных ледоколов в опытовом бассейне приведены на рис. 1 – 3.

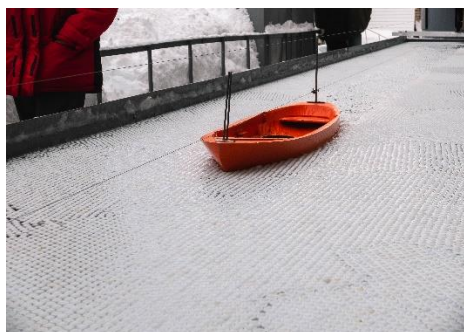


Рис. 1. Испытание модели ледокола проекта 16 в композитной модели льда

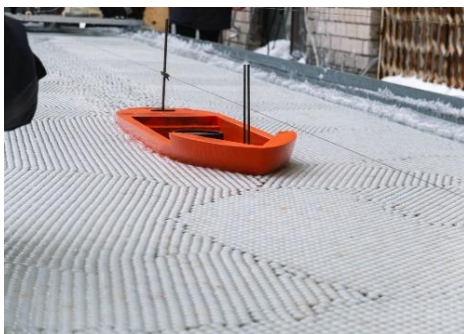


Рис. 2. Испытание модели ледокола проекта 1105 в композитной модели льда



Рис. 3. Испытание модели ледокола проекта 1191 в композитной модели льда

В каждом из экспериментов также проходили опыты по определению несущей способности модельного льда с помощью опыта по центральному пролomu ледяной пластины с фиксацией значений силы и прогиба под нагрузкой. Полученные данные можно представить в виде графиков в осях сила – прогиб, площадь под которым является работой на разрушение льда. Эту характеристику диаграммы можно разделить на две части до и после максимальной силы, т.е. работа докритической и закритической части диаграммы соответственно. При пересчете на натуру в явном виде также нужно подставить значение работы разрушения при разрушении форштевнем и бортами натурального льда [3]. Для этого используются данные экспериментов по разрушению натурального льда [6], диаграмма разрушения натурального льда толщиной 30 см приведена на рис. 4. На рис. 4: Z – величина прикладываемого ко льду усилия; w – прогиб льда в точки приложения нагрузки; Z_{max} , w_{cr} – максимальное зафиксированное в опыте значение прикладываемого ко льду усилия и соответствующий ему прогиб льда; w_{max} – максимальный прогиб льда; A_{cr} , A_{super} – площадь докритического и закритического участков диаграммы разрушения.

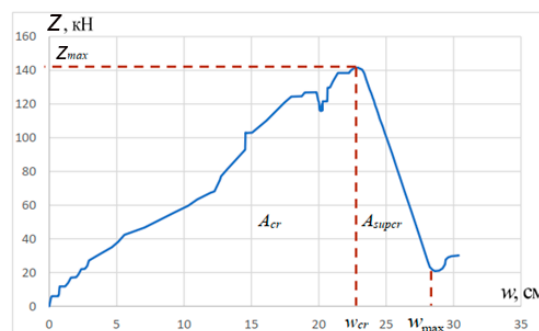


Рис. 4. Диаграмма разрушения пресноводного льда толщиной 30 см

Диаграммы разрушения для двух типов модельного льда приведены на рис 5,6. При сравнении данных диаграмм разрушения с диаграммой натурального льда можно заметить, что у модельного льда Зуева – Грамузова сильно выражена закритическая часть диаграммы разрушения, что в свою очередь связано с увеличением работы на проворачивание образованными при трещинообразовании секторов во льду, данный факт. По диаграммам также видно,

что композитный лёд более приближен по форме диаграммы к натурному льду.

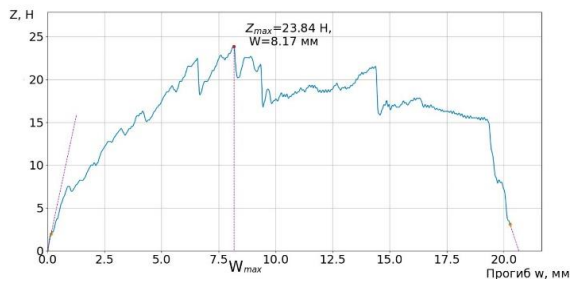


Рис. 5. Диаграмма разрушения модельного льда Зуева-Грамузова

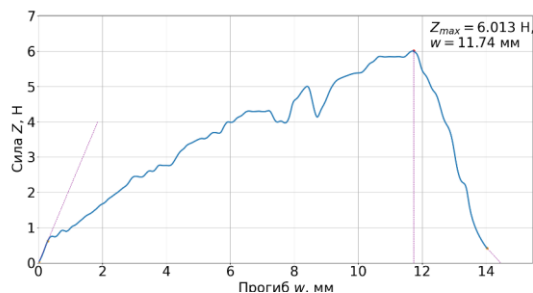


Рис. 6. Диаграмма разрушения модельного льда композитного льда

Значение коэффициента трения в модели необходимо принимать разным для составляющих сопротивления разрушения и обломков так для составляющих разрушения в модели можно принять коэффициент сухого трения полученный экспериментально [7] $f_p = 0,015$. Значение же коэффициента трения для составляющих обломков будет несколько больше, что связано с меньшей силой реакции опоры подводной части корпуса модели на силу плавучести льда и существенно меньшей силой трения льда о корпус. В этих составляющих рекомендуется применять коэффициент трения равный $f_{обл} = 0,2$. При пересчете на натуру применяется значение коэффициента трения $f = 0,15$.

Двумя важными критериями необходимыми для пересчета и которые можно получить из опытов по пролому модельного льда являются значения работ разрушения льда и цилиндрическая жесткость пластины. Для получения значения цилиндрической жесткости пластины используется теория изгиба тонких пластины на упругом основании, а именно решение Герца для изгиба бесконечной пластины [8]:

$$D = \frac{Z^2}{64\rho gw^2}$$

где Z – сосредоточенное усилие, действующее на пластину, Н; w – прогиб под нагрузкой, м; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; D – цилиндрическая жесткость пластины, Нм.

Значения Z и w в формуле (1) снимаются на линейном участке в начале нагрузки с диаграмм разрушения. Результат исследования по нахождению цилиндрической жесткости двух типов модельного льда приведены на рис. 7. По оси абсцисс в случае с композитным льдом приводится толщина намороженного слоя естественного льда

между гранулами. Из рисунка видно значительное уменьшение цилиндрической жесткости пластины при включении в нее гранул полиэтилена.

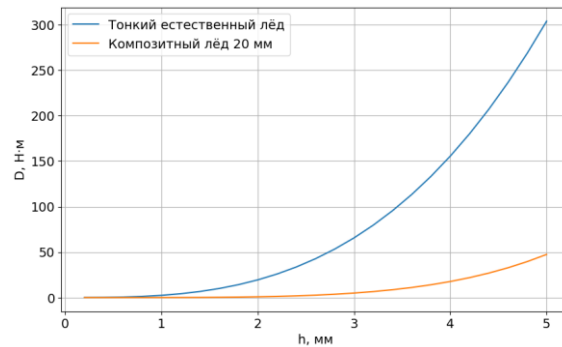


Рис. 7. Значения цилиндрической жесткости модельного льда

Также одной из величин участвующих в пересчете сопротивления с использованием энергетического подхода является работа разрушения модели льда. На рис.8 приведены регрессионные зависимости суммарных работ разрушения двух типов модельного льда и разделенные на критическую и закритическую составляющие при разных толщинах льда. В верхней левой части рис. 8 показан увеличенный участок интервала толщины смораживания композитного льда от 1.5 до 3 мм. Из рис. 8 видно, что у модельного льда Зуева – Грамузова составляющие работы его разрушения с увеличением толщины примерно равны по своему вкладу в общую работу. У композитного же льда процесс происходит несколько иначе. Существует такое значение толщины смораживания при котором работы равны, однако при дальнейшем увеличении толщины наблюдается тенденция к росту именно критической части диаграммы разрушения, в то время, когда закритическая часть практически не изменяется. Данный факт связан с превышением внешней силы сил адгезии соединения лед-полиэтилен.

Для пересчета результатов модельного эксперимента были получены коэффициенты полуэмпирической модели сопротивления для каждого из трех испытанных в опытовом бассейне ледоколов. Данные коэффициенты для двух типов модельного льда представлены в таблице 1.

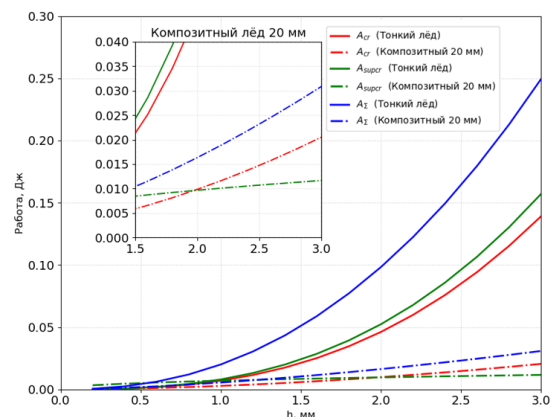


Рис. 8. Значения работы разрушения модельного ледяного покрова в опыте по центральному пролому

Таблица 1

Коэффициенты полуэмпирической модели сопротивления

Проект ледокола	16	1105	1191
Композитный лёд 20 мм			
$k'_{рст}$	1,375	0,764	1,258
$k'_{рв}$	0,142	0,156	0,113
$k_{ост}$	7,000	5,279	3,937
$k_{ов}$	0,403	0,440	0,133
Модельный лёд Зуева - Грамузова			
$k'_{рст}$	5,780	7,109	5,591
$k'_{рв}$	0,712	0,679	0,530
$k_{ост}$	3,334	4,628	5,533
$k_{ов}$	0,586	0,613	1,027

2. Результаты пересчета, сравнение с натурными данными

Для пересчета на натуру в полуэмпирическую модель сопротивления подставляются геометрические характеристики натурального судна и физико-механические свойства натурального льда из [9]. Далее строятся кривые чистого ледового сопротивления и кривая тяги на гаке, снимая точки пересечения между кривыми можно получить диаграмму ледопроеходимости ледокола. Полученные диаграммы ледопроеходимости можно сравнить с натурными данными [4] и с пересчетом с использованием теории подобия и размерностей для экспериментов с использованием в качестве модели льда Зуева – Грамузова [10]. Полученные диаграммы ледопроеходимости приведены на рис. 9-11. В результате видно, что с увеличением толщины льда пересчет на натуру с использованием модели льда Зуева – Грамузова, по сравнению с композитным льдом сопротивление резко возрастает. Данный факт связан в первую очередь с ростом составляющей сопротивления разрушения льда, коэффициенты при которой в 5-6 раз выше, чем в случае с композитным льдом. Также столь резкое увеличение сопротивления на больших толщинах связано с экстраполяцией данных по силе и работе разрушения льда в канале натурального льда, в [6] максимальная толщина испытанного поля льда была равна 0,3 м.

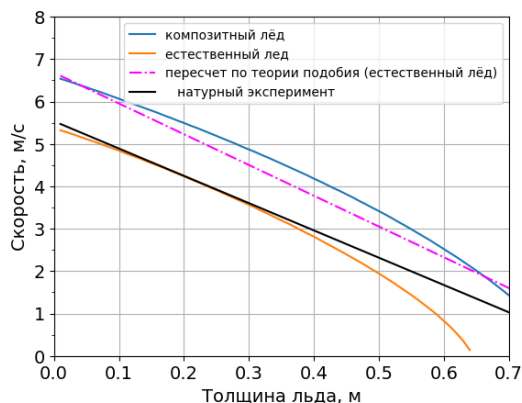


Рис. 9. Диаграммы ледопроеходимости для ледокола проекта 1191

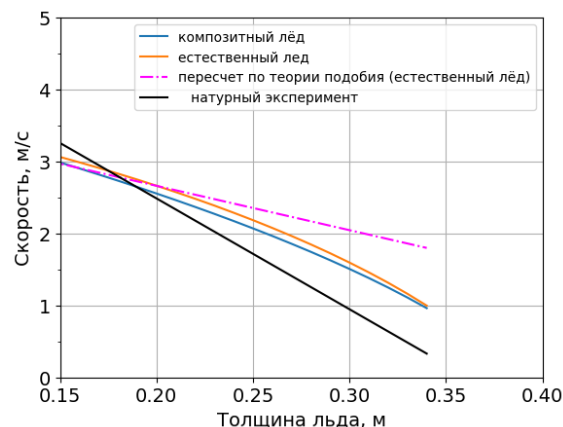


Рис. 10. Диаграммы ледопроеходимости для ледокола проекта 16

Значения максимальной силы при разрушении льда в канале используются для моделирования в полуэмпирической модели смятия кромки ледяного покрова. Эксперименты с двумя типами модельного льда показали, что композитный лёд с диаметром гранул 20 мм, несмотря на лучшую приближенность к натурному льду по форме диаграммы разрушения, вызывает значительное перераспределение составляющих сопротивления в сторону взаимодействия с обломками. Это указывает на необходимость проведения дополнительных исследований с уменьшенным размером гранул (10 мм) для минимизации искажений в распределении составляющих сопротивления.

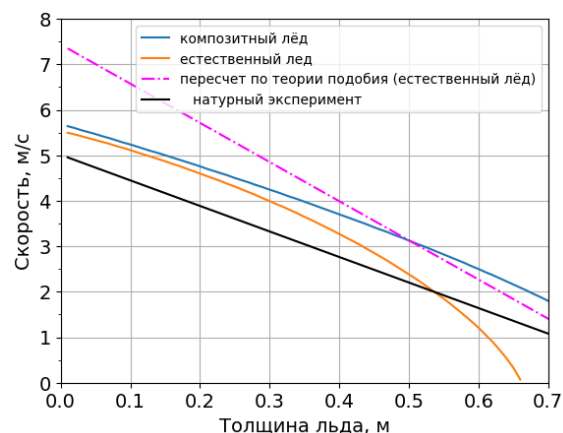


Рис. 11. Диаграммы ледопроеходимости для ледокола проекта 1105

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало возможность применения энергетического подхода для определения сопротивления ледокольного судна. Использование полуэмпирической модели, учитывающей работы разрушения льда и цилиндрическую жесткость ледяного покрова, позволило получить более точные результаты пересчета данных модельных испытаний на натурные условия. Полученные коэффициенты модели сопротивления для различных проектов ледоколов позволили построить диаграммы ледопроеходимости, которые хорошо согласуются с натурными данными. Предложенный метод

открывает новые возможности для оптимизации плавания, а также для дальнейших исследований в проектировании ледоколов и судов арктического области ледовой ходкости.

Литература

1. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах. Труды ЛКИ, вып. XXVIII. – Л. - С.179-185
2. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения / Ю.А. Шиманский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960.–89 с
3. Грамузов Е. М. Перестроение полуэмпирической модели чистого ледового сопротивления при движении судна в сплошном льду / Е. М. Грамузов, Н. В. Калинина, А. А. Куркин // Инженерная физика. – 2023. – № 11. – С. 53-62. – DOI 10.25791/infizik.11.2023.1367. – EDN HQGSFC.
4. Ионов Б.П. Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб.: Судостроение, 2013 504 с.
5. Себин, А. С. Исследование композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм / А. С. Себин, К. Д. Блинов, Ю. А. Двойченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-3(61). – С. 94-105. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.049. – EDN CRLFMU.
6. Двойченко, Ю. А. Деформация и пролом ледяного поля [Текст] /Ю. А. Двойченко // Теория прочность ледокольного корабля: межвуз. Сб. – Горький, 1980. – С. 38-44.
7. Блинов К.Д. Определение сопротивления речного ледокола с использованием энергетического подхода на основе экспериментов в модельном льду композитной конструкции / К. Д. Блинов, В. Д. Марченко, И. Е. Курганская, К. С. Васильев // Транспортные системы. – 2025. – № 1(35). – С. 29-39. – EDN CNRTUA.
8. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войтковский-Кригер. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. – 635 с
9. Богородский В. В. Лед: Физические свойства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л. : Гидрометеиздат, 1980.– 381 с
10. Прогнозирование ходкости речного ледокола проекта 1105 с использованием модельного эксперимента / М. А. Панакушин, А. Г. Ларин, К. Д. Блинов, М. А. Панченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-3(61). – С. 88-93. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.048. – EDN BYTVCY.

References

1. Nogid L.M. Modelirovanie dvizheniya sudna v sploshnom ledjanom pole i v bityh l'dah.[Modeling of ship movement in a continuous ice field and in broken ice] Trudy LKI, vyp. XXVIII. – L. - 179-185 s.
2. Shimanskij Ju.A. Teorija modelirovanija dvizheniya sudna v sploshnom ledjanom pole.[Theory of modeling ship movement in a continuous ice field] Sovremennye voprosy ledokolostroenija. – L.: Gidrometeoizdat, 1960.–89 s
3. E. M. Gramuzov, N. V. Kalinina, A. A. Kurkin Reconstruction Of A Semi-Empirical Model Of Pure Ice Resistance When A Ship Is Moving In Solid Ice nzhenernaja fizika. – 2023. – № 11. – S. 53-62.
4. Ionov B.P., Gramuzov E.N. Ledovaya khodkost' sudov [Ice propulsion of ships]: Monografiya, SPb.: Sudostroenie, 2013. 504 s.
5. A. S. Sebin, K. D. Blinov, Ju. A. Dvojchenko. The Investigation Of A Composite Model Of The Ice Cover (Gp-Ice) Composed Of A Single Layer Of Spherical Granules With A Diameter Of 20 Mm / Morskie intellektual'nye tehnologii. – 2023. – № 3-3(61). – S. 94-105
6. Dvojchenko, Ju. A. Deformacija i prolom ledjanogo polja [Deformation and failure of a frozen field] Teorija prochnost' ledokol'nogo korablja: mezhvuz. Sb. – Gor'kij, 1980. – S. 38-44.
7. K. D. Blinov, V. D. Marchenko, I. E. Kurganskaja, K. S. Vasil'ev Opredelenie soprotivlenija rechnogo ledokola s ispol'zovaniem jenergeticheskogo podhoda na osnove jeksperimentov v model'nom l'du kompozitnoj konstrukcii [Determination of river icebreaker resistance using an energy approach based on experiments in model ice of a composite structure]. Transportnye sistemy. – 2025. – № 1(35). – S. 29-39. – EDN CNRTUA.
8. S.P. Timoshenko, S. Vojtkovskij-Kriger.. Plastinki i obolochki [Plates and shells] . Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963. – 635 s
9. Bogorodskij V. V. , V. P. Gavrilov. Led: Fizicheskie svojstva [Ice: Physical Properties]. Gidrometeoizdat, 1980.– 381 s
10. M. A. Panakushin, A. G. Larin, K. D. Blinov, M. A. Panchenko Predicting The Ice Seaworthiness Of The Project 1105 River Icebreaker Using A Model Experiment. Morskie intellektual'nye tehnologii. – 2023. – № 3-3(61). – S. 88-93.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Блинов Кирилл Дмитриевич, аспирант кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Kirill D. Blinov, graduate student of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Жуков Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: zhukov@nntu.ru

Alexander E. Zhukov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department «Aero-Hydrodynamics, Machine Strength and Strength of Materials», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: zhukov@nntu.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 13.11.2025.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 532.3:532.5:629.585

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.077>

Движение погруженного тела на малом заглублении в ледовых условиях

Земляк В.Л.¹ vellkom@list.ru, Козин В.М.² kozinvictor@rambler.ru

¹Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, ²Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН

Аннотация. В исследовании экспериментально на базе опытового ледового бассейна проанализировано влияние положения рубки крыловидной формы на волнообразование и характер движения модели подводного аппарата в ледовых условиях. Рубка размещалась в носовой оконечности, на мидель-шпангоуте и в корме. Модель аппарата также имела кормовое горизонтальное и вертикальное оперение. Модельный лед намораживался естественным холодом до заданной толщины. Движение моделей происходило с помощью тросовой буксировочной системы, которая в отличие от традиционных подходов к буксировке моделей погруженных тел позволяла определять изменение заглубления модели под воздействием подъемной силы при заданной скорости движения. Показано, что расположение рубки в носовой оконечности приводило к генерации изгибно-гравитационных волн наибольшей кривизны и соответственно ледоразрушающей способности. Определены параметры генерируемых изгибно-гравитационных волн. С помощью предложенного критерия ледоразрушения определена их ледоразрушающая способность. Установлена связь между величиной критерия ледоразрушения и характером разрушения льда. Увеличение площади смоченной поверхности в кормовой оконечности у модели №3 вызывало рост подъемной силы и максимальное уменьшение заглубления при $0,42 < Fr < 0,48$ по сравнению с остальными моделями. Подобный эффект наблюдался и для угла дифферента. Стоит отметить, что положение локального максимума значения γ со смещением рубки в корму соответствовало большим значениям Fr .

Ключевые слова: погруженное тело, ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, вертикальное перемещение

Финансирование: Исследование выполнено в рамках проекта FSNZ-2024-0010 (№ 1024060700009-7-2.3.2) на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузам

Для цитирования: Земляк В.Л., Козин В.М. Движение погруженного тела на малом заглублении в ледовых условиях, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 66—73. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.077

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.077>

Movement of a submerged body at shallow depth in ice conditions

Vitaliy L. Zemlyak¹ vellkom@list.ru, Viktor M. Kozin² kozinvictor@rambler.ru

¹Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russian Federation, ²Institute of Machine Science and Metallurgy of Khabarovsk FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

Abstract. The study experimentally analyzed the effect of the wing-shaped conning tower position on wave formation and the nature of the underwater vehicle model motion in ice conditions using an experimental ice tank. The conning tower was located at the bow end, on the midship frame, and at the stern. The vehicle model also had a stern horizontal and vertical tail. The model ice was frozen by natural cold to a specified thickness. The models were moved using a cable towing system, which, unlike traditional approaches to towing models of submerged bodies, made it possible to determine the change in the model depth under the influence of the lifting force at a given speed. It was shown that the location of the conning tower at the bow end led to the generation of flexural-gravity waves of the greatest curvature and, accordingly, ice-destroying capacity. The parameters of the generated flexural-gravity waves were determined. Using the proposed ice destruction criterion, their ice-destroying capacity was determined. A connection was established between the ice destruction criterion value and the nature of ice destruction. An increase in the wetted surface area at the aft end of model No. 3 caused an increase in the lift force and a maximum decrease in depth at $0.42 < Fr < 0.48$ compared to other models. A similar effect was observed for the trim angle. It is worth noting that the position of the local maximum of the γ value with the shift of the wheelhouse to the aft corresponded to larger Fr values.

Key words: submerged body, ice cover, flexural-gravity waves, vertical displacement

Financial Support: The study was performed under the project FSNZ-2024-0010 (No. 1024060700009-7-2.3.2) of the task for fulfillment of the government works in the field of science within the base part of the government task for higher education establishment

For citation: Vitaliy L. Zemlyak, Viktor M. Kozin, Movement of a submerged body at shallow depth in ice conditions, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 66—73. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.077

Введение

Интерес к подводным аппаратам (ПА) способным выполнять миссии различного назначения, в том числе с высокой скоростью движения и на малом заглублении постоянно растет. Как правило, выбор формы ПА обусловлен его эксплуатационными характеристиками. Тем не менее, выбор формы корпуса и положение выступающих частей, например ограждения выдвижных устройств в виде рубки различного типа остается сложной инженерной задачей. Влияние формы носовой и кормовой оконечности и относительного удлинения на гидродинамические характеристики модели ПА рассмотрены в работе [1]. В качестве погруженного тела автором была выбрана модель DARPA SUBOFF геометрия которой описана в работе [2]. S. Shariati и S. Mousavizadegan проанализировали влияние рубки крыловидной формы и кормового оперения на составляющие сопротивления ПА в зависимости от заглубления [3]. В работе [4] авторы на основе модели Joubert BB2 [5] исследовали влияние глубины погружения тела, расположение рубки относительно мидель-шпангоута и формы носовой оконечности на характер волнообразования на поверхности воды с целью выбора оптимальной формы и конфигурации выступающих частей ПА. Dawson в экспериментально-теоретическом исследовании [6] пришел к выводу, что при стационарном движении погруженного тела на малом заглублении наибольшее эксплуатационное значение приобретает вертикальная подъемная сила F_z и гидродинамический момент M_y .

Очевидно, что при движении ПА в ледовых условиях его гидродинамические характеристики также будут меняться. Также известно [7], что при определенной скорости движения погруженной нагрузки частота изгибной волны распространяющейся в свободной пластине будет равна частоте гравитационной волны на поверхности чистой воды. В результате в системе лед-вода могут генерироваться прогрессивные изгибно-гравитационные волны (ИГВ), которые приводят к частичному или полному разрушению ледяного покрова [8]. Свойства ИГВ и гидродинамические характеристик движущихся в ледовых условиях тел изучались различными авторами [9-11].

Целью исследования было экспериментальное определение влияния положения рубки крыловидной формы относительно корпуса ПА на характер движения модели на малом заглублении вблизи нижней поверхности сплошного ледяного покрова.

Подготовка к проведению модельного эксперимента

Для проведения экспериментов по оценке влияния положения рубки на параметры движения ПА использовался ледовый бассейн научной лаборатории ледотехники (ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема) [12]. Размеры бассейна обеспечивали малое влияния стенок и дна чаши на гидродинамические характеристики ПА и характер

распространения на поверхности в соответствии с рекомендациями работы [13]. Длина бассейна составляла $L_T=11,6L_m$ (где L_m – длина модели ПА равная 1,154 м), ширина $B_T=21,8D_m$ (где D_m – диаметр корпуса модели без учета размера рубки и оперения), глубина $T_T=7,3D_m$. Подобные размеры характерны для мировой практики испытания моделей погруженных тел в опытовых бассейнах [14].

Модель ПА имела геометрию корпуса схожую модели Joubert BB2 [5] с дополнительной цилиндрической вставкой и вертикально и горизонтально расположенными рулями в кормовой оконечности (рис. 1). На корпусе модели размещалась рубка крыловидной формы расположенная в носовой (модель №1), кормовой (№3) части и на мидель-шпангоуте (№2). Относительное удлинение составило $L_m/D_m=8,4$. Для изготовления модели ПА изготавливался принтер Raise3D и метод послойной печати.

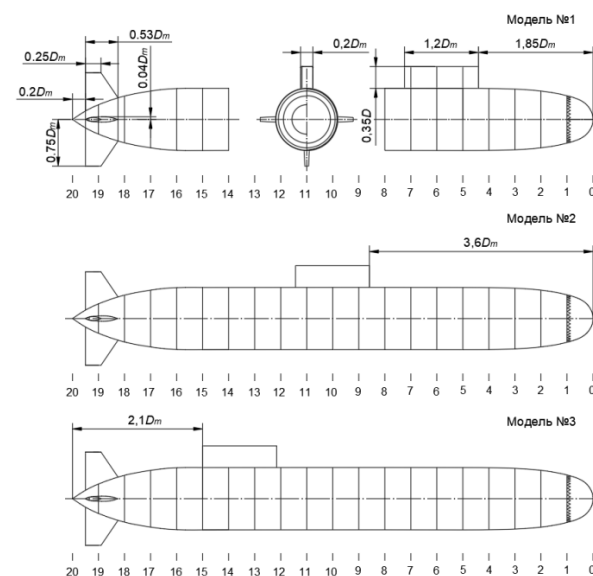


Рис. 1. Теоретический чертеж моделей погруженных тел

Моделирование турбулентного режима течения в пограничном слое осуществлялось с помощью искусственного турбулизатора в виде полосы Нэма [15] расположенной на расстоянии $0,05L_m$ от носового перпендикуляра.

В экспериментах для движения модели использовалась буксировочная система тросового типа. Такой подход позволяет определять параметры движения модели в процессе ее буксировки [16], а именно относительное вертикальное перемещение h_m/h (где h_m – отклонение модели от первоначально заданного заглубления h), возникающее под воздействием подъемной силы и угол дифферента γ . Натяжение троса не оказывало влияния на величину вертикального перемещения и при положении тела в покое на середине траектории движения обеспечивало перемещение модели вдоль оси z на величину равную до $2D_m$ в верхнем и нижнем

направлении, что как показали последующие эксперименты достаточно для моделирования процесса стационарного движения.

Методика моделирования движения модели ПА вблизи сплошного льда

Для моделирования сплошного ледяного покрова использовался подход, описанный в работе Ногида [17]. В качестве модели выбран пресноводный лед без примесей и добавок, повышенная прочность которого компенсировалась меньшей толщиной и определялась по формуле [8]:

$$h_n = h_m \lambda_l^{4/3} ([\sigma_u]_n / [\sigma_u]_m)^{-1/3} \quad (1)$$

где $[\sigma_u]_n$ – предел прочности натурального льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ – предел прочности модельного льда на изгиб.

Прочность модельного льда на изгиб определялась экспериментально согласно рекомендациям [18]. Соотношение E/σ_u для натурального и модельного льда также выполнялось [19].

Характер разрушения льда ИГВ оценивался с помощью геометрического критерия ледоразрушения α , который показывает зависимость разрушения льда от угла наклона ледяной пластины. В работе [8] установлено, что при движении нагрузки подо льдом если $\alpha > 0,04$, то происходит раскрытие трещин и разрушение ледяного покрова:

$$\alpha = 2\pi w_m / \lambda_m \quad (2)$$

где w_m – прогиб модельного льда; λ_m – длина модельных ИГВ.

Моделирование осуществлялось с частичным выполнением условий подобия [20].

Модель ПА была геометрически подобна натурному судну:

$$L_n / L_m = \lambda_l \quad (3)$$

где L_n – длина натурны.

Параметры генерируемых ИГВ пересчитывались на натуру согласно формуле:

$$\lambda_n / \lambda_m = w_n / w_m = \lambda_l \quad (4)$$

где λ_n – длина натурных ИГВ; w_n – прогиб натурального льда.

Так как при приготовлении модельного льда использовался естественный холод в ограниченный период отрицательных температур года (декабрь-февраль), то эксперименты проводились для получения наиболее значимых результатов при относительноном заглублении $h = 1.45 D_m$, $Fr = u / (g L_m)^{1/2} = 0,3 - 0,77$ (где u – скорость движения, g – ускорение свободного падения) и толщине модельного льда $h_{im} = 2$ мм.

Результаты модельных экспериментов

В ходе проведения экспериментов была выполнена оценка влияния положения рубки крыловидной формы на волнообразование и характер движения модели ПА вблизи нижней поверхности модельного льда. Для этого сравнивались результаты буксировок моделей №2 и №3 с ранее опубликованными результатами буксировки модели №1 [21]. Для оценки ледоразрушающей способности ИГВ использовался предложенный критерий α (рис. 2).

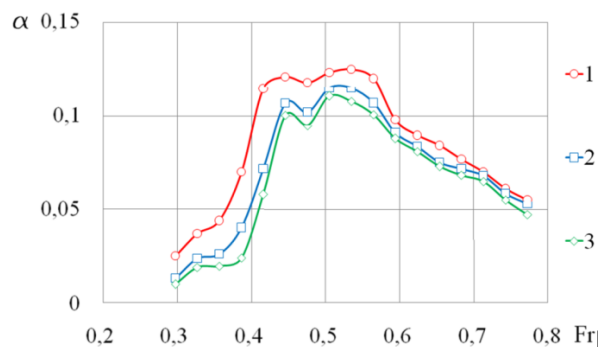


Рис. 2. Зависимости α от Fr : 1 - модель №1; 2 - модель №2; 3 - модель №3

Из полученных зависимостей видно, что положение рубки относительно корпуса модели ПА имело существенное значение. Наибольшая ледоразрушающая способность ИГВ проявлялась при движении модели №1 с носовым расположением рубки. Резкий рост значений α наблюдался при $Fr > 0,36$. Ледоразрушающая способность ИГВ от движения моделей №2 и №3 была ниже и начинала существенно возрастать при $Fr > 0,39$. В диапазоне $0,42 < Fr < 0,59$ для всех моделей наблюдались максимальные значения α с локальным минимумом при $Fr > 0,48$, что связано с интерференцией волновых составляющих и трансформацией ИГВ в этом скоростном диапазоне. Интенсивность разрушения льда была максимальной. В модельном поле формировались продольные и радиальные трещины, лед терял несущую способность (рис. 3). Величина критической скорости движения, т.е. скорости при которой волнообразование становилось максимальным, для всех трех моделей соответствовала значению $Fr \approx 0,53$. Далее интенсивность формирования трещин и разрушения льда снижалась (рис. 4)

При $Fr > 0,59$ заметной разницы между значениями α для всех трех моделей не наблюдалось (рис. 2). Ледоразрушающая способность льда падала из-за роста кривизны ИГВ (рис. 5).



а)



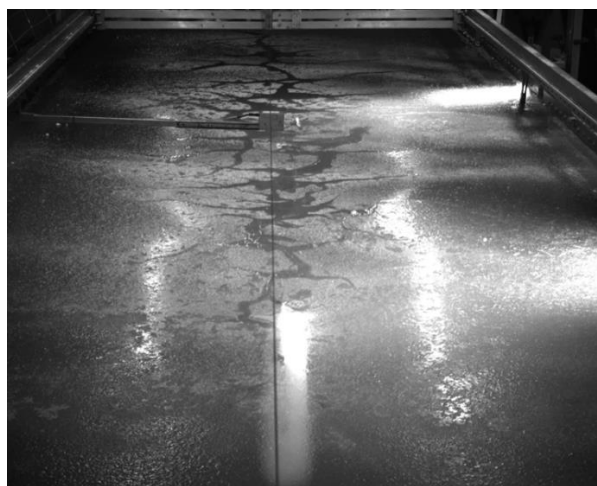
а)



б)



б)



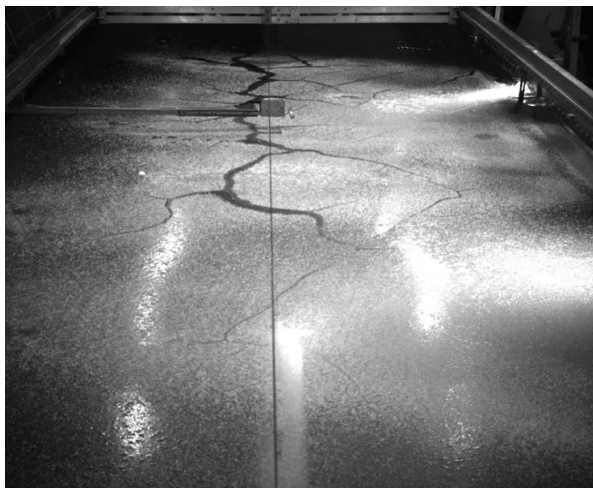
в)



в)

Рис. 3. Разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей при $Fr=0,51$
а) модель №1; б) модель №2; в) модель №3

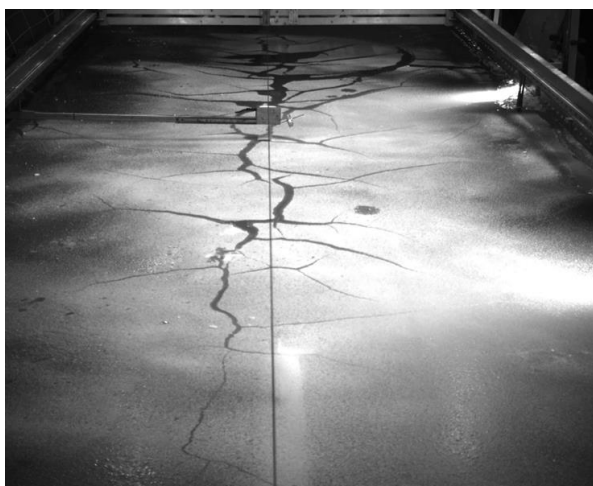
Рис. 4. Разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей при $Fr=0,56$
а) модель №1; б) модель №2; в) модель №3



а)



б)



в)

Рис. 5. Разрушение модельного льда ИГВ от движения моделей при $Fr=0,68$

а) модель №1; б) модель №2; в) модель №3

Неравномерное распределение давления по верхней и нижней поверхности модели ПА приводило к возникновению подъемной силы, которая в зависимости от значения числа Fr либо притягивала модель к поверхности льда в диапазоне $0,33 < Fr < 0,45$

уменьшая величину заглупления, либо отталкивала ее при $Fr > 0,45$ (рис. 6).

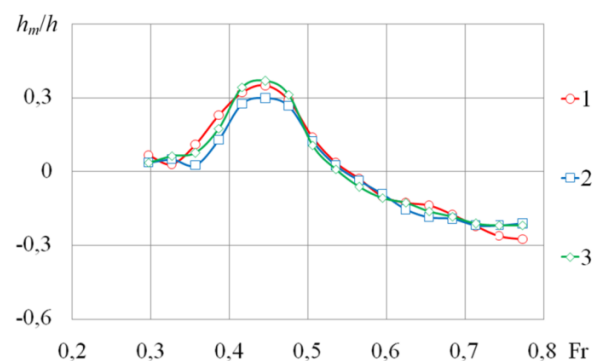
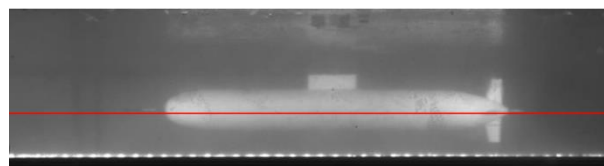


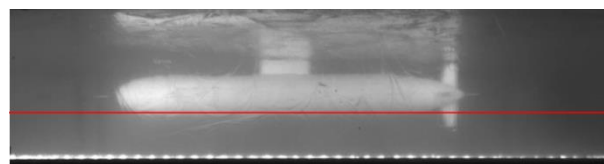
Рис. 6. Зависимости h_m/h от Fr

1 - модель №1; 2 - модель №2; 3 - модель №3

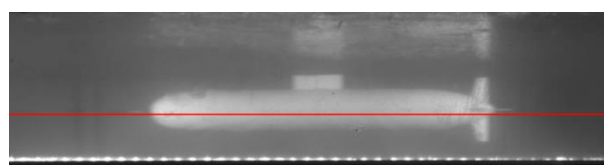
Значение $h_m/h=0$ соответствовало первоначально заданному заглуплению модели. Зависимости приобретали сложный характер. Уменьшение относительного заглупления для всех трех моделей фиксировалось при $Fr > 0,36$ (рис. 7а), достигая максимума при $Fr > 0,45$. Несмотря на значительную величину заглупления, модели практически контактировали с нижней поверхностью льда (рис. 7б). Далее наблюдался рост величины заглупления, которая при $Fr=0,53$ становилась равной h (рис. 7в). При $Fr > 0,68$ существенная разница между значениями h_m/h не фиксировалась (рис. 7г).



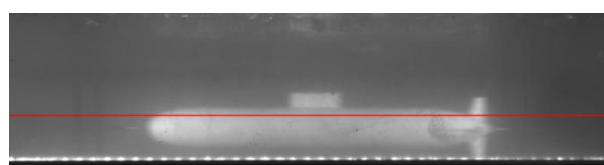
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Изображение положения модели №2 при ее движении вблизи нижней поверхности льда (красная линия показывает величину первоначально заданного заглупления h)

а) $Fr=0,36$; б) $Fr=0,45$; в) $Fr=0,53$; г) $Fr=0,77$

Наименьшие значения h_m/h наблюдались при движении модели №1, а наибольшие при движении модели №2 с расположением рубки в районе мидель-шпангоута.

Также в результате воздействия гидродинамического момента фиксировался угол дифферента модели γ , на который положение рубки оказывало значительное влияние. Характер зависимости γ от величины числа Fr показан на рис. 8.

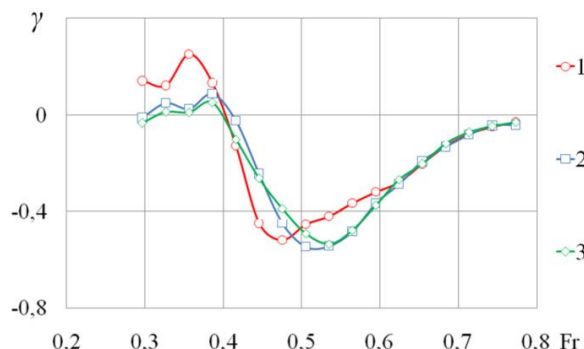


Рис. 6. Зависимости γ от Fr
1 - модель №1; 2 - модель №2; 3 - модель №3

Кривые имели локальный максимум, когда у модели появлялся дифферент на корму, причем для модели №1 он имел наибольшие значения при $Fr=0,36$, а у моделей №2-3 при $Fr=0,39$. Далее с ростом относительной скорости движения гидродинамический момент менял свой знак и фиксировался дифферент на нос. Максимальные

значения γ у модели №1 при были $Fr=0,48$, а у модели №2-3 при $Fr=0,53$, т.е. изменение положения рубки приводило к смещению максимального угла дифферента в сторону больших значений Fr , что очевидно связано с ростом площади смоченной поверхности в средней и кормовой части модели. При $Fr>0,6$ существенной разницы между значениями γ не наблюдалось.

Заключение

С помощью модельных экспериментов на базе опытового ледового бассейна показано влияние положения рубки относительно корпуса модели ПА на характер волнообразования и движения погруженного тела вблизи нижней поверхности сплошного ледяного покрова.

Установлено, что наличие рубки в носовой оконечности приводило к генерации ИГВ наибольшей кривизны и соответственно ледоразрушающей способности. Величина критической скорости движения для всех трех моделей составила $Fr=0,53$.

Увеличение площади смоченной поверхности в кормовой оконечности у модели №3 вызывало рост подъемной силы и максимальное уменьшение заглупления при $0,42<Fr<0,48$ по сравнению с остальными моделями. Подобный эффект наблюдался и для угла дифферента. Стоит отметить, что положение локального максимума значения γ со смещением рубки в корму соответствовало большим значениям Fr .

Литература

1. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach // Acta Mechanica Sinica. 2020. Vol. 36(1). P. 44–56. <https://doi.org/1007/s10409-019-00913-7>.
2. Groves, N.C., Huang, T.T., Chang, M.S. Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 and 5471). Bethesda, Maryland, USA: David Taylor Research Centre, 1989, 90 p.
3. Shariati S., Mousavizadegan S. The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface // Applied Ocean Research 2017. Vol. 67. P. 31–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.001>
4. Toxopeus S., Kerkvliet M., Vogels R., Quadvlieg F., Nienhuis B. Submarine hydrodynamics for off-design conditions // Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2022. Vol. 8. P. 499–511. <https://doi.org/10.1007/s40722-022-00261-y>.
5. Anderson B., Chapuis M., Erm L., Fureby C., Giacobello M., Henbest S., Jones D., Jones M., Kumar C., Liefvendahl M., Manovski P., Norrison D., Quick H., Snowden A., Valiyy A., Widjaja R., Woodyatt B. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form / In: 29th Symposium on naval hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26–31 August 2012.
6. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines: Thesis ... Master of Philosophy / Dawson E.; University of Tasmania. Hobart, 2014. 214 p.
7. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967, 216 с.
8. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005, 191 с.
9. Bukatov A.E., Bukatov A.A. Vibrations of a floating elastic plate upon nonlinear interaction of flexural-gravity waves // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2018. Vol. 59. P. 662–672. <https://doi.org/10.1134/S0021894418040120>.
10. Zeng L.D., Korobkin A.A., Ni B.Y., Xue Y.Z. Flexural-gravity waves in ice channel with a lead // Journal of Fluid Mechanics. 2021. 921. A10. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.335>.
11. Xiong H., Ni B., Semenov Yu., Korobkin A. Inertial motion of a circular cylinder approaching obliquely an ice cover // Scientific Reports. 2025. 19;15(1): 9412. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93435-1>.
12. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники. Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2021. № 1(42). С. 19–31.
13. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988, 288 с.
14. Mackay M.A. Review of Sting Support Interference and Some Related Issues for the Marine Dynamic Test Facility (MDTF). St. John's, Newfoundland: Defence Research Establishment Atlantic, 1993. 59 p.

15. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from Laminar to Turbulent Flow // Journal of Applied Physics. 1957. Vol. 28. P. 388–394. <https://doi.org/10.1063/1.1722760>.
16. Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. Влияние формы погруженного тела на характер его движения вблизи свободной поверхности жидкости // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. №4 (398). С. 35–42. <http://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-4-398-35-42>.
17. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах. Труды ЛКИ. 1959. Вып. 28. С. 179–185.
18. Степанюк А.И. Технологии испытаний и моделирования морского льда. Санкт-Петербург Гидрометеиздат, 2001, 78 с.
19. Lewis J.W. Recent Development in Physical Ice Modeling. Offshore Technol. Conf. Houston. Texas, 1982. Vol. 4. P. 493–498.
20. Козин В.М. Обоснование исходных данных для выбора основных параметров СВП, предназначенных для разрушения ледяного покрова резонансным способом: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1983, 314 с.
21. Земляк В.Л., Козин В.М. Экспериментальное определение влияния выступающих частей на параметры движения погруженного тела и волнообразование в ледовых условиях // Труды Крыловского государственного научного центра. 2025. № 1 (411). С. 15–23.

References

1. Divsalar K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach // Acta Mechanica Sinica. 2020. Vol. 36(1). P. 44–56. <https://doi.org/1007/s10409-019-00913-7>.
2. Groves, N.C., Huang, T.T., Chang, M.S. Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 and 5471). Bethesda, Maryland, USA: David Taylor Research Centre, 1989, 90 p.
3. Shariati S., Mousavizadegan S. The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface // Applied Ocean Research 2017. Vol. 67. P. 31–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.001>
4. Toxopeus S., Kerkvliet M., Vogels R., Quadvlieg F., Nienhuis B. Submarine hydrodynamics for off-design conditions // Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 2022. Vol. 8. P. 499–511. <https://doi.org/10.1007/s40722-022-00261-y>.
5. Anderson B., Chapuis M., Erm L., Fureby C., Giacobello M., Henbest S., Jones D., Jones M., Kumar C., Liefvendahl M., Manovski P., Norrison D., Quick H., Snowden A., Valiyy A., Widjaja R., Woodyatt B. Experimental and computational investigation of a generic conventional submarine hull form / In: 29th Symposium on naval hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, 26–31 August 2012.
6. Dawson E. An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near-surface operation of conventional submarines: Thesis ... Master of Philosophy / Dawson E.; University of Tasmania. Hobart, 2014. 214 p.
7. Kheisin D.E. Ice cover dynamics. L.: Gidrometeoizdat, 1967, 216 p.
8. Kozin V.M., Onischuk A.V., and Mar'in B.N. Ice-breaking ability of flexural-gravity waves from the movement of objects. Vladivostok: Dalnauka, 2005, 191 p.
9. Bukatov A.E., Bukatov A.A. Vibrations of a floating elastic plate upon nonlinear interaction of flexural-gravity waves // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2018. Vol. 59. P. 662–672. <https://doi.org/10.1134/S0021894418040120>.
10. Zeng L.D., Korobkin A.A., Ni B.Y., Xue Y.Z. Flexural-gravity waves in ice channel with a lead // Journal of Fluid Mechanics. 2021. 921. A10. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.335>.
11. Xiong H., Ni B., Semenov Yu., Korobkin A. Inertial motion of a circular cylinder approaching obliquely an ice cover // Scientific Reports. 2025. 19;15(1): 9412. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93435-1>.
12. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice tank of laboratory ice technology. Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem, 2021. Vol. 42. P. 19–31.
13. Voitkunsky Ya.I. Resistance to the movement of ships. L.: Shipbuilding, 1988, 288 p.
14. Mackay M.A. Review of Sting Support Interference and Some Related Issues for the Marine Dynamic Test Facility (MDTF). St. John's, Newfoundland: Defence Research Establishment Atlantic, 1993. 59 p.
15. Hama F.R., Long J.D., Hegarty J.C. On Transition from Laminar to Turbulent Flow // Journal of Applied Physics. 1957. Vol. 28. P. 388–394. <https://doi.org/10.1063/1.1722760>.
16. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S. Effect of submerged body shape upon its movement pattern near free surface // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025. Vol. 4(398). P. 35–42. <http://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-4-398-35-42>.
17. Nogid L.M. Simulation of the movement of the vessel in a continuous ice field and in broken ice. Proceedings of LCI. 1959. Issue. 28, pp. 179–185.
18. Stepanyuk A.I. Technologies for testing and modeling sea ice. St. Petersburg Hydrometeoizdat, 2001, 78 p.
19. Lewis J.W. Recent Development in Physical Ice Modeling. Offshore Technol. Conf. Houston. Texas, 1982. Vol. 4. P. 493–498.
20. Kozin V.M. Justification of the initial data for the choice of the main parameters of the hovercraft, intended for the destruction of the ice cover by the resonance method: dis. ... cand. tech. Sciences. Gorky, 1983, 314 p.
21. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Effect of appendages upon movement and wave-making parameters of submerged body in ice conditions: experimental study // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025. Vol. 1(411). P. 15–23.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Земляк Виталий Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией ледотехники, Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, 679015, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70а, e-mail: vellkom@list.ru

Козин Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского ФИЦ ДВО РАН, 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1, e-mail: vellkom@list.ru

Vitaliy I. Zemlyak, Ph.D. (Phys & Math), associate professor, chief researcher, Head of the laboratory of ice technology, Sholom-Aleichem Priamursky State University, Shirokaya, 70a, Birobidzhan, 679015, Russian Federation, e-mail: vellkom@list.ru

Victor M. Kozin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief Researcher of the Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Machine Science and Metallurgy of Khabarovsk FEB RAS, Metallurgov, 1, Komsomolsk-on-Amur St, 681005, Russian Federation, e-mail: vellkom@list.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 04.11.2025.

Научная статья

УДК 629.561.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.078>

Экспериментальное исследование влияния скорости нагружения на энергию разрушения модельного пресноводного льда

Себин А.С.¹ SebinAndrei@gmail.com, Блинов К.Д.¹ blinov.kirill@yandex.ru,Куркин А.А.¹ aakurkin@gmail.com¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, посвященных оценке значимости скорости нагружения на энергию разрушения модельного пресноводного льда. Традиционно в методах расчёта ледового сопротивления судов и при физическом моделировании этот фактор игнорируется, и процесс разрушения рассматривается в рамках квазистатического приближения. Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование необходимости учёта данного эффекта. Исследования проводились в малом ледовом опытовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева, где имитировался процесс последовательного разрушения ледяного покрова при прокладке канала судном. Скорость вертикального нагружения варьировалась в диапазоне, характерном для модельных испытаний ледоколов в опытовых бассейнах НГТУ. Установлено, что пренебрежение влиянием скорости нагружения на энергию разрушения льда приводит к существенному занижению расчётного чистого ледового сопротивления, определяемого по энергетическому методу. На примере модели речного ледокола показано, что эта недооценка является значительной как для полного сопротивления, так и, в особенности, для его составляющей, связанной непосредственно с разрушением льда. Полученные результаты обосновывают необходимость учёта влияния скорости нагружения при разработке и совершенствовании как методов расчёта ледового сопротивления, так и методов его физического моделирования.

Ключевые слова: ледяной покров, энергия разрушения, скорость нагружения, модельный лед, физическое моделирование, ледокол, прокладка канала, ледовое сопротивление

Финансирование: Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия»).

Для цитирования: Себин А.С., Блинов К.Д., Куркин А.А. Экспериментальное исследование влияния скорости нагружения на энергию разрушения модельного пресноводного льда. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 74—81. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.078

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.078>

Experimental Investigation of the Loading Rate Effect on the Breaking Energy of Model Fresh Water Ice

Andrei S. Sebin¹ SebinAndrei@gmail.com, Kirill D. Blinov¹ blinov.kirill@yandex.ru,Andrei A. Kurkin¹ aakurkin@gmail.com¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of experimental studies dedicated to assessing the significance of the loading rate on the breaking energy of model fresh water ice. Traditionally, this factor is ignored in methods for calculating ship ice resistance and in physical modeling, where the breaking process is considered within a quasi-static approach. The purpose of this work is to experimentally substantiate the necessity of accounting for this effect. The studies were conducted in the small ice model basin of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, where the process of sequential ice cover breaking during channel cutting by a ship was simulated. The vertical loading rate was varied in a range typical for model tests of icebreakers in the NNSTU ice basins. It was found that neglecting the influence of the loading rate on the ice breaking energy leads to a significant underestimation of the calculated net ice resistance determined by the energy method. Using the example of a river icebreaker model, it is shown that this underestimation is significant for both the total resistance and, especially, for its component directly related to ice breaking. The obtained results justify the need to consider the loading rate effect in the development and improvement of both methods for calculating ice resistance and methods for its physical modeling.

Key words: ice cover, breaking energy, loading rate, model ice, physical modeling, icebreaker, channel breaking, ice resistance

Financial Support: The presented results were obtained as part of the state assignment in the sphere of scientific activities (topic No. FSWE-2023-0004 "Nonlinear wave dynamics of the coastal zone under a changing climate and anthropogenic impact").

For citation: Andrei S. Sebin, Kirill D. Blinov, Andrei A. Kurkin Experimental Investigation of the Loading Rate Effect on the Breaking Energy of Model Fresh Water Ice. Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 74—81. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.078

Введение

Анализ процесса разрушения ледяного покрова под действием локализованных нагрузок является одной из ключевых задач не только в различных областях инженерной деятельности, связанных с освоением замерзающих акваторий, но и при моделировании природных явлений в морях, покрытых сплошным льдом. Энергия, затрачиваемая на этот процесс, является фундаментальным параметром, определяющим несущую способность ледяного покрова и силовое воздействие на контактирующие с ним объекты.

В классических подходах к анализу взаимодействия конструкций со льдом (например, [1–5]) процесс разрушения зачастую рассматривается в квазистатическом приближении, в котором не учитывается влияние скорости нагружения на энергию его разрушения. Однако вопрос о правомерности такого допущения и о степени влияния скоростных эффектов на итоговую величину энергозатрат требует детального экспериментального обоснования.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение степени влияния скорости нагружения на энергию разрушения модельного льда в условиях, имитирующих прокладку канала во льдах, для определения необходимости учёта данного фактора при разработке и совершенствовании физических и математических моделей процесса разрушения ледяного покрова.

1. Лабораторная установка

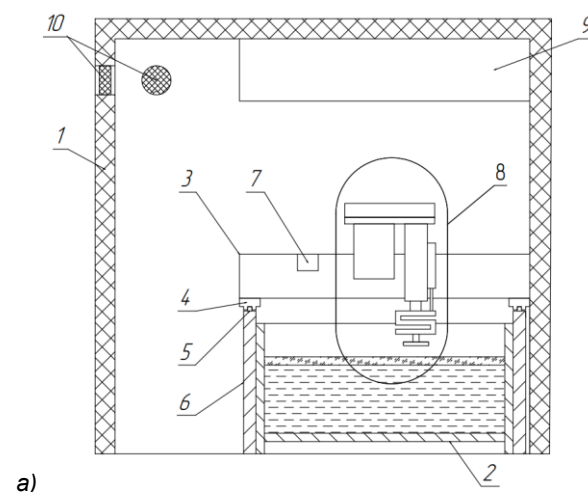
Эксперименты проводились в малом ледовом опытовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева, расположенном в термоизолированной камере с внутренними габаритами 3160×1960×2200 мм и толщиной стенок 100 мм. Чаша бассейна, имеющая размеры 2,4×1,1×0,4 м и объем 0,96 м³, была сформирована из плит экструдированного пенополистирола, размещенных внутри несущего каркаса из алюминиевого профиля. Гидроизоляция конструкции обеспечивалась полиэтиленовой плёнкой. По периметру планшера была смонтирована металлическая окантовка, предотвращающая повреждение плёнки при разрушении льда и улучшающая адгезию ледяного поля, что позволило моделировать условия бесконечного ледяного покрова для льда толщиной до 4 мм.

Поддержание заданного температурного режима внутри камеры осуществлялось холодильной установкой компрессорного типа мощностью 1,3 кВт. Данная система обеспечивала охлаждение воздуха до –25°C (без учёта теплопритока от воды). С целью формирования ледяного покрова равномерной толщины над зеркалом воды бассейна был смонтирован специальный металлический экран. Над ним установлен проточный охладитель, забор и отдача воздуха которым производятся из пространства под днищем бассейна. Такая схема применена для того, чтобы исключить возникновение воздушных потоков над поверхностью воды, что является необходимым условием для равномерного роста ледяного покрова. Намораживание происходит за счет двух механизмов

теплообмена: конвективного (между воздухом в камере и поверхностью воды) и лучистого (между поверхностью воды и охлажденным экраном), что способствует равномерности толщины ледового поля.

Контроль термодинамических параметров в ходе проведения эксперимента осуществлялся с помощью набора измерительных средств. Температура воздуха измерялась термопарами, установленными внутри охладителя и на уровне поверхности воды, а температура воды в придонном слое – с помощью термопары и спиртового термометра.

Для приложения нагрузки к ледяному покрову и регистрации его реакции применялся измерительно-нагружающий комплекс (ИНК), который в рамках подготовки к данным исследованиям подвергся существенной модернизации. Ее необходимость была обусловлена применением линейного привода с возможностью регулировки скорости нагружения, а также размещением дополнительного измерительного оборудования. Новый привод оказался значительно массивнее предыдущего, что сделало ручное перемещение прежней конструкции нецелесообразным. Принципиальная схема модернизированного комплекса приведена на рис. 1, внешний вид показан на рис. 2. В новой конфигурации ИНК (поз. 8) установлен на портале (поз. 3), который представляет собой жесткую балку, перемещающуюся по профильным направляющим (поз. 5) посредством кареток на подшипниках качения (поз. 4). Направляющие закреплены на неподвижном стальном каркасе (поз. 6), смонтированном по периметру чаши бассейна (поз. 2). Новая конструкция ИНК позволила значительно повысить общую жесткость установки, что способствовало увеличению точности измерений. Длина стальной рамы и направляющих выбрана на 300 мм больше длины зеркала воды, чтобы в процессе подготовки ледового поля портал можно было отвести за пределы бассейна, исключив его влияние на рост льда.



а)

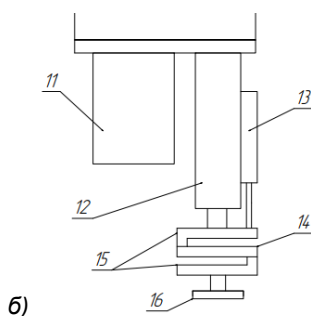


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки: а) – общая; б), 8 – измерительно-нагружающий комплекс (ИНК);

1 – теплоизолированные стенки камеры; 2 – чаша опытового бассейна; 3 – портал; 4 – каретки; 5 – профильные направляющие; 6 – каркас; 7 – коммутационная коробка; 8 – ИНК; 9 – короб системы охлаждения; 10 – отверстия с теплоизоляцией под проход кабелей; 11 – серводвигатель; 12 – модуль линейного перемещения; 13 – датчик перемещений; 14 – датчик силы; 15 – оправка датчика силы; 16 – площадка

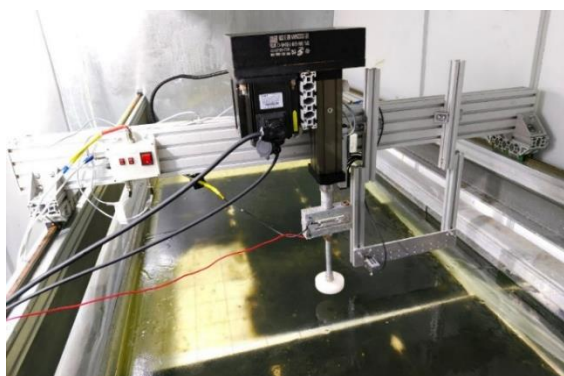


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Основу ИНК (рис. 1б) составляет линейный привод, включающий модуль линейного перемещения (поз. 12), который приводится в движение серводвигателем (поз. 11) через ременную передачу. Программное обеспечение драйвера серводвигателя обеспечивает возможность детальной настройки параметров движения штока с персонального компьютера (ПК), в частности, поддержание постоянной скорости вертикального перемещения, а также длины участков разгона и торможения. После сохранения заданных параметров в памяти драйвера, управление исполнительным механизмом в ходе эксперимента осуществляется оператором с панели, расположенной на коммутационной коробке (поз. 7). Максимальная частота вращения вала двигателя составляет 3000 об/мин, что соответствует скорости вертикального перемещения штока 0,5 м/с. Передача нагрузки на ледяной покров осуществлялась через цилиндрическую площадку (поз. 15), изготовленную из полиэтилена высокого давления, диаметром 80 мм.

Регистрация усилия реакции ледяного покрова производилась с помощью тензометрического датчика силы балочного типа (поз. 14) с пределом измерений 100 Н, установленного в специальной оправке (поз. 15). Прогиб ледяной пластины в области приложения нагрузки определялся по

данным о вертикальном перемещении штока, которое регистрировалось датчиком реостатного типа (поз. 13) с точностью 0,01 мм. Для обеспечения синхронности и точности измерений датчик был установлен параллельно модулю (поз. 12). Аналоговый сигнал с датчика силы предварительно усиливался с коэффициентом 100. Затем, совместно с сигналом от датчика перемещений, он оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с максимальной частотой дискретизации 200 кГц. Оцифрованные данные в реальном времени передавались на ПК для записи и последующей обработки.

2. Проведение экспериментов

Экспериментальные исследования проводились сериями в соответствии с методикой, апробированной в НГТУ им. Р.Е. Алексеева при работе как с модельными [6; 7], так и с натурными льдами [8]. Схема проведения опытов в рамках одной серии представлена на рис. 3. Каждая серия начиналась с опыта по разрушению сплошного, ненарушенного ледяного покрова (поз. 1). В последующих опытах (поз. 2–6) нагрузка прикладывалась к кромке, образовавшейся в результате предыдущего пролома. Таким образом, моделировался процесс последовательного разрушения льда при прокладке канала судном. Процесс разрушения льда в одном из опытов зафиксирован на кинограмме, приведённой на рис. 4.

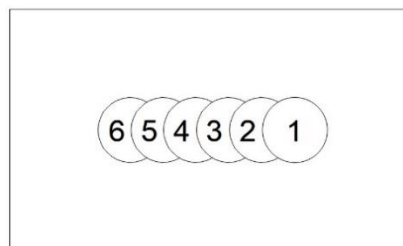
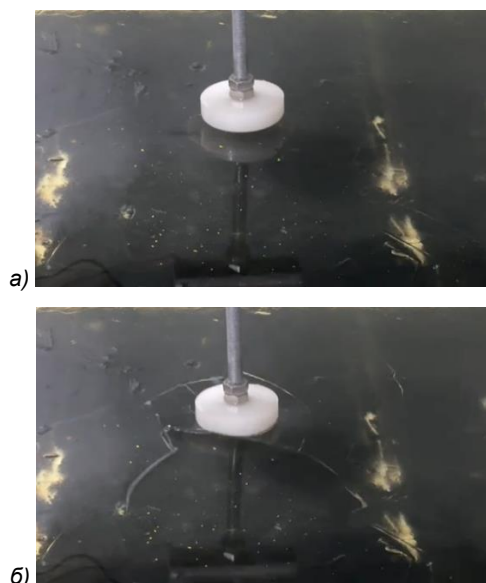


Рис. 3. Схема нагружения льда в серии опытов



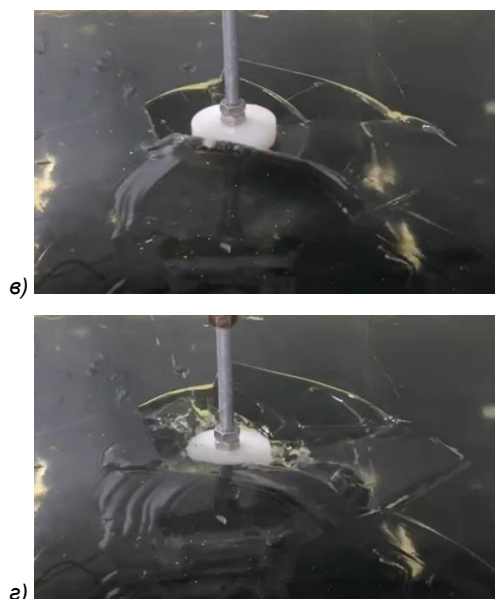


Рис. 4. Кинограмма опыта

Скорость вертикального перемещения штока ИНК варьировалась в диапазоне $V_n = 0,005 \div 0,5$ м/с. Данный диапазон соответствует характерным скоростям вертикального нагружения льда форштвенем моделей ледоколов при испытаниях в ледовом опытовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева. После каждого акта разрушения производились необходимые измерения: толщина ледяных обломков фиксировалась с помощью предварительно охлажденного пластикового штангенциркуля, а также измерялась ширина пролома.

Первичные результаты экспериментов были получены в виде синхронизированных по времени рядов силы реакции ледяного покрова и его прогиба. Последующая обработка этих данных заключалась в построении диаграмм разрушения в координатах «сила-прогиб» (рис. 5). Механическая работа, затраченная на разрушение ледяного покрова, определялась как площадь под кривой на диаграмме разрушения, определенная численно по методу трапеций. Целью настоящих исследований являлось выяснение принципиального вопроса о наличии влияния скорости нагружения на энергию разрушения льда, а также определение необходимости учёта этого фактора при анализе процесса взаимодействия ледокольных средств с ледяным покровом. В связи с этим, при планировании экспериментальной программы было решено ограничиться варьированием только скорости нагружения. В качестве целевой толщины ледяного поля было принято значение 3 мм, как технологически наиболее просто реализуемое, исходя из накопленного опыта.

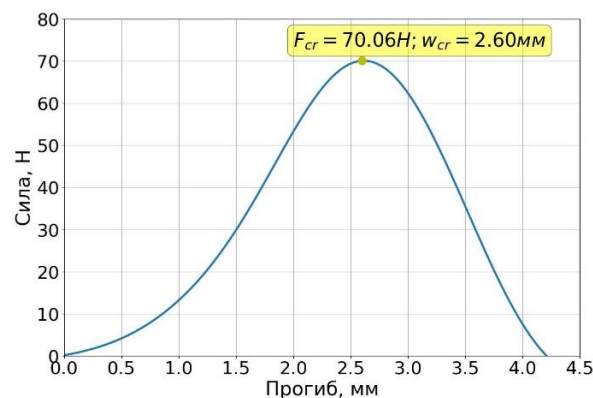


Рис. 5. Типичный вид получаемых диаграмм разрушения

Процесс намораживания льда носит стохастический характер, обусловленный изменчивостью термодинамических параметров, что привело к неизбежному разбросу толщин льда в опытах (рис. 6). Для нивелирования влияния этого фактора и обеспечения корректности сопоставления результатов была применена специальная процедура обработки данных. Проводилась проверка полученных значений энергии разрушения для каждого типа опытов (номер пролома на рис. 3) на наличие статистических выбросов, после чего экспериментальные данные аппроксимировались эмпирическим уравнением, учитывающим влияние как скорости нагружения V_n , так и толщины льда h_n :

$$A = k_1 h_n^2 + k_2 v_n^2 + k_3 h_n v_n + k_4 h_n + k_5 v_n + k_6 \quad (1)$$

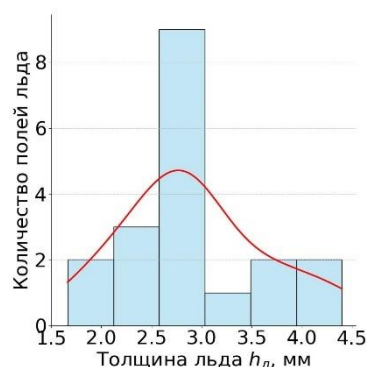


Рис. 6. Распределение толщин льда в опытах

Использование данного аппроксимирующего выражения позволило исключить влияние вариации толщины и получить искомую зависимость энергии разрушения от скорости нагружения $A = f(v_n)$ для нормированной толщины льда, принятой равной её математическому ожиданию ($M[h_n] = 2,92$ мм, $M[h_n^2] = 9,03$ мм²). Итоговые зависимости представлены на рис. 7а.

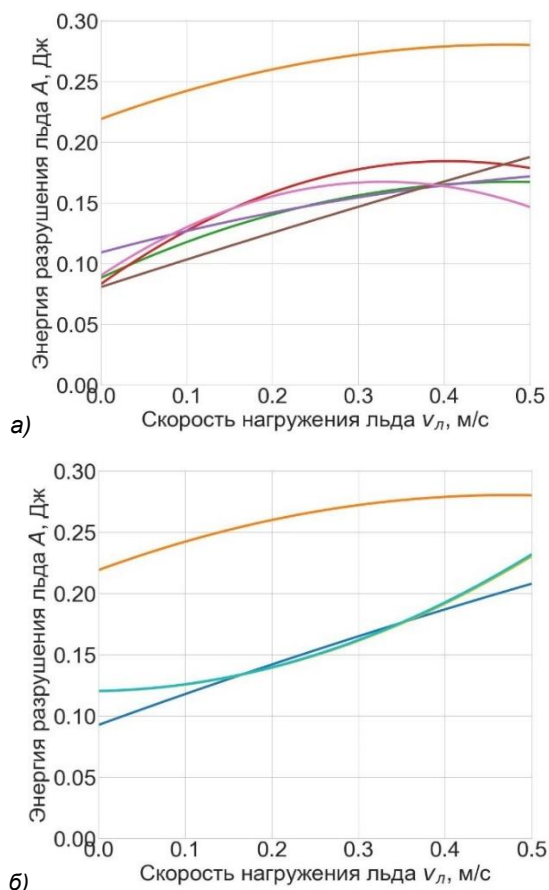


Рис. 7. Зависимость энергии разрушения льда толщиной 2,92 мм от скорости нагружения, полученная в следующих типах опытов: — 1П – пролом сплошного ледового поля, поз. 1 на рис. 3; — 2К, — 3К, — 4К, — 5К, — 6К – серия последовательных опытов, имитирующих прокладку канала судном во льдах, поз. 2-6 на рис. 3 соответственно; — K – совокупность всех опытов, имитирующих прокладку канала судном во льдах, поз. 2-6 на рис. 3; — K(-2) и — K(-2,3) – совокупность всех опытов, имитирующих прокладку канала, кроме поз. 2 и поз. 2-3 с рис. 3 соответственно

3. Анализ результатов

Анализ зависимостей, представленных на рис. 7а, позволяет разделить полученные кривые на две характерные группы. Первая группа представлена единственной кривой, соответствующей типу опытов — 1П, в котором осуществлялся пролом сплошного, ненарушенного ледяного покрова. Ко второй группе относятся все остальные кривые (2К–6К), имитирующие последовательную прокладку канала. Наибольшие энергетические затраты на разрушение соответствуют типу опытов 1П. Энергия разрушения во всех последующих типах опытов, имитирующих прокладку канала, оказывается существенно ниже. Соответствующие им кривые располагаются в относительно узком диапазоне значений, что свидетельствует о незначительных различиях в величине работы разрушения в процессе прокладки канала по сравнению с первым опытом.

Несмотря на то, что кривые, относящиеся к опытам, имитирующим прокладку канала во льдах

(2К–6К), пересекаются между собой и не демонстрируют строгой последовательности, на графике они располагаются плотной группой. Для оценки однородности этих данных и обоснования возможности их совместного использования был проведён дополнительный анализ (рис. 7б). Были построены усреднённые кривые, аппроксимирующие следующие наборы данных:

— K – совокупность всех опытов, имитирующих прокладку канала (т.е. поз. 2-6 на рис. 3), $r^2 = 0,677$;

— K(-2) – та же совокупность, но без учёта опытов № 2 (т.е. поз. 3-6 на рис. 3), $r^2 = 0,888$;

— K(-2,3) – та же совокупность, но без учёта опытов № 2 и 3 (т.е. поз. 4-6 на рис. 3), $r^2 = 0,903$.

Результаты показывают, что по мере исключения данных, полученных в первых опытах каждой серии, коэффициент детерминации аппроксимирующего выражения возрастает. Наибольшее увеличение достигается при исключении опытов с номером 2 в серии, что, по-видимому, обусловлено влиянием кромки, противоположной от нагружаемой, образовавшейся после первого пролома. По мере дальнейшего продвижения это влияние ослабевает. Начиная с четвёртого опыта в серии, когда влияние начальных условий прокладки канала минимизируется, зависимость энергии разрушения от скорости нагружения приобретает устойчивый характер, что подтверждается стабилизацией коэффициента детерминации аппроксимирующей кривой при дальнейшем исключении данных. При этом не наблюдается какой-либо цикличности. Таким образом, для дальнейших расчётов принимается следующее выражение, характеризующее энергию разрушения ледяного покрова при установившемся процессе прокладки канала:

$$A_{K(-2,3)} = 0,422v_n^2 + 0,012v_n + 0,12 \quad (2)$$

Поскольку конечной целью подобного рода исследований является повышение эффективности ледокольных средств, необходимо оценить значимость влияния скорости нагружения на итоговое ледовое сопротивление. Это позволит определить целесообразность учёта данного фактора при физическом и математическом моделировании, либо возможность рассмотрения процесса как квазистатического во всём диапазоне скоростей движения судна.

Для решения этой задачи был выполнен расчёт применительно к модели речного ледокола проекта 16 (масштаб 1:35), буксируемой в модельном пресноводном льду толщиной, соответствующей графикам (рис. 7). Был использован предложенный в [9] метод, который является адаптированным для анализа результатов модельных испытаний в пресноводном льду методом определения чистого ледового сопротивления речных ледоколов [1]. Его отличие заключается в исключении некоторых компонент, имеющих место в натурном процессе, но отсутствующих в модельном эксперименте, а также в явном задании значения энергии разрушения ледяного покрова, получаемого из опытов по схемам, аналогичным приведённой на рис. 3. В данном случае целью является оценка степени влияния скорости нагружения льда на итоговую величину

чистого ледового сопротивления, поэтому, в отличие от подхода, изложенного в [9], для расчёта возьмём только лишь теоретические компоненты формулы, а эмпирические коэффициенты опустим. Тогда чистое ледовое сопротивление модели ($R_{чл}$) определяется как сумма компонент:

$$R_{чл} = R_p + R_{обл} = R_p + R_{обл}^{cm} + R_{обл}^{ck}, \quad (3)$$

$$R_p = \alpha A_{zф} \left[(1 + f \gamma_{лмф}) + 0,33(1 + f \Phi_{лм}) B \alpha \right] \times (1 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1ф}), \quad (4)$$

$$R_{обл}^{cm} = (\rho_e - \rho_n) g h_n \Omega_n (\Phi_n + f \Phi_{nm}), \quad (5)$$

$$R_{обл}^{ck} = \rho_n h_n B V^2 \left[\left(1 + \frac{0,19}{(0,215 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1ф})} \frac{\rho_e}{\rho_n} \frac{1}{\alpha h_n} \right) \times \left(\Phi_u + f \Phi_{um} \right) + \frac{2 \rho_e}{\rho_n} \frac{\Omega_n}{B h_n} (\Phi_e + f \Phi_{em}) \right], \quad (6)$$

где R_p – сопротивления разрушению льда; $R_{обл}$ – сопротивление обломков движению судна; $R_{обл}^{cm}$ и $R_{обл}^{ck}$ – статическая и скоростная составляющие сопротивления обломков; $\rho_e = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_n = 920 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды и льда; $f = 0,015$ – коэффициент трения льда по поверхности модели [10]; $h_n = 2,92 \times 10^{-3} \text{ м}$ – толщина льда; V_m – скорость движения модели судна; $Fr_h = V_m / \sqrt{g h_n}$ – число Фруда по толщине льда; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $\alpha = \sqrt[4]{\rho_e g / D}$ – параметр изгиба пластины на упругом основании; $D = E h_n^3 / 12(1 - \mu^2)$ – цилиндрическая жёсткость ледяной пластины; $E = 6 \times 10^9 \text{ Па}$ – модуль упругости льда [1]; $\mu = 0,345$ – коэффициент Пуассона льда [1]; $B = 0,33 \text{ м}$ – ширина модели судна по КВЛ; Ω_n – площадь поверхности «ледовой рубашки»; $\varphi_{1ф} = 28^\circ$ – угол наклона форштевня ледокола к горизонту в районе КВЛ; $\gamma_{лмф}$, $\Phi_{лм}$, Φ_n , Φ_{nm} , Φ_u , Φ_{um} , Φ_e , Φ_{em} – функции формы, определяемые по [9] суммированием направляющих косинусов рассматриваемой судовой поверхности; $A_{zф}$ – работа по разрушению сплошного льда, совершаемая в районе форштевня, в расчётах её значение принимается равным энергии, полученной для установившегося процесса прокладки канала, т.е. по выражению (2), соответствующему кривой K(-2,3) на рис. 76, ($A_{zф} = A_{K(-2,3)}$).

Скорость движения модели V_m и скорость нагружения льда форштевнем V_n связаны следующим соотношением:

$$V_m = \frac{V_n}{\operatorname{tg} \varphi_{1ф}} \quad (7)$$

На рис. 8 представлены зависимости компонент чистого ледового сопротивления (3) от скорости

движения модели, рассчитанные для диапазона скоростей нагружения льда, исследованного в экспериментах ($V_n = 0,005 \div 0,5 \text{ м/с}$). Для сравнительного анализа влияния скорости на величину на этом же рисунке приведены зависимости $R_p^{V_n=0}$ и $R_{чл}^{V_n=0}$, полученные в квазистатическом приближении, то есть при энергии разрушения, соответствующей $V_n = 0$, т.е. при $A_{zф} = A_{K(-2,3)}(V_n = 0) = 0,12 \text{ Н}$.

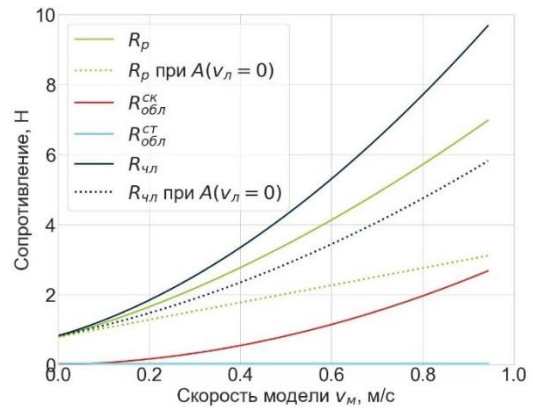


Рис. 8 – Зависимость компонент чистого ледового сопротивления модели ледокола пр. 16, буксируемой в пресноводном льду толщиной 2,92 мм от скорости движения

Анализ полученных кривых показывает, что учёт зависимости энергии разрушения от скорости нагружения приводит к существенному увеличению расчётного ледового сопротивления. Для количественной оценки этого эффекта была рассчитана относительная надбавка к сопротивлению, определяемая по выражениям:

$$\Delta R_{чл} = \frac{R_{чл} - R_{чл}^{V_n=0}}{R_{чл}^{V_n=0}} \times 100\%; \quad (8)$$

$$\Delta R_p = \frac{R_p - R_p^{V_n=0}}{R_p^{V_n=0}} \times 100\%.$$

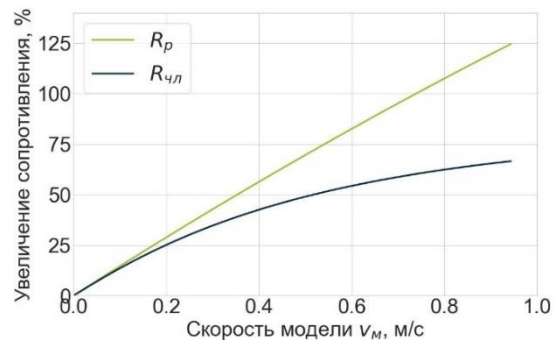


Рис. 9. Относительное увеличение сопротивления разрушению льда (R_p) и чистого ледового сопротивления ($R_{чл}$) за счёт учёта влияния скорости нагружения льда

Из графика на рис. 9 следует, что пренебрежение влиянием скорости нагружения на энергию разрушения льда в рамках рассматриваемого

подхода (3)-(6) приводит к значительному занижению расчётных значений сопротивления. Так, занижение значения компоненты R_p на максимальных скоростях превышает 100%, в то время как для чистого ледового сопротивления R_{chl} оно достигает примерно 65%. Меньшее значение для R_{chl} обусловлено вкладом других компонент (R_{obl}^{cm} и R_{obl}^{ck}), которые в данной методике не зависят от энергии разрушения.

Заключение

Экспериментально установлена значимость влияния скорости нагружения на энергию разрушения модельного пресноводного льда в условиях, имитирующих прокладку канала судном. Выполнена оценка практической значимости этого эффекта, показавшая, что квазистатический подход

(игнорирующий данный эффект) при расчёте чистого ледового сопротивления по энергетическому методу приводит к его существенной недооценке. На примере модели ледокола проекта 16 показано, что эта недооценка, относительно значения, полученного в квазистатическом приближении, может достигать 65% для полного сопротивления и превышать 100% для его составляющей, отвечающей за разрушение льда. Полученные выводы позволяют определить, что дальнейшие исследования в этой области целесообразно направить на изучение зависимости энергии разрушения ледяного покрова от скорости нагружения льда для широкого диапазона его толщин, а также для различных типов модельного льда, в частности, для композитной модели ледяного покрова, что является необходимым для повышения точности и надёжности как расчётных методик оценки ледового сопротивления, так и методов его физического моделирования.

Литература

1. Ионов Б. П. Ледовая ходкость судов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. – СПб. : Судостроение, 2001. – 512 с.
2. Зуев В. А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В. А. Зуев. – Л. : Судостроение, 1986. – 207 с.
3. Каштелян В. И. Сопротивление льда движению судна / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. – Л. : Судостроение, 1968. – 239 с.
4. Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships / G. Lindqvist // The 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. – Luleå, Sweden : Department of Civil Engineering Luleå University of Technology, 1989. – Т. 2. – С. 722-735.
5. Performance of Merchant Vessels in Ice in the Baltic / K. Riska, M. Wilhelmson, K. Englund, T. Leiviskä. – Espoo, Finland : Ship Laboratory, Helsinki University of Technology, 1997.
6. Себин А. С. Исследование композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм / А. С. Себин, К. Д. Блинов, Ю. А. Двойченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3 часть 3. – С. 94-105.
7. Определение физико-механических свойств различных моделей ледяного покрова во время проведения испытаний / Е. М. Грамузов, Н. В. Калинина, К. Д. Блинов, А. А. Куркин // Инженерная физика. – 2024. – № 11. – С. 12-19.
8. Зуев В. А. Разрушение ледяного покрова / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Ю. А. Двойченко. – Горький : НТО им. акад. А. Н. Крылова, Волжско-Камское МОП, 1989. – 86 с.
9. Грамузов Е. М. Использование энергетического подхода для расчетного метода ледового сопротивления с использованием данных модельных испытаний в пресном льду / Е. М. Грамузов, Н. В. Калинина, К. Д. Блинов // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4 часть 3. – С. 34-43.
10. Определение сопротивления речного ледокола с использованием энергетического подхода на основе экспериментов в модельном льду композитной конструкции / К. Д. Блинов, В. Д. Марченко, И. Е. Курганская, К. С. Васильев // Транспортные системы. – 2025. – № 1 (35). – С. 29-39.

References

1. Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ledovaja hodkost' sudov [Iceworthiness of Ships]. SPb., Sudostroenie, 2001. 512 p.
2. Zuev V. A. Sredstva prodlenija navigacii na vnutrennih vodnyh putjah [Navigation extension means for inland waterways]. L.: Sudostroenie, 1986. 207 p.
3. Kashteljan V. I., Poznjak I. I., Rylvlin A. Y. Soprotivlenie l'da dvizheniju sudna [Ice resistance to ship motion]. L.: Sudostroenie, 1968. – 239 p.
4. Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. The 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Luleå, Sweden: Department of Civil Engineering Luleå University of Technology, 1989. Vol. 2. P. 722-735.
5. Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviskä T. Performance of Merchant Vessels in Ice in the Baltic. Espoo, Finland: Ship Laboratory, Helsinki University of Technology, 1997.
6. Andrei S. Sebin, Kirill D. Blinov, Yuri A. Dvoichenko The investigation of a composite model of the ice cover (GP-ice) composed of a single layer of spherical granules with a diameter of 20 mm. Marine intellectual technologies. 2023. No. 3 part 3, P. 94-105.
7. Gramuzov E. M., Kalinina N. V., Blinov K. D., Kurkin A. A. Determination of physical and mechanical properties of various ice cover models during testing. Engineering Physics. 2024. No. 11. P. 12-19.
8. Zuev V. A., Gramuzov E. M., Dvojchenko Y. A. Razrushenie ledjanogo pokrova [Ice cover destruction]. Gorky: NTO im. akad. A. N. Krylova, Volzhsko-Kamskoe MOP, 1989. 86 p.

9. Evgeniy M. Gramuzov, Nadezhda V. Kalinina, Kirill D. Blinov, Andrey A. Kurkin The use of an energy approach for the calculation method of ice resistance using model test data in fresh ice. Marine intellectual technologies. 2024. No. 4 part 3, P. 34-43.
10. Blinov K. D., Marchenko V. D., Kurganskaja I. E., Vasilyev K. S. Determination of river icebreaker resistance using the energy approach based on model ice experiments with a composite structure. Transport systems. 2025. No. 1 (35). P. 29-39.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Себин Андрей Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: SebinAndrei@gmail.com

Andrei S. Sebin, Senior Lecturer at the Department of Shipbuilding and Aviation Technology of the Nizhny Novgorod State Technical University, n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: SebinAndrei@gmail.com

Блинов Кирилл Дмитриевич, аспирант кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Kirill D. Blinov, graduate student at the Department of Shipbuilding and Aviation Technology of the Nizhny Novgorod State Technical University, n.a. R.E. Alekseev, Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: blinov.kirill@yandex.ru

Куркин Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор РАН, заведующий кафедрой «Прикладная математика», проректор по научной работе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: aakurkin@gmail.com

Andrei A. Kurkin, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Applied Mathematics, Vice-Rector for Scientific Work, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: aakurkin@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 05.11.2025.

Научная статья

УДК 626.01; 627.22

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.079>

Нерешенные проблемы ледовой ходкости судов

Сазонов К.Е.^{1,2} kirsaz@rambler.ru, Добродеев А.А.^{1,2} A_Dobrodeev@ksrc.ru¹Крыловский государственный научный центр, ²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматривается ряд проблем ледовой ходкости судов, которые до настоящего момента не получили общепринятого разрешения. В своей практической деятельности специалисты в области морской ледотехники научились с ними как-то обходиться, не обращая внимание на то, что, по сути, до конца не понимают физическую природу этих явлений. В работе речь идет о влиянии снежного покрова на ледовое сопротивление судна, о снижении этого сопротивления при движении судна кормой вперед и о выборе значения коэффициента трения льда об обшивку корпуса судна. В работе кратко описаны подходы к определению влияния снега на ледовое сопротивление, предлагается проведение качественного эксперимента, который мог бы подтвердить или опровергнуть одну из гипотез. Рассмотрены также различные объяснения снижения ледового сопротивления при движении судна в сплошных льдах кормой вперед. Высказано предположение о значительном влиянии режима работы движителя на ходкость судна задним ходом. При рассмотрении проблемы трения указано, что до сих пор не имеется подтверждения критерия моделирования, связанного с трением льда. Показано, что в настоящее время появилась техническая возможность выполнения соответствующих исследований.

Ключевые слова: ледовая ходкость, ледовое сопротивление, снежный покров, движение кормой вперед, движитель, взаимодействие гребного винта со льдом, трение льда об обшивку корпуса, коэффициент трения.

Финансирование: 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/>.

Для цитирования: Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Нерешенные проблемы ледовой ходкости судов, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 82—87. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.079

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.079>

Outstanding issues concerning ships ice performance

Kirill E. Sazonov^{1,2} kirsaz@rambler.ru, Aleksei A. Dobrodeev^{1,2} A_Dobrodeev@ksrc.ru¹ Krylov State Research Centre, ² St. Petersburg state marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The paper addresses a number of problems related to the ship propulsion in ice conditions, which until now have not been resolved in a generally accepted way. Ice technology experts have learned to deal with these issues in their practice paying no attention that essentially they are not fully aware of the physical nature of these phenomena. The paper considers effects of snow cover on ice resistance of ships, reduction of this resistance in case of stern-first operation, and on the choice of the hull skin ice friction coefficient. The work briefly describes approaches to defining the snow cover effects on ice resistance and suggests a qualitative experiment to confirm or refute one of assumptions. Also, different explanations of ice resistance reduction at stern-first operation in solid ice are considered. It is presumed that ship propulsion in astern running conditions is significantly dependent on propeller operation modes. Regarding the friction problem it is indicated that so far there is no confirmed modeling criterion related to ice friction. It is shown that at present suitable research studies in this field are technically feasible.

Key words: ice propulsion, ice resistance, snow cover, stern-first operation, propeller, ice/propeller interaction, ice friction against hull skin, friction coefficient.

Financial Support: This study was funded by Russian Science Foundation grant No. 23-19-00039, "Theoretical fundamentals and applied tools for AI-based fleet operation planning and decision-making in Arctic ship traffic", <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>

Для цитирования: Kirill E. Sazonov, Aleksei A. Dobrodeev Outstanding issues concerning ships ice performance, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 82—87. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.079

Введение

Давно известно, что в развитии любой науки можно выделить два основных фактора. Это ответы на запросы практической жизни, и внутренняя логика развития научного направления. В различных науках важность влияния этих факторов может иметь кардинальные различия. Технические науки в целом,

и морская ледотехника в частности, главенствующим фактором своего развития имеют практическую деятельность человека. Тем не менее, в прогрессе этих наук внутренняя логика развития также играет важную роль.

Особенностью развития технических наук можно считать их направленность на получение необходимого для практики результата «любой ценой». Это утверждение не следует рассматривать

как возможность передачи заказчику каких угодно результатов. В нашем понимании выражение «любой ценой» должно трактоваться, как разумное и обдуманное отступление от принятых в фундаментальных науках норм научной строгости и обоснованности. В исследовательской инженерной работе возможны эмпирические обобщения на основании весьма ограниченной и разнородной выборки. В этом случае очень велика роль опыта и интуиции исследователя, что, в какой-то мере, сближает технические науки с искусством.

Все сказанное относится и к морской ледотехнике и ее части – ледовой ходкости судов. Влияние внутренней логики развития проявляется в этой области знаний в необходимости объяснить и понять некоторые положения, которыми мы успешно пользуемся, найдя их решение на эмпирическом, редко полуэмпирическом уровне.

В дальнейшем речь пойдет о таких проблемах ледовой ходкости судов, о которых мы многое знаем, привыкли с ними как-то обходиться, не обращая внимание на то, что, по сути, мы не понимаем, что же происходит. Это влияние снежного покрова на ледовое сопротивление судна, снижение этого сопротивления при движении судна во льдах кормой вперед и проблема трения льда об обшивку корпуса.

1. Как снег влияет на движение судна во льдах?

О том, что снежный покров на поверхности льда (рис.1) оказывает влияние на характеристики движения судна указывали еще первые исследователи ледовых качеств судов (Р.И. Рунберг, В.И. Афанасьев, В.И. Арнольд-Алябьев и др.). За рубежом исследования влияния снега на ледовую ходкость начались с работы [1], опубликованной в 1982 г.



Рис. 1 – Снежный покров на поверхности ровного льда

Из-за того, что в XX в. плавание во льдах наиболее активно развивалось в СССР, большое количество исследований в этом направлении было сделано в нашей стране. На конференции 2024 г. нами был сделан доклад на эту тему [2], в котором эти исследования были рассмотрены. Здесь же необходимо отметить, что эти исследования носили характер накопления и обобщения эмпирической информации. Большинство авторов, рассматривавших проблему влияния толщины снежного покрова на ледовое сопротивление судна, считали, что увеличение сопротивления происходит за счет возрастания сил трения между льдом со снегом и корпусом. При этом часто считалось, что это

возрастание обусловлено из-за большего значения коэффициента трения снега об обшивку. Однако имеющиеся экспериментальные данные не подтверждают это предположение. Основным результатом заключался в введении понятия приведенной толщины h'_I льда и некоего эмпирического коэффициента k , на который необходимо помножить толщину снега h_s для нахождения эквивалентной толщины $h'_I = h_I + kh_s$.

В подавляющем большинстве работ анализируется влияние различных факторов на коэффициент k . Большой вклад в развитие этого направления внесли работы Е.М. Грамузова с соавторами [3-5]. Им были рассмотрены различные физические процессы [3], которые происходят при взаимодействии носовой оконечности судна с ледяным покровом, покрытым слоем снега. При этом был получен вывод, что из рассмотренных процессов не мог объяснить наблюдаемые в натурных условиях эффекты.

Одним из авторов этой работы был предложен гидростатический механизм, объясняющий влияние снежного покрова на ледовое сопротивление судна [6]. Особенностью этого механизма является то, что для описания наблюдаемых эффектов он не требует увеличения величины коэффициента трения снега об обшивку. Его действие основано на действии силы «присоса», хорошо известной в теории судоподъема. Эта сила возникает из-за того, что в зонах плотного контакта льдины с судовой поверхностью нарушается баланс гидростатических давлений на разные стороны льдины, который характерен для создания силы Архимеда. В такой ситуации прижимающая льдину к корпусу сила или ее проекция может оказаться намного больше обычной силы плавучести. Наличие снега на поверхности притопленных корпусом льдин способствует возникновению такой ситуации.

Описанный выше механизм в настоящее время является гипотетическим, он не прошел еще даже качественную экспериментальную проверку из-за того, что модельный эксперимент со снегом очень сложный [2]. Тем не менее, авторы рискнут предложить коллегам провести качественный эксперимент, который мог опровергнуть или подтвердить эту гипотезу. По нашему мнению, для этого подошел бы один из существующих небольших ледовых бассейнов.

В предполагаемом эксперименте сплоченный разрушенный ледяной покров можно было бы создать парафиновыми льдинками, к одной из поверхности которых был бы прикреплен слой поролона, имитирующего снежный покров. В эксперименте сравнивается сопротивление буксируемой модели в битых сплоченных парафиновых льдах ($\approx 8-10$ баллов) с сопротивлением в парафиновых льдах с поролоном. Это основная идея опыта. На самом деле ясно, что при его реализации возникнет ряд вопросов, однако, их пока не принято решение о проведении опыта нет смысла обсуждать.

Заканчивая рассмотрение проблемы влияния снега на характеристики ледовой ходкости необходимо еще раз подчеркнуть ее важность и

выразить надежду, что проблема будет успешно разрешена.

2. Ледовое сопротивление при движении кормой вперед

Вторая проблема, которая рассматривается в данной работе относится к вопросу об определении ледового сопротивления судна, движущегося во льдах кормой вперед.

Улучшение параметров ледовой ходкости судна при движении во льдах кормой вперед было известно еще в конце XIX в (об этом в частности писал Р.И. Рунеберг [7]). Следует отметить, что общее увлечение в это время ледоколами «американского типа» (с носовым винтом) не связано с желанием улучшить показатели ледовой ходкости.

Практически до конца XX в. движение судна кормой вперед использовалось лишь периодически, о чем свидетельствуют немногочисленные публикации (например, [8]). Оно никогда не рассматривалось как основной режим движения. Можно предположить, что это было связано с практическим отсутствием возможности управления судном, а также с большой вероятностью поломки движителей.

Ситуация резко изменилась на рубеже веков, в связи с внедрением на ледоколах и судах ледового плавания винто-рулевых колонок (ВРК). Финскими специалистами была разработана концепция судов двойного действия (DAS) [9], в соответствие с которой судно во льдах должно двигаться кормой вперед, а на чистой воде осуществлять обычное движение. Полностью концепция DAS практически оказалась не реализуемой, поскольку оптимальный гидродинамический нос судна (часто снабженный бульбом) не позволял ему при движении во льдах эффективно выполнять маневры.

В настоящее время требования по ледопроеходимости на заднем ходу формулируются в технических заданиях на все ледоколы и суда ледового плавания, оборудованные ВРК. В технических заданиях на суда с традиционным движительным комплексом также очень часто выставляются требования к ледопроеходимости на заднем ходу, что не может не вызывать недоумение и сомнение в технической компетентности составителей задания. Движение кормой вперед сейчас рассматривается как один из основных режимов движения судна во льдах. Причем такой маневр может эффективно применяться не только при преодолении сплошных льдов, но и при движении судна по каналу, проложенному ледоколом [10].

На наш взгляд, нерешенной проблемой ледовой ходкости судов является объяснение феномена эффективности движения задним ходом во льдах. В разные годы предлагалось большое количество вариантов такого объяснения. Это уменьшенный по сравнению с форштевнем угол наклона ахтерштевня; создание под неразрушенным ледяным покровом разряжения из-за работы движителя, которое может способствовать снижению усилий, разрушающих лед; омывающее действие струй от движителя, сбрасывающее «ледовую рубашку» с подводной части корпуса; и др. Все перечисленные выше факторы, несомненно, приводят к снижению ледового сопротивления судна. Однако любой из них

и, даже, их совокупность не могут объяснить наблюдаемый эффект.

Складывается впечатление, что основной вклад в повышение показателей ледовой ходкости на заднем ходу вносит какой-то другой фактор, влияние которого ранее не рассматривалось. По нашему мнению, таким фактором могут быть специфические условия работы движителей на заднем ходу. Под специфическими условиями мы понимаем особенности взаимодействия гребного винта со льдом.

Можно считать установленным, что при взаимодействии движителя со льдом помимо возникновения ледового момента, препятствующего вращению движителя, возникает также ледовый упор [11]. Его изучению до сих пор не уделялось должного внимания, т.к. исследователи были сосредоточены на изучении ледового момента, знание которого необходимо для правильного проектирования валопиней, двигателей и систем автоматического управления [12].

Можно указать ряд косвенных свидетельств в пользу гипотезы о существенном вкладе взаимодействий движителя со льдом в повышение ходовых характеристик судна во льдах на заднем ходу.

1. Отсутствие указаний в имеющейся литературе о повышенных характеристиках ледовой ходкости у ледоколов, оборудованных носовыми гребными винтами. Это можно объяснить тем, что из-за особенностей носовой оконечности этих ледоколов носовые винты относительно редко взаимодействуют со льдом и не создают ледового упора.

2. Исследованиями установлено [13], что при сравнении переднего и заднего хода во льдах движение носом эффективно в относительно тонких

льдах до некоторой толщины h^* (≈ 1.5 м). В более толстых льдах выгоднее двигаться кормой вперед. При увеличении толщины льда заметно возрастает частота и продолжительность взаимодействия движителя с притопленным льдом. Следовательно, ледовый упор должен возрастать.

Приведенные выше косвенные подтверждения не могут установить истину. Для ее установления необходимо проведение весьма серьезных экспериментальных и теоретических исследований.

3. Трение льда об обшивку корпуса судна

Важность изучения трения льда о корпус судна была осознана еще в 30-х годах прошлого века. Тогда же В.И. Арнольд-Алябьевым были выполнены первые экспериментальные исследования [14]. Актуальность изучения трения возросла после создания Ю.А. Шиманским и Л.М. Ногидом теории моделирования движения судов во льдах [15], которая используется во всех ледовых бассейнах мира.

В соответствии с этой теорией в коэффициент трения льда о корпус судна должен быть одинаковым в модельных и натурных условиях. Это обстоятельство потребовало разработки методики определения коэффициента трения льда при проведении модельных ледовых испытаний. Такие методики были разработаны и являются рекомендованными Ледовым комитетом МКОБ для

применения во всех ледовых бассейнах [16], они основываются на измерении силы, необходимой для буксировки куска льда по исследуемой поверхности. При этом кусок льда дополнительно нагружается известными по величине грузами. На рис.1 представлена фотография определения коэффициента льда в ледовом бассейне КГНЦ. Естественно, что при проведении таких испытаний в условиях ледового бассейна невозможно исследовать трение при высоких давлениях, сопоставимых с пределом прочности льда на сжатие. Возникает вопрос как соотносятся значения коэффициента трения, полученные в условиях ледового бассейна, и реализующиеся при движении судна в реальных ледовых условиях.



Рис.1 Измерение коэффициента трения льда об обшивку модели

Во второй половине прошлого века сотрудниками ААНИИ был выполнен ряд интересных исследований [17,18], в которых была предпринята попытка исследования трения льда в натурных условиях. Эксперименты проводились на льду Ладожского озера и в Арктике в бухте Тикси. Из этих экспериментов следовало, что коэффициент трения по стали, имеющей различную шероховатость поверхности лежит в диапазоне от 0,02 до 0,15. При проведении экспериментов максимальное давление на лед не превышало 23 кПа, что очень далеко от давлений, возникающих при контакте борта судна со льдом. Кроме этого для определения усилия, необходимого для буксировки льда применялась весьма грубая измерительная техника. Тем не менее, полученные результаты до сих пор используются, по крайней мере, в российской практике. В этих же пределах лежат значения коэффициента трения, получаемые по измерениям в ледовых бассейнах.



Рис.2 Испытательный стенд ДВФУ [19].

Возможность измерения коэффициента трения льда при более высоких давлениях до настоящего времени ограничивалась техническими трудностями. Теме не менее, сейчас имеется потенциальная возможность выполнения таких экспериментов. Необходимая экспериментальная техника была создана для решения задач морской ледотехники по изучению истирающего действия льда на бетонные опоры инженерных сооружений, предназначенных для освоения шельфа замерзающих морей [19].

В нашей стране в Дальневосточном федеральном университете (ДВФУ) имеется такая установка, на которой можно создавать давления на контакте со льдом в диапазоне $(0,5 \div 5,5) \times 10^6 \pm 2\%$ Па [19]. При этом имеется возможность измерения касательной силы. На этой экспериментальной установке возможно проведение экспериментов по исследованию коэффициента трения льда в условиях, характерных для движения судна во льдах: при смятии кромки льда в процессах его разрушения и поворота образовавшихся обломков, а также при движении притопленных обломков вдоль корпуса судна, когда трение определяется силами плавучести льда. Выполнение таких исследований могло бы либо подтвердить сложившуюся практику проведения модельных испытаний в ледовом бассейне, либо получить необходимые данные для ее корректировки.

Заключение

Возвращаясь к введению, можно сказать, что рассмотренные в работе проблемы генерированы внутренней логикой развития ледовой ходкости судов. Формально мы умеем их решать так, чтобы удовлетворить сегодняшние запросы практики, не до конца понимая, что мы делаем.

В указанном обстоятельстве кроется наибольшая трудность решения этих проблем. Нельзя указать профит, который мы получим от их решения, он, скорее всего, не может быть реализован в создании новой конструкции или в существенном улучшении показателей уже существующих. Хотя, очевидно, что ясное понимание происходящих процессов будет способствовать дальнейшему развитию ледовой ходкости и всей морской ледотехники. Вполне возможно, что это приведет к появлению новых революционных идей.

Но, мы вынуждены констатировать, что в настоящее время в области технических наук подобные исследования практически не финансируются. Реально у нас остается лишь путь постепенного накопления данных и фактов, получаемых урывками в процессе выполнения работ по обеспечению текущего проектирования. Возможно нам повезет, и мы, даже в таких условиях, сможем найти решение этих важных проблем.

Литература

1. Bulat V. The effect of snow on ice resistance. // Naval Architect. November 1982. E253.
2. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Влияние характеристик снежного покрова на ледовое сопротивление судов. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. № S1. С. 15-22.
3. Грамузов Е.М. Сопротивление снега при движении ледокола // Проектирование средств продления навигации: межвуз. сборник. Горький : Горьков. политехн. ин-т, 1986. С. 59–71.
4. Грамузов Е.М., Тихонова Н.Е. Метод учета влияния снега на сопротивление ледокола за счет приведенной толщины сплошного ледяного покрова // Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 4(91). С. 178–183
5. Грамузов Е.М., Ионов Б.П., Тихонова Н.Е. Учет снега при определении приведенной толщины ледяного покрова. / Морской вестник. 2017. № 2 (62). С. 112-113.
6. Сазонов К.Е. О возможном механизме влияния снежного покрова на ледовое сопротивление судов. // Полярная механика. 2016. № 3. С. 417-427
7. Сазонов К.Е. Зарождение теории ледоколов: Роберт Рунеберг. // Судостроение. 2022. № 6 (865). С. 65-72.
8. Игнатьев М.А. Гребные винты судов ледового плавания. Л.: Судостроение, 1966. 114 с.
9. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Как изменилось судоходство в Арктике в XXI веке. // Природа. 2022. № 11 (1287). С. 10-21. DOI: 10.7868/S0032874X22110023
10. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Astern Running of Heavy-Tonnage Vessels in an Ice Channel. // Journal of ETA Maritime Science 2024;12(4):358-364. DOI: 10.4274/jems.2024.50480
11. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Применение диаграмм ледовой ходкости судов для анализа натурных испытаний. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 3 (405). С. 81-88.
12. Сазонов К.Е. Проблема определения ледового момента на движителе. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 2 (404). С. 68-78.
13. Цой Л.Г., Андрияшин А.И., Штрек А.А. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газозовов для Арктики. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, № 3(97), с. 46-56.
14. Арнольд-Алябьев В.И. Опыты по внешнему трению льда. // Журнал технической физики. 1937. Т.7. - Вып.8. - -С.873-878.
15. Сазонов К.Е. Создание теории моделирования движения судов во льдах. К 70-летию первого в мире ледового опытового бассейна. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2025. Т. 71. № 2. С. 215-233.
16. Test methods for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02, 2021, 19 p.
17. Рывлин А.Я. Экспериментальное изучение трения льда. // Труды ААНИИ, 1975, т. 309, с.186-199.
18. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980, 208 с.
19. Анохин П.В., Беккер А.Т., Уварова Т.Э., Помников Е.Е. Методики определения степени сопротивления бетона ледовой абразии (обзор). // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2021. № 2(47), с.107-122. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-12>

References

1. Bulat V. The effect of snow on ice resistance. Naval Architect. November 1982. E253.
2. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Influence of snow cover characteristics on the ice resistance of ships. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2024. No. S1. P. 15-22. (In Russian)
3. Gramuzov E.M. Snow resistance during icebreaker movement. Design of navigation extension means: inter-university collection. Gorky: Gorky Polytechnic Institute, 1986. Pp. 59–71. (in Russian)
4. Gramuzov E.M., Tikhonova N.E. Method for taking into account the influence of snow on the resistance of an icebreaker due to the reduced thickness of the continuous ice cover. Transactions of the R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University. 2011. No. 4(91). P. 178–183 (in Russian)
5. Gramuzov E.M., Ionov B.P., Tikhonova N.E. Taking into account snow when determining the reduced thickness of ice cover. Marine Bulletin. 2017. No. 2 (62). P. 112-113. (In Russian)
6. Sazonov K.E. On the possible mechanism of the influence of snow cover on the ice resistance of ships. Polar Mechanics. 2016. No. 3. P. 417-427 (In Russian)
7. Sazonov K.E. The origin of icebreaker theory: Robert Runeberg. Shipbuilding. 2022. No. 6 (865). P. 65-72. (In Russian)
8. Ignatiev M.A. Propellers of ice-going ships. L.: Sudostroenie, 1966. 114 p. (In Russian)
9. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. How shipping in the Arctic has changed in the 21st century. Priroda. 2022. No. 11 (1287). P. 10-21. DOI: 10.7868/S0032874X22110023 (In Russian)
10. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Astern Running of Heavy-Tonnage Vessels in an Ice Channel. // Journal of ETA Maritime Science 2024;12(4):358-364. DOI: 10.4274/jems.2024.50480
11. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Application of ice performance diagrams of ships for the analysis of full-scale tests. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2023. No. 3 (405). P. 81-88. (In Russian)
12. Sazonov K.E. The problem of determining the ice moment on the propeller. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2023. No. 2 (404). P. 68-78. (In Russian)
13. Tsoi L.G., Andryushin A.I., Shtrek A.A. Justification of the main parameters of promising large-capacity gas carriers for the Arctic. Problems of the Arctic and Antarctic, 2013, No. 3(97), pp. 46-56. (In Russian)
14. Arnold-Alyabyev V.I. Experiments on external friction of ice. Journal of Technical Physics. 1937. Vol. 7. - Issue 8. - -P. 873-878. (In Russian)

15. Sazonov K.E. Development of a theory for modeling ship movement in ice. On the 70th anniversary of the world's first ice experimental basin. Problems of the Arctic and Antarctic. 2025. Vol. 71. No. 2. P. 215-233. DOI: 10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233. (In Russian)
16. Test methods for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02, 2021, 19 p.
17. Ryvlin A.Ya. Experimental study of ice friction. Proceedings of the AARI, 1975, v. 309, pp. 186-199. (In Russian)
18. Ryvlin A.Ya., Kheisin D.E. Testing of ships in ice. L.: Sudostroenie, 1980, 208 p. (In Russian)
19. Anokhin P.V., Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Methods for determining the degree of concrete resistance to ice abrasion (review). Bulletin of the FEFU Engineering School. 2021. No. 2 (47), pp. 107-122. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-12> (in Russian).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сазонов Кирилл Евгеньевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории морской ледотехники, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, профессор кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, e-mail: kirsaz@rambler.ru

Kirill E. Sazonov, Dr. Sci. (Eng), senior research fellow, Head of the Marine Ice Engineering Lab, Krylov State Scientific Center, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, Professor of the Department of Ocean Engineering and Marine Technologies, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, e-mail: kirsaz@rambler.ru

Добродеев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отделения по развитию ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, доцент кафедры Океанотехники и морских технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, e-mail: stamukha@yandex.ru

Aleksei A. Dobrodeev, Ph.D. (Eng), Deputy Head of Development Department, Krylov State Scientific Center, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, Assistant Professor of the Department of Ocean Engineering and Marine Technologies, State Marine Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya Ulitsa, 3, e-mail: stamukha@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 05.11.2025.

Научная статья

УДК 519.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.080>

Оценка напряженно-деформированного состояния бортового перекрытия буксирного судна на основе метода конечных элементов

Князьков В.В.¹ vl.knyazkov@yandex.ru, Халилов А.С.¹ SOSMIS21@yandex.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В инженерной практике часто встречаются задачи, которые не имеют аналитического решения. Именно с этим связана необходимость применения численных методов для решения соответствующих уравнений. Одним из самых популярных численных методов является метод конечных элементов, который используется во многих системах автоматизированного проектирования. Однако численные методы позволяют находить корни уравнений приближенно, с различной точностью. Поэтому особое значение имеет оценка точности результатов расчета и проверка достоверности полученных решений. Данная работа посвящена компьютерному моделированию корпусных конструкций, расчету напряженно-деформированного состояния с помощью метода конечных элементов и проверке достоверности полученных результатов. В качестве объекта для исследований используется многофункциональное аварийно-спасательное буксирное судно. Для решения поставленной задачи была построена модель теоретической поверхности корпуса, на базе которой разработана модель конструкции корпуса. Размеры конструктивных элементов определены в соответствии с Правилами Российского морского регистра судоходства с учетом дополнительных требований, предъявляемых к буксирным судам и требований подкреплений буксиров, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях.

Ключевые слова: Моделирование, численные методы, метод конечных элементов, конструкция корпуса, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: Князьков В.В., Халилов А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния бортового перекрытия буксирного судна на основе метода конечных элементов, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 88—94. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.080

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.080>

Evaluation of the stress-strain state of the side deck of a tugboat based on the finite element method

Vladimir V. Knyazkov¹ vl.knyazkov@yandex.ru, Alexander S. Khalilov¹ SOSMIS21@yandex.ru¹Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

Abstract. In engineering practice, there are often problems that do not have an analytical solution. This is why it is necessary to use numerical methods to solve the corresponding equations. One of the most popular numerical methods is the finite element method. This method is used in many computer-aided design systems. However, numerical methods allow us to find the roots of equations approximately, with varying degrees of accuracy. Therefore, it is especially important to evaluate the accuracy of the calculation results and verify the reliability of the obtained solutions. This paper focuses on the computer modeling of shell structures, the calculation of their stress-strain state using the finite element method, and the verification of the accuracy of the results obtained. A multifunctional rescue tugboat is used as the object of research. To solve this problem, a model of the theoretical surface of the housing was constructed, and a model of the housing structure was developed based on this model. The dimensions of the structural elements are determined in accordance with the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping, taking into account the additional requirements for towing vessels and the reinforcement requirements for towing vessels designed for operation in ice conditions.

Keywords: modeling, numerical methods, finite element method, ship hull structure, stress-strain state.

For citation: Vladimir V. Knyazkov, Alexander S. Khalilov Evaluation of the stress-strain state of the side deck of a tugboat based on the finite element method, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 88—94. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.080

Введение

В настоящее время благодаря совершенствованию вычислительной техники и информационных технологий расширяется использование технологий численного моделирования анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) судовых конструкций, узлов и деталей. Одним из самых популярных численных методов является метод

конечных элементов (МКЭ). Популярность данного метода объясняется простотой его физической интерпретации и математической формы [1, 2]. Поэтому МКЭ не случайно используется во многих системах автоматизированного проектирования (САПР), например, в SolidWorks [3], которая по всеобщему признанию является одной из лучших систем, реализующих технологию проектирования изделий в пространственной форме. Технологии SolidWorks используются практически на всех

основных этапах подготовки кораблестроителей на кафедре "Кораблестроение и авиационная техника" НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Однако важными аспектами численного решения любой инженерной задачи является интерпретация результатов расчета, оценка точности и проверка достоверности полученных решений. Существует стандарт ГОСТ Р 57700.14-2018, устанавливающий правила по компьютерному моделированию, а также по верификации (подтверждению достоверности) получаемых численных решений [4].

Целый ряд требований к МКЭ установлены Российским морским регистром судоходства (РС). Эти требования относятся в первую очередь к использованию определенных типов конечных элементов, их размерам. Так, например, размеры конечных элементов не должны превышать расстояния между рёбрами жёсткости. Для рамных балок должно быть не менее трёх конечных элементов по длине пролёта. РС разработал «Руководство по оценке напряжённо-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов» [5].

Данная работа посвящена компьютерному моделированию корпусных конструкций, расчету НДС, как балок, так и перекрытий с помощью МКЭ, проверке достоверности полученных результатов.

Объект для исследования

В качестве объекта для исследований используется многофункциональное аварийно-спасательное буксирное судно мощностью 3000 кВт, проект которого разработан в рамках выполнения выпускной квалификационной работы магистра (ВКР). Класс судна РМРС КМ Ⓢ Arc4 [1] R2 AUT1 EPP FF3WS Salvage ship Tug. Судно предназначено для аварийно-спасательного дежурства в районах судоходства, рыбного и морского нефтегазового промыслов. Основные характеристики судна приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики буксирного судна

Наименование характеристики	Размерность	Значение
Водоизмещение судна D	т	733
Длина по КВЛ	м	29,6
Ширина по КВЛ	м	10,85
Осадка по КВЛ	м	3,71
Высота борта	м	5,5
Коэффициент общей полноты	-	0,586
Коэффициент полноты КВЛ	-	0,835
Коэффициент полноты мидель-шпангоута	-	0,883

Модель теоретической поверхности корпуса судна, разработанная в SolidWorks, и боковой вид судна приведены на рис. 1.

Система набора корпуса в данном случае, что характерно для морских буксиров – поперечная [6]. Величина шпации принята 600 мм. В качестве основного материала корпуса предусматривается применение судостроительной стали нормальной

прочности категории D с пределом текучести $R_{eH}=235$ МПа. Схема мидель-шпангоута судна приведена на рис. 2.

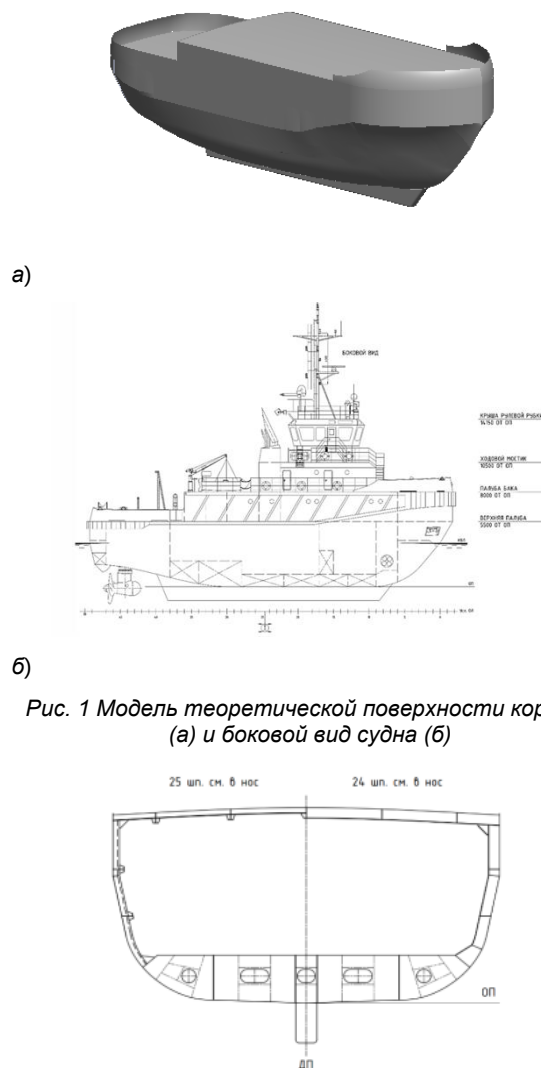


Рис. 1 Модель теоретической поверхности корпуса (а) и боковой вид судна (б)

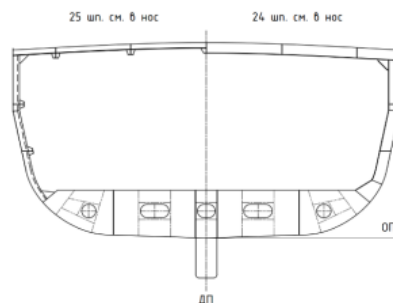


Рис. 2 Схема мидель-шпангоута

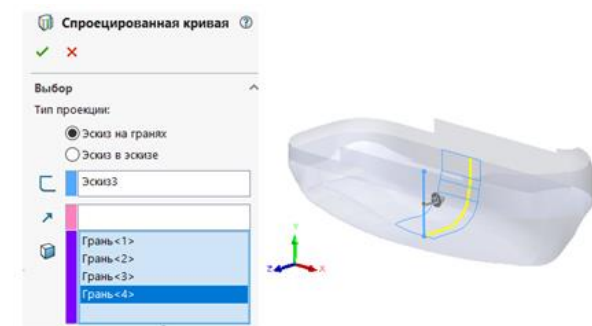
Толщина наружной обшивки и геометрические характеристики набора корпуса определены в соответствии с Правилами РС [7] с учетом дополнительных требований, предъявляемых к буксирным судам и требований подкреплений буксиров, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях. Соблюдение этих правил обычно достаточно для однозначного определения большинства размеров конструктивных элементов.

Моделирование корпусных конструкций

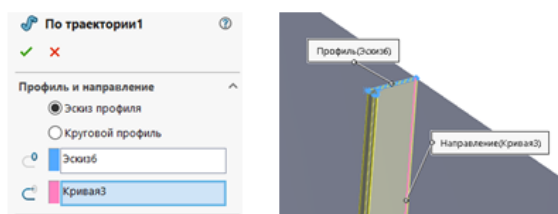
Модель конструкции корпуса формируется на базе полученной модели поверхности корпуса судна. Моделирование корпусных конструкций удобно производить для отдельных участков и перекрытий в пределах цилиндрической вставки и оконечностей судна [8]. Положение конструктивных элементов относительно теоретических линий определено стандартом [9], что учтено при создании моделей. Для балок набора применяется стандартный

полособульбовый профиль [10] и тавровые балки по ОН 9-594-68.

В качестве примера на рис. 3, а показано построение практического шпангоута с помощью команды *Спроецировать кривую*. С помощью команды *Бобышка/основание по траектории* получают балки, форма которых соответствует поверхности корпуса (рис. 3, б). Спроецированная кривая является направляющей для эскиза профиля.



а)

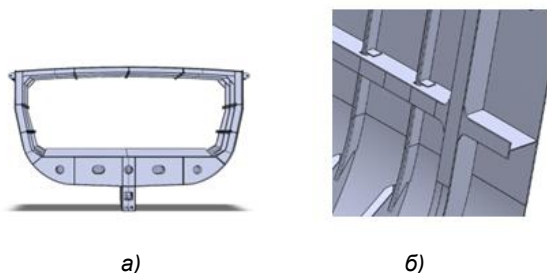


б)

Рис. 3 Пример построения практического шпангоута (а) и шпангоутной балки (б)

Для многократно повторяющихся элементов конструкции корпуса используется копирование, массив и/или зеркальное отражение. Сплошные флоры на судне изготовлены из отдельных листов. Овальные и круглые вырезы, а также вырезы для прохода балок, получаются с помощью команды *Разделить*.

Модель конструкции корпуса буксирного судна для средней части приведена на рис. 4. При моделировании использованы типовые соединения балок набора, стенки которых находятся в одной плоскости (соединение балок разных перекрытий). Для дальнейших исследований в данной работе рассматривается бортовое перекрытие.



а)

б)

Рис. 4. Модель конструкции корпуса (а) и фрагмент бортового перекрытия (б)

Расчет бортового перекрытия методом приравнивания прогибов

Внешняя нагрузка воспринимается пластинами бортовой обшивки судна и передается через них на балки перекрытия. При расчете балок перекрытий не вызывает большой погрешности известное предположение [11], что всё внешнее усилие, действующее на пластину, передается в виде нагрузки постоянной интенсивности только на длинные стороны её опорного контура, т.е. на те балки перекрытия, расстояние между которыми меньше. Эти балки называются балками главного направления, число которых обычно значительно больше, чем число балок другого направления, называемых перекрестными. Также считается [11], что если жесткость балок одного направления много меньше, чем другого, то рассчитывать систему перекрестных связей не имеет смысла. Расчет можно упростить, полагая слабые балки лежащими на абсолютно жестких опорах, какими для них являются балки другого направления. Поэтому до расчета перекрытия следует выполнить проверку соотношения (1)

$$C^4 \sqrt{\frac{L_{\Gamma 6}}{c} \left(\frac{L}{l}\right)^3} \geq 1,5(1 - \chi) + 1,9\chi, \quad (1)$$

где: χ – коэффициент заделки на опоре концов перекрестных балок;

L, l – пролеты перекрестных балок и балок главного направления;

c – среднее расстояние между балками главного направления;

$L_{\Gamma}, l_{\Gamma 6}$ – средние моменты инерции перекрестных балок и балок главного направления соответственно; C – коэффициент, значение которого принимается в зависимости от числа перекрестных балок и от типа балок главного направления.

Проверка показала, что выбранные геометрические характеристики балок перекрытия упрощения расчета не допускают и необходимо выполнять расчет перекрытия, а не расчет балок.

Расчетное давление p , кПа, действующее на корпус судна со стороны моря, определяется в соответствии с Правилами [7] по следующим формулам:

- для точек приложения нагрузок, расположенных ниже осадки $T_{\text{КВЛ}}$,

$$p = p_{st} + p_w; \quad (2)$$

- для точек нагрузок, расположенных выше осадки,

$$p = p_w, \quad (3)$$

где $p_{st} = 10z_i$ – статическое давление, кПа; z_i – отстояние точки приложения нагрузки от осадки.

Расчетное давление, обусловленное перемещениями корпуса относительно профиля волны, p_w , кПа, определяется по формулам:

- для точек приложения нагрузок, расположенных ниже осадки,

$$p_w = p_{w_0} - 1,5c_w z_i / T_{\text{КВЛ}}; \quad (4)$$

- для точек нагрузок, расположенных выше осадки,

$$p_w = p_{w_0} - 7,5a_x z_i, \quad (5)$$

где $p_{w_0} = 5c_w a_v a_x$;

$c_w = 0,0856L$ – волновой коэффициент для судов, у которых $L < 90$ м;

$c_w = 0,0856L\varphi_r$; для судов ограниченного района плавания R2 $\varphi_r = 1,25L \cdot 10^{-2} \leq 1$;

$a_v = 0,8v_0(L/10^3 + 0,4)/\sqrt{L} + 1,5$; v_0 – скорость, уз;

$a_x = k_x(1 - 2x_1/L) \geq 0,267$;

k_x – коэффициент, равный 0,8 и 0,5 для поперечных сечений в нос и корму от миделя, соответственно;

x_1 – отстояние рассматриваемого поперечного сечения от ближайшего (носового или кормового) перпендикуляра.

Схема бортового перекрытия для расчета приведена на рис. 5, а; суммарная эпюра расчетного давления на рис. 5, б.

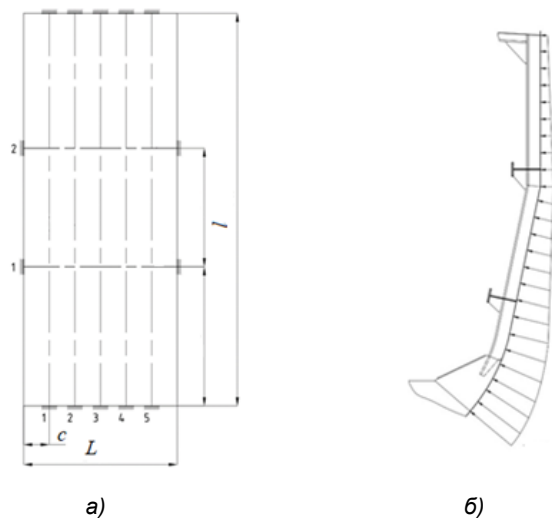


Рис. 5. Схема перекрытия (а) и суммарная эпюра расчетного давления (б)

Выбор метода расчета зависит от типа конструкции и характера нагрузки. Анализ конструкции бортового перекрытия показал, что его расчет можно наиболее просто выполнить методом приравнивания прогибов [11].

При расчете перекрытия методом приравнивания прогибов для каждого узла составляются два выражения для прогиба: одно – исходя из схемы загрузки одной балки, другое – из схемы загрузки балки, пересекающей с ней. Затем эти прогибы приравниваются. В результате получается система уравнений, число которых равно числу неизвестных реакций. После решения системы каждая балка рассчитывается обычным путем, независимо от других [11].

Для определения узловых реакций в точках пересечения балок главного направления и поперечных балок используется формула (6)

$$\frac{I_0}{I_i} \sum_{k=1}^s \gamma_{nk}^0 R_{ik} + \sum_{j=1}^m \gamma_{ij}^* R_{jn} = \beta_i^* Q_n, \quad (6)$$

где I_0 – наибольший момент инерции поперечных балок; I_i – момент инерции i -ой поперечной балки; $s = \frac{t+1}{2}$, t – количество балок главного направления;

$\gamma_{nk}^0 = \gamma_{nk}^{\text{пер}} + \gamma_{n,t-k}^{\text{пер}}$ – коэффициент прогиба поперечной балки в узле пересечения с n -ой балкой главного направления; R_{ik} – реакция в узле,

образованная пересечением i -ой поперечной балки с k -ой балкой главного направления;

$\gamma_{ij}^* = A\gamma_{ij}^{r,6}$ – коэффициент прогиба балки главного направления с i -ой поперечной балкой от реакции в узле пересечения с j -ой поперечной балкой; $A = \frac{I_0}{I_{r,6}} \left(\frac{l}{L}\right)^3$; $\beta_i^* = A\beta_i$; – коэффициент прогиба балки главного направления в узле пересечения с i -ой поперечной балкой от внешней нагрузки; Q_n – нагрузка на n -ую балку главного направления; m – число поперечных балок.

Для получения системы уравнений, позволяющих определить узловые реакции согласно выражению (6), коэффициенты прогибов балок обоих направлений были приняты по соответствующим таблицам, приведенным в [11].

Для дальнейшего расчета перекрытия необходимо также рассмотреть нагрузку на балку главного направления. На рис. 6 показана замена нагрузки на эквивалентную ей нагрузку для реализации расчета перекрытия методом приравнивания прогибов.

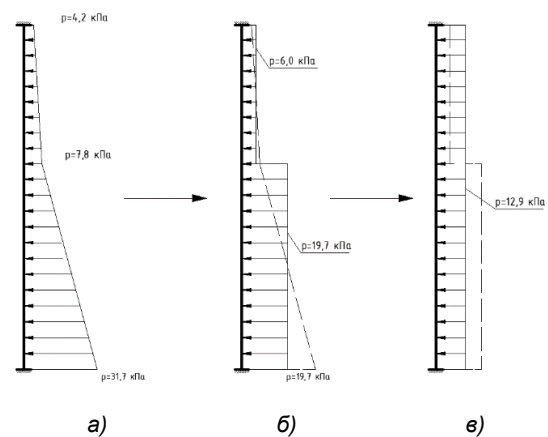


Рис. 6. Замена нагрузки балки главного направления на эквивалентную нагрузку

В результате выполненных расчетов были построены эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил для всех балок обоих направлений. Значение максимальных изгибающих моментов использовалось для расчета изгибных напряжений. Максимальное изгибное напряжение в перекрытии составило 150 МПа.

Изгиб простейших балок

Схема жестко заделанной балки, выбранной для тестового расчета, приведена на рис. 7.

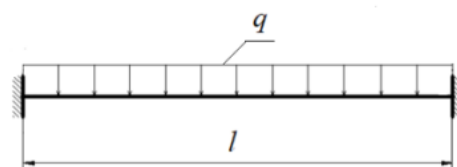


Рис. 7. Расчетная схема

В таблице элементов изгиба простейших балок [11] имеются выражения для максимального прогиба в середине пролёта (7) и изгибающего момента в заделке (8) для такой балки:

W_{\max} = \frac{1}{384} \frac{Ql^3}{EI}; \tag{7}

M = \frac{Ql}{12} \tag{8}

где Q – суммарное усилие; E – модуль упругости; I – момент инерции поперечного сечения.

Рассмотрена балка прямоугольного сечения, для которого $I = \frac{bh^3}{12}$; $W = \frac{bh^2}{6}$ – момент сопротивления; b и h – ширина и высота профиля соответственно.

Вариант исследования статический. Последовательно были заданы крепления граней и нагрузка (рис. 8, а), создана стандартная сетка элементов (рис. 8, б). При этом выполнялась оценка влияния размеров элементов на результаты расчета (рис. 8, в). Результаты расчета НДС балки приведены в табл. 2.

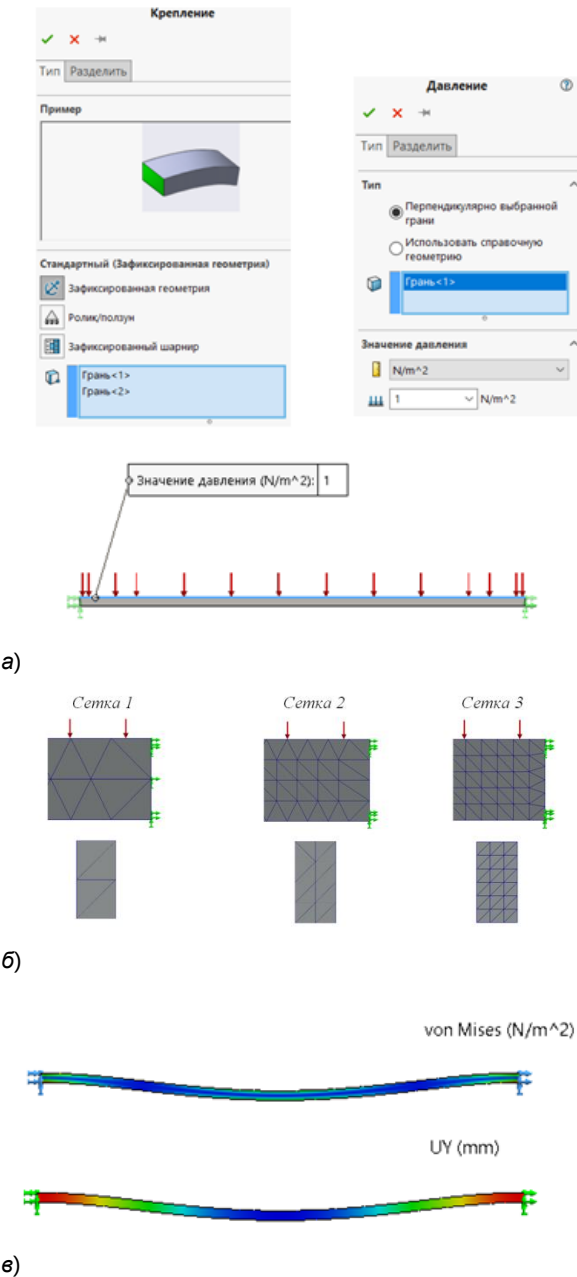


Рис. 8. Создание конечно-элементной модели (а, б) и отображение результатов расчета (в)

Анализ результатов расчета показал, что значения максимального прогиба в середине пролета не зависят от размеров элементов и совпадают с аналитическим решением (7). Погрешность в определении напряжений в заделке уменьшается при уменьшении размеров элементов и не превышает 1 %.

Таблица 2.

Аналитический расчет		МКЭ		
		Сетка 1	Сетка 2	Сетка 3
Прогиб в середине пролета, мм	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$
Напряжение в заделке, н/м²	$1,25 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^3$

Расчет бортового перекрытия методом конечных элементов

МКЭ прогнозирует поведение модели при помощи сопоставления информации, полученной от всех элементов составляющих модель. Поэтому создание сетки элементов – очень важный этап в анализе конструкций. Автоматический создатель сетки в программе SolidWorks Simulation создает сетку на основе глобального размера элемента, допуска и характеристик локального управления сеткой. Управление сеткой позволяет задать разные размеры элемента. Программа определяет размер элемента для модели, принимая во внимание её объем, площадь поверхности и другие геометрические характеристики. Размер создаваемой сетки (количество узлов и элементов) зависит от геометрии и размеров модели. Твёрдотельные элементы обычно подходят для объемистых моделей, а для моделирования тонкостенных деталей (листовые металлы) лучше использовать элементы оболочки.

Для решения поставленной задачи методом конечных элементов в геометрическую модель перекрытия внесены некоторые изменения, упрощающие построение конечно-элементной сетки. Сплошные шпангоуты выполняются разрезными, а вырезы в стенке бортовых стрингеров (см. рис. 4, б) исключаются; вместо кницы шпангоуты доведены до крайнего междудонного листа. Геометрическая модель перекрытия для использования элементов оболочки приведена на рис. 9, а. С помощью менеджера оболочки были заданы свойства, необходимые для расчета (толщина, материал).

Расчеты выполнялись для всех вариантов нагрузки, приведенной на рис. 6. Установлено крепление *Зафиксированная геометрия* по периметру перекрытия. Сетка средней плотности получена на основе смешанной кривизны, что позволяет получить более адекватную сетку на криволинейных объектах. Для удобства работы оболочки имеют свой цвет, что позволять идентифицировать, например, её толщину или материал (рис. 9, б).

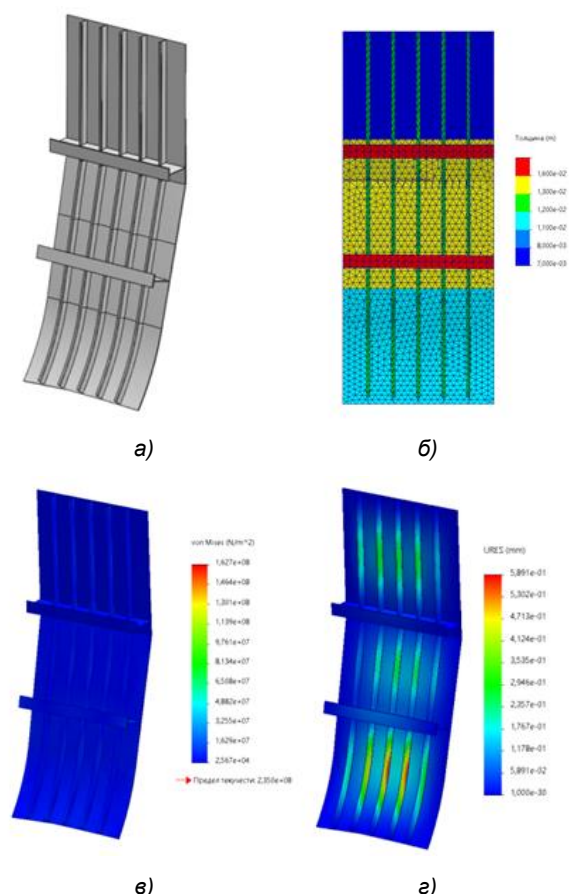


Рис. 9. Геометрическая модель (а), сетка элементов (б), эпюры напряжений (в) и перемещений (г)

В результате выполненных расчетов программа создает папку *Результаты* в дереве исследования Simulation. При просмотре результатов можно создать эпюры, списки, графики и отчеты в

зависимости от типа исследования и полученных результатов. На рис. 9, в, г в качестве примера приведены эпюры напряжений и перемещений для варианта нагрузки, приведенного на рис. 5, б.

Зондирование эпюр результатов позволяет просмотреть числовое значение в узлах или середине элемента. В результате зондирования было установлено, что максимальное значение напряжения, которое возникает в перекрытии для эквивалентной нагрузки (см. рис. 6, в) составляет 136 МПа, что оказалось несколько ниже полученного значения при расчете перекрытия методом приравнивания прогибов. Разница составляет около 9 %. Это вероятнее всего может быть связано как с принятыми допущениями и упрощениями в геометрии перекрытия, так и некоторыми отличиями в геометрии перекрытия для расчетов разными методами.

Однако полученные результаты выполненных исследований, которые следует считать предварительными, вполне убедительно иллюстрируют эффективность моделирования и достаточную точность отдельных расчетов НДС корпусных конструкций с помощью программного комплекса SolidWorks [3, 8].

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать ряд выводов и сформулировать некоторые рекомендации.

1. Для получения достоверных результатов при построении моделей необходимо руководствоваться требованиями нормативных документов [4, 5, 7].
2. Исходная геометрическая модель и вносимые в неё упрощения могут существенно повлиять на результаты расчетов.
3. Приведенные примеры демонстрируют эффективность моделирования корпусных конструкций судна и расчетов НДС с использованием SolidWorks.

Литература

1. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
2. Шахверди, Г.Г. Ударное взаимодействие судовых конструкций с жидкостью / Г.Г. Шахверди. – СПб: Судостроение, 1993. – 256 с.
3. Князьков, В.В. SolidWorks/COSMOSWorks Компьютерное моделирование и инженерный анализ методом конечных элементов: учеб. пособие / В.В. Князьков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. – 216 с.
4. ГОСТ Р 57700.14-2018 Численное моделирование физических процессов. – М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
5. Руководство по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2021. – 11 с.
6. Буксирные суда (проектирование и конструкция) / Б.В. Богданов [и др.]. - Л.: Судостроение, 1974. – 280 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский морской Регистр судоходства. – СПб, 2023.
8. Князьков, В.В. SolidWorks. Проектирование судов: учеб. пособие / В.В. Князьков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – 228 с.
9. ГОСТ 2.419-68 ЕСКД. Правила выполнения документации при плазовом методе производства. М.: Стандартинформ, 2011. – 19 с.
10. ГОСТ 21937-76 Полособульб горячекатаный несимметричный для судостроения. ИПК Издательство стандартов, 2000. – 6 с.
11. Прочность судов внутреннего плавания. Справочник. Изд. 3-е перераб. и доп. / В.В. Давыдов, Н.В. Маттес, И.Н. Сиверцев, И.И. Трянин – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.

References

1. Zenkevich, O. Metod konechnykh ehlementov v tekhnike: per. s angl. / O. Zenkevich. – M.: Mir, 1975. – 541 s.
2. Shakhverdi, G.G. Udarnoe vzaimodeistvie sudovykh konstruksii s zhidkost'yu / G.G. Shakhverdi. – SPb: Sudostroenie, 1993. – 256 s.
3. Knyaz'kov, V.V. SolidWorks/COSMOSWorks Komp'yuternoe modelirovanie i inzhenernyi analiz metodom konechnykh ehlementov: ucheb. posobie / V.V. Knyaz'kov; NGTU im. R.E. Alekseeva. – N. Novgorod, 2010. – 216 s.
4. GOST R 57700.14-2018 Chislennoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. – M.: Standartinform, 2018. – 16 s.
5. Rukovodstvo po otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sudovykh korpusnykh konstruksii na osnove metoda konechnykh ehlementov. – SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2021. – 11 s.
6. Buksirnye suda (proektirovanie i konstruksiya) / B.V. Bogdanov [i dr.]. L.: Sudostroenie, 1974. – 280 s.
7. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' II. Korpus / Rossiiskii morskoi Registr sudokhodstva. – SPb, 2023.
8. Knyaz'kov, V.V. SolidWorks. Proektirovanie sudov: ucheb. posobie / V.V. Knyaz'kov; NGTU im. R.E. Alekseeva. – N. Novgorod, 2018. – 228 s.
9. GOST 2.419-68 ESKD. Pravila vypolneniya dokumentatsii pri plazovom metode proizvodstva. M.: Standartinform, 2011. – 19 s.
10. GOST 21937-76 Polosobul'b goryachekatanyi nesimmetrichnyi dlya sudostroeniya. IPK Izdatel'stvo standartov, 2000. – 6 s.
11. Prochnost' sudov vnutrennego plavaniya. Spravochnik. Izd. 3-e pererab. i dop. / V.V. Davydov, N.V. Mattes, I.N. Sivertsev, I.I. Tryanin – M.: Transport, 1978. – 520 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или авторы статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the authors of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Князьков Владимир Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: vl.knyazkov@yandex.ru

Vladimir V. Knyazkov, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: vl.knyazkov@yandex.ru

Халилов Александр Сергеевич, магистр кафедры «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: SOSMIS21@yandex.ru

Alexander S. Khalilov, master's student of the Department «Shipbuilding and aviation technology», Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, Minin st., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: SOSMIS21@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 20.10.2025.
Принята к публикации/accepted for publication 30.10.2025.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 624.042:629.5.024

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.081>

Цифровой двойник корпуса судна в техническом обслуживании и ремонте

Муру Г.Н.¹ office@51cktis.ru, Сутырин В.И.² vsutyurin@mail.ru, Буйлов С.В.² bsv2552@yandex.ru,
Корягин С.И.² skoryagin@kantiana.ru, Шинкаренко И.А.³ van-125@mail.ru

¹51 Центральный конструкторско-технологический институт судоремонта, Санкт-Петербург, Россия,

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, ³Прибалтийский
судостроительный завод «Янтарь», Калининград, Россия.

Аннотация. Статья посвящена применению цифровых двойников для технического обслуживания и ремонта корпусных конструкций судов, эксплуатируемых в экстремальных условиях Арктики. В качестве объекта исследования рассмотрен корпус вспомогательного судна. Используется конечно-элементная модель, учитывающая изменения остаточных толщин, нагрузки и внешние воздействующие факторы. Установлено значительное влияние коррозионного износа на жесткость и динамические характеристики корпуса, включая смещение спектра собственных частот и изменение амплитуд колебаний. Показано, что ремонтные операции, такие как замена изношенных элементов, могут существенно улучшить вибрационную обстановку. Подчеркивается важность комплексного подхода, сочетающего мониторинг, численное моделирование и прогнозирование, для повышения безопасности и эффективности эксплуатации судов. Использование цифрового двойника позволяет минимизировать издержки на ремонт, предотвращать аварийные ситуации и адаптировать корпуса к экстремальным условиям Арктики.

Ключевые слова: цифровой двойник, корпусные конструкции судов, арктические условия эксплуатации, мониторинг состояния, техническое обслуживание и ремонт, прогнозные оценки.

Для цитирования: Муру Г.Н., Сутырин В.И., Буйлов С.В., Корягин С.И., Шинкаренко И.А. Цифровой двойник корпуса судна в техническом обслуживании и ремонте. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 95—103. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.081

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.081>

Digital twin of a ship's hull in maintenance and repair

Georgy N. Muru¹ office@51cktis.ru, Valery I. Sutyurin² vsutyurin@mail.ru, Sergey V. Buylov² bsv2552@yandex.ru,
Sergey I. Koryagin² skoryagin@kantiana.ru, Ivan A. Shinkarenko³ van-125@mail.ru

¹JSC "51 Central Design and Technological Institute of Ship Repair, ²Immanuel Kant Baltic Federal University, ³JSC
"Baltic Shipyard "Yantar"

Abstract. The article is devoted to the application of digital twins for maintenance and repair of hull structures of ships operated in extreme conditions of the Arctic. The hull of an auxiliary vessel is considered as an object of study. A finite element model is used, which takes into account changes in residual thicknesses, loads and external influencing factors. Significant influence of corrosion wear on the stiffness and dynamic characteristics of the hull, including the shift of the natural frequency spectrum and changes in vibration amplitudes, is established. It is shown that repair operations, such as replacement of worn elements, can significantly improve the vibration environment. The importance of an integrated approach combining monitoring, numerical modeling and forecasting to improve safety and efficiency of ship operation is emphasized. The use of digital twin allows minimizing repair costs, preventing emergencies and adapting hulls to the extreme conditions of the Arctic.

Keywords: digital twin, ship hull structures, Arctic operating conditions, condition monitoring, maintenance and repair, predictive estimations.

For citation: Georgy N. Muru, Valery I. Sutyurin, Sergey V. Buylov., Sergey V. Buylov, Ivan A. Shinkarenko. Digital twin of a ship's hull in maintenance and repair, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 95—103. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.081

Введение

Эксплуатация судов в экстремальных условиях Арктики предъявляет исключительные требования к техническому обслуживанию и ремонту (ТОР) корпусных конструкций [1-4]. Эффективным

инструментом ТОР могут служить цифровые двойники (ЦД)- виртуальные копии корпусов, объединяющие их пространственные (3D) модели [5-9], данные инструментального мониторинга состояния, параметры напряженно-деформированного состояния (НДС),

эксплуатационных нагрузок в том числе динамических, результаты комплексного инженерного анализа моделей и прогнозные оценки остаточного ресурса и рисков возникновения опасных состояний корпусных конструкций.

ЦД позволяют реализовать технологии поддержки жизненного цикла объектов морской техники (PLM технологии). В области проектирования спомощью ЦД решаются задачи оптимизации корпусных конструкций с учетом реальных условий экстремальных ситуаций (штормовых условий, столкновений и др.) [10]. С целью поддержки ремонтных работ выполняется моделирование последствий ремонтных операций, а также их планирование [11,12]. В рамках технического обслуживания корпусных конструкций выявляются потенциально опасные ситуации (дефекты), прогнозируются последствия износа и повреждений [13-15]. Прогнозные оценки связывают реакции конструкции корпуса (характеристики НДС) на внешние нагрузки и воздействия с возрастом судна. Прогнозирование выполняется на основе мониторинга и статистического анализа характеристик технического состояния (например, износов и повреждений) [16,17]. Мониторинг позволяет не только контролировать характеристики состояния и вибрации [18-19] конструкции корпуса, но и формировать временные ряды требуемых характеристик. Получаемая информация может служить основой для последующего регрессионного анализа и, соответственно, прогноза с применением расчетных моделей.

Методика исследования.

Эффективным инструментом анализа и прогнозирования технического состояния корпуса судна может служить конструктивно- подобная (3D) конечно-элементная (КЭ) модель, позволяющая исследовать состояние и поведение корпуса с необходимой подробностью и полнотой. Модель, откорректированная с учетом фактических износов и повреждений, является своеобразным паспортом и

одновременно инструментом прогнозирования технического состояния корпуса. КЭ модель учитывает изменение остаточных толщин конструктивных элементов, варианты нагрузок, а также сценарии эксплуатации и ремонта судна. Расчеты КЭ модели выявляют критичные участки корпуса, определяется остаточный ресурс любых конструктивных элементов. Используя прогнозные оценки устанавливаются интервалы инспекционных проверок корпуса, минимизируются издержки на ремонт, предотвращаются аварийные ситуации. Таким образом, ЦД обеспечивает не только контроль (фиксацию) параметров ТС корпуса судна, но и управление ими. Результатом становится снижение издержек, повышение безопасности эксплуатации и удлинение срока службы судна.

Настоящая статья иллюстрирует применение важных компонентов ЦД, а именно: пространственную (3D) модель корпуса судна, средства автоматизации включения в модель характеристик изнашивания КЭ, а также алгоритм прогнозирования реакций корпуса на изменение остаточных толщин.

Объектом исследования служит корпус вспомогательного судна длиной 85 м и водоизмещением 3400 т. Выбор объекта обусловлен тем, что: 1) по судам анализируемого типа имеется полный комплект проектно- конструкторской документации, включая документацию по выполненным ремонтным работам; 2) суда производились серийно; 3) по судам имеются многочисленные данные инструментальной дефектации, полученные на различных этапах эксплуатации судов. На рис.1 показана пространственная комбинированная КЭ модель судна, набранная оболочечными и стержневыми конечными элементами. Модель с достаточной точностью отражает основные конструктивные особенности корпуса судна. Общее число степеней свободы расчетной модели превышает $3 \cdot 10^6$.

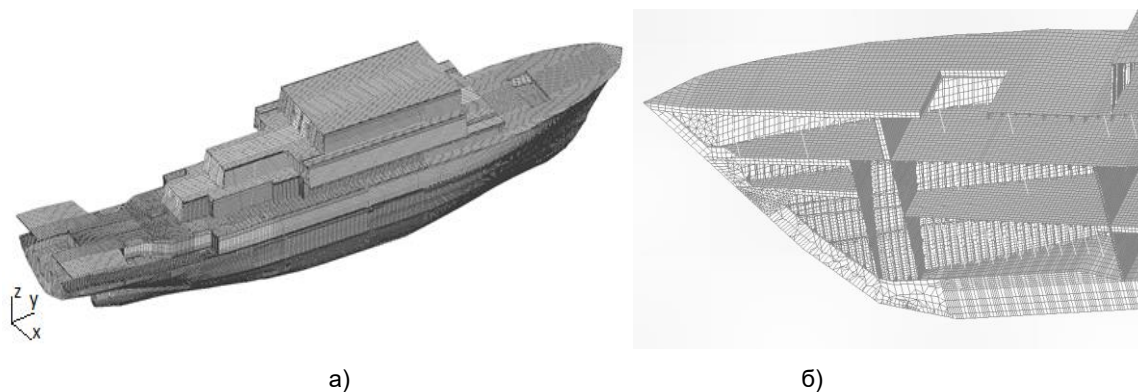


Рис.1. Пространственная (3D) комбинированная КЭ модель корпуса судна (а); б) – фрагмент носовой части корпуса судна

Численное исследование конструкции корпуса судна выполнено с применением CAE- комплекса Femap NX NASTRAN. Типы выполненных расчётов: 1) определение напряжений и перемещений при статической нагрузке, 2) определение методом Халецкого резонансных частот и форм колебаний; 3) гармонический отклик на основе прямого частотного

метода. Присоединенные массы воды определены методом MFluid (FluidRegion).

Нагрузки. В расчетах модели в статической постановке использованы проектные (нормативные) нагрузки.

В расчетах вынужденной вибрации конструкции корпуса учтены экспериментально определенные

трехкомпонентные силы гармонического возбуждения конструкции работающим дизель-генератором (ДГ), расположенным в отсеке машинного отделения (рис.2). Силы прикладывались в восьми точках крепления ДГ к фундаменту. Компоненты сил (в Н), ориентированные вдоль осей координат X (поперечная), Y (продольная) и Z в указанных точках составили соответственно (в скобках указаны значения фаз в градусах): 1.

4(0);22(119); 50(-1). 2. 6(57);10(140);26(0). 3. 13(21);9(-153);38(-11). 4. 10(37);15(-111);11(25). 5. 27(-21);19(-109);21(-146). 6. 27(-19);9(-154);36(-59). 7. 29(-18);14(136);39(-49); 8. 30(-19);26(226);68(26). Частота воздействия 16,7 Гц. Коэффициент конструкционного демпфирования G варьировался в диапазоне от 0,03 до 0,05.

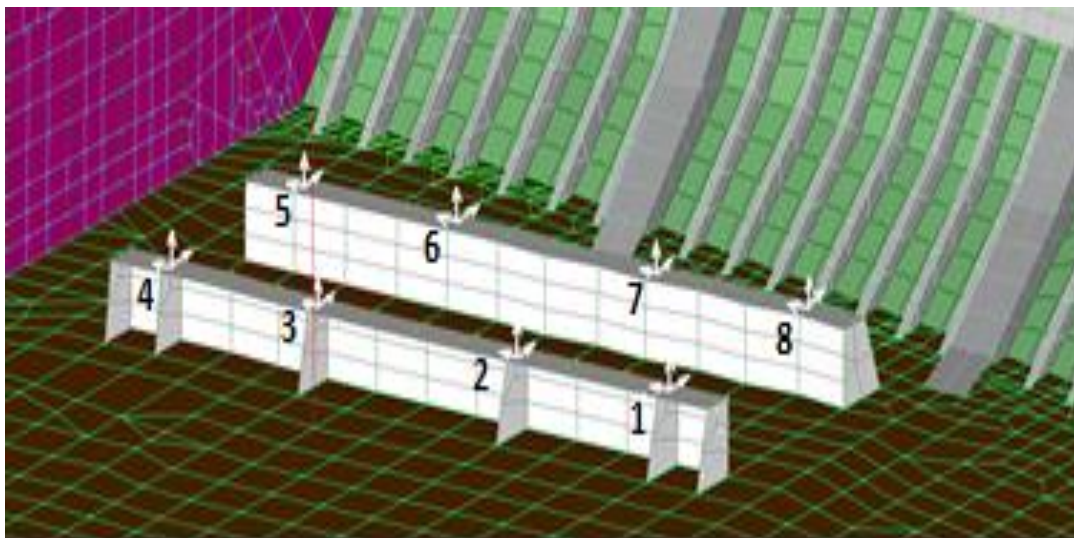


Рис.2. Точки приложения компонент возбуждающих сил ДГ

Прогнозирование износа. Величины износов взяты из дефектовочных ведомостей, составленных в различные годы эксплуатации судов указанного типа. По ним были определены скорости коррозионного износа отдельных связей u_c^i . В случае недостатка информации были использованы скорости износа характерных связей судовых корпусов, рекомендованные Правилами Морского Регистра. В данном исследовании величина остаточной толщины, рассматриваемой (i -й) связи S'_i на период эксплуатации судна T определялась по формуле: $S_{it} = S'_i - u_c^i T$, где S'_i – остаточная толщина элемента предыдущего замера.

Для автоматической корректировки остаточных толщин (свойств) КЭ модели корпуса судна разработан специализированный API-модуль, работающий с таблицей базы данных. База содержит массивы величин остаточных толщин связей, определенные на различных этапах эксплуатации судна, координаты точек неразрушающего контроля, а также скорости изнашивания связей. Свойства КЭ сгруппированы в соответствии с нормативными требованиями к дефектации. В данном расчете сформировано 600 групп, в рамках которых выполнялся статистический анализ скоростей изнашивания. Разработанная программа допускает автоматическое формирование и использование массивов данных инструментальных замеров остаточных толщин, получаемых с использованием робототехники. Предусматривается возможность ввода данных дефектации непосредственно в РМ корпуса с применением технологии «Спарто». Сгущение сетки КЭ позволяет отследить неравномерность износа связей корпуса с необходимой точностью.

Обсуждение результатов.

Результаты расчетов: НДС. На рис.3в качестве примера показаны результаты расчета напряженного состояния поперечной переборки корпуса судна. Результаты обеспечивают возможность прогнозирования возможных последствий и объемов ремонта корпусной конструкции.

Вынужденная вибрация. На существенную зависимость характеристик вибрации от возраста судна указывают данные их инструментального контроля, полученные на судах флота рыбной промышленности. Инструментальным контролем было показано, что уровни вибрации в отсеках и помещениях судов могут превысить уровни санитарных норм. Расчетное исследование вынужденной вибрации представляет сложную задачу. Однако технологические возможности для ее решения существуют. Современное состояние CAE комплексов позволяет получить расчетные данные о характере возможных эксплуатационных изменений характеристик вибрации корпуса с учетом осредненных скоростей износа основных его связей. На рис.4 приводятся прогнозные картины вертикальных амплитуд вынужденной вибрации корпуса в зависимости от срока эксплуатации судна T в годах. Наблюдается не только существенное изменение амплитудных значений, но и их перераспределение по конструкции корпуса. В результате можно наблюдать, как в одних отсеках и помещениях судна изначально неблагоприятная вибрационная обстановка может со временем заметно улучшиться, в то время как в других помещениях, наоборот, изнашивание корпуса может привести к серьезному ухудшению ситуации.

Расчеты показывают, что эксплуатационное коррозионное изнашивание связей корпуса приводит к смещению (дрейфу) всего спектра собственных частот конструкции в сторону понижения, что свидетельствует о доминирующем влиянии уменьшения жесткости в сравнении с возможным уменьшением массы металлического корпуса, связанным с образованием и возможным выносом

продуктов коррозии. Уменьшение собственных частот за период эксплуатации конструкции может достигать 20% от их исходных (проектных) значений. Подобные изменения не могут не учитываться при проектировании судна, поскольку предрезонансные вынужденные колебания корпусных конструкций могут в процессе эксплуатации судна смениться резонансными.

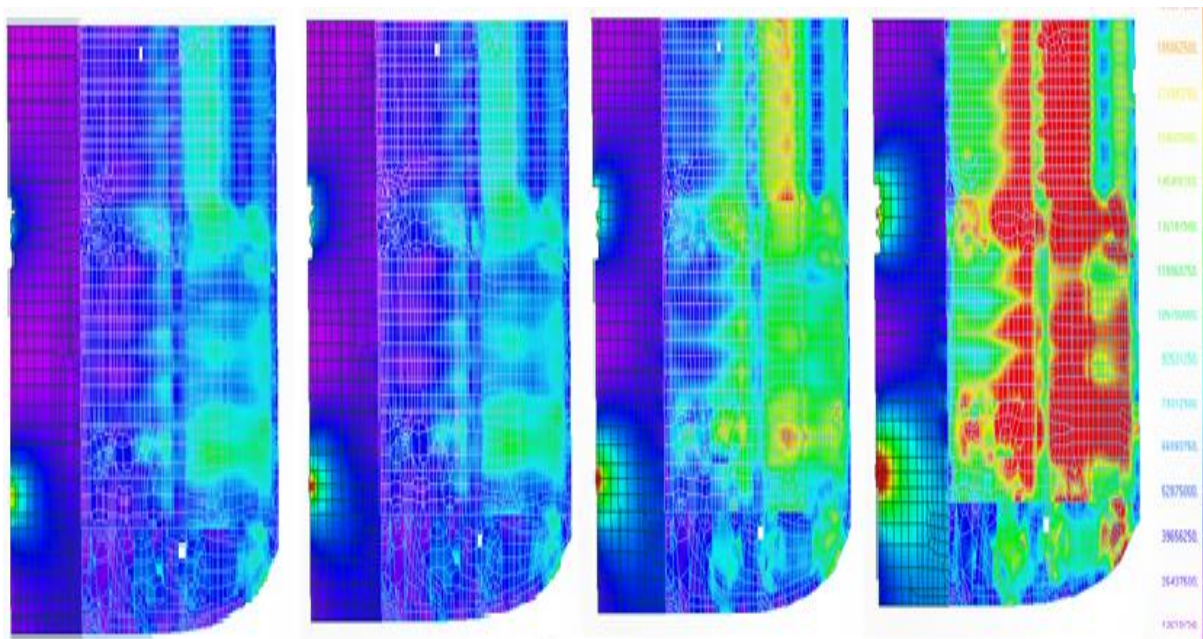


Рис. 4. Амплитуды вертикальной (Z) вибрации конструкции корпуса судна:
а)- на начало эксплуатации; б)- спустя 40 лет эксплуатации

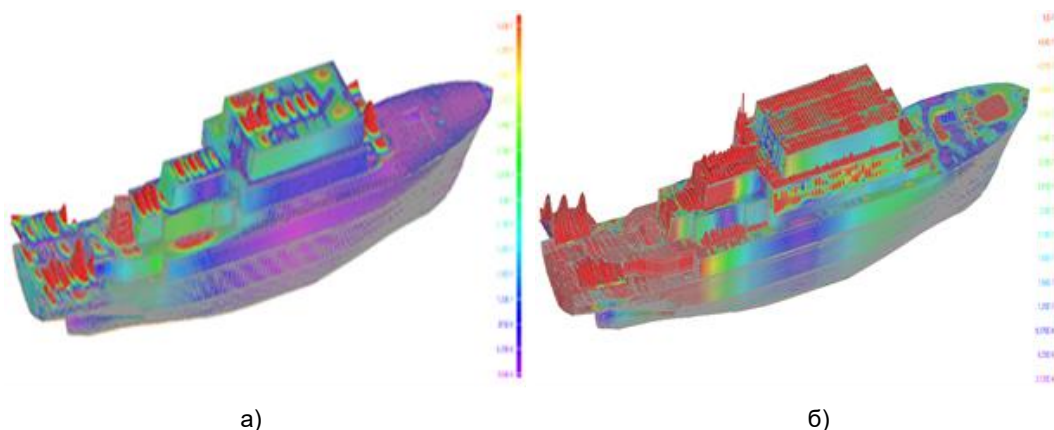


Рис. 3. Прогнозные оценки эквивалентных напряжений по Мизесу в поперечной переборке корпуса судна
(приведены картины изменения напряженного состояния при сроках эксплуатации $T=0; 10; 20$ и 30 лет)

Расчетом выявляются новые резонансные зоны. Характеристики вынужденной вибрации оказываются весьма чувствительными к изменению остаточных толщин конструкции корпуса судна, даже на сравнительно небольших периодах его эксплуатации, что иллюстрируется рис.5. Результаты расчета выявляют разнонаправленное изменение амплитуд, локальные модальные возбуждения. Качество прогнозных оценок вибрации может быть повышено рядом мероприятий: 1)-корректировкой параметров РМ по результатам инструментальных исследований вибрации на реальных судах; 2) - увеличением объема и повышением точности статистической информации о величинах остаточных

толщин; 3) -уточнением распределения масс и характеристик демпфирования. Обеспечение безопасности судов через прогнозирование вибрации требует комплексного подхода, сочетающего мониторинг, моделирование и превентивные меры.

Последствия ремонтных операций. На рис. 6 приведены иллюстрации изменения вынужденной вибрации в связи с проведением ремонтных работ. В качестве примера рассматриваются возможные последствия частичной замены изношенных листов настила платформы, расположенной непосредственно над машинным отделением судна. Видно, что ремонт методом замены привел к

изменению жесткости и массы конструкции в рассматриваемом районе и сделал ее менее чувствительной к колебательному возбуждению.

Влияние демпфирования. Значительное влияние на вибрацию корпусной конструкции оказывают ее демпфирующие свойства, оценить которые можно только экспериментальным путем. В ряде случаев,

например, когда нежелательные колебания конструкции вызваны резонансными явлениями, эффективным способом их контроля является существенное увеличение демпфирующих свойств. На практике необходимый контроль достигается применением демпфирующих полимерных покрытий.

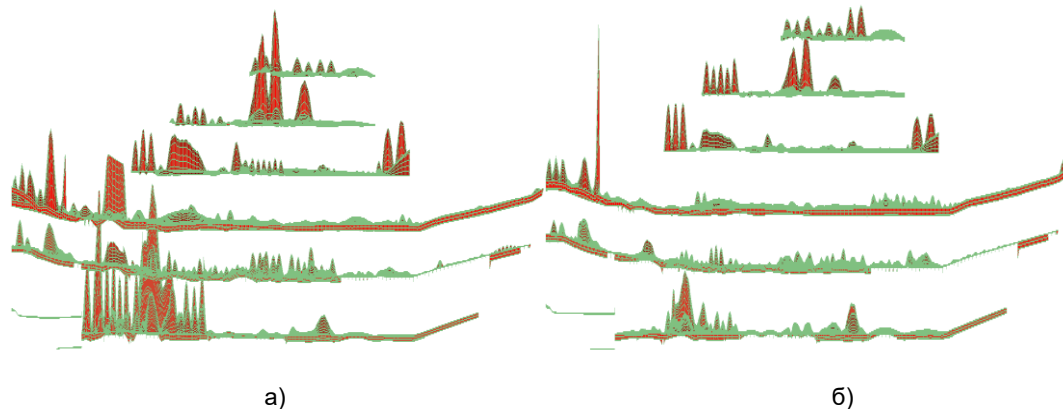
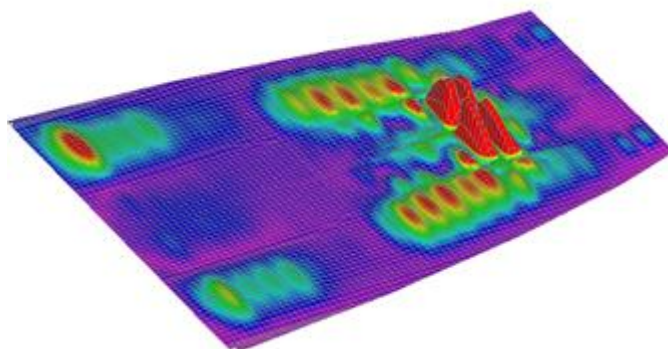
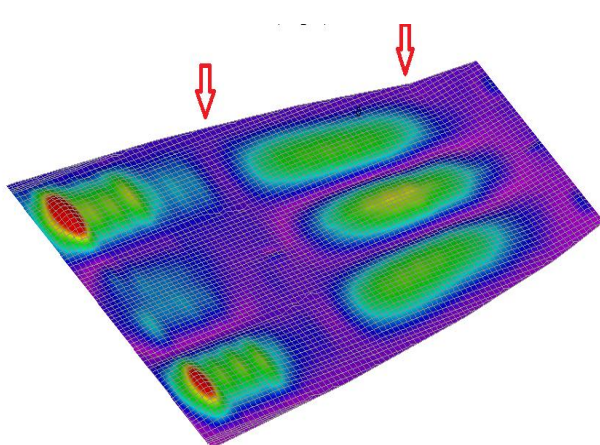


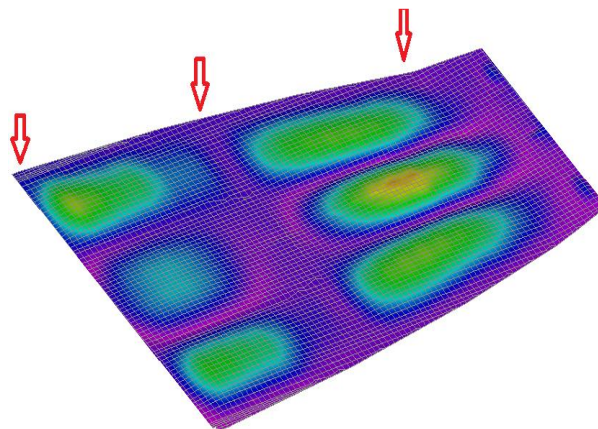
Рис.5. Изменение амплитуд вертикальных (вдоль оси Z) вынужденных колебаний палуб и платформ судна: а) -на начальном периоде эксплуатации; б) –на 5-м году эксплуатации



а) Вибрация платформы с остаточными толщинами настила после 30 лет эксплуатации



б) После восстановления построечных толщин на 1-м участке



в) После восстановления построечных толщин на 1-м и 2-м участках

Рис.6. Влияние на вынужденную вертикальную (Z) вибрацию платформы частичной замены участков ее настила, находящихся над машинным отделением судна

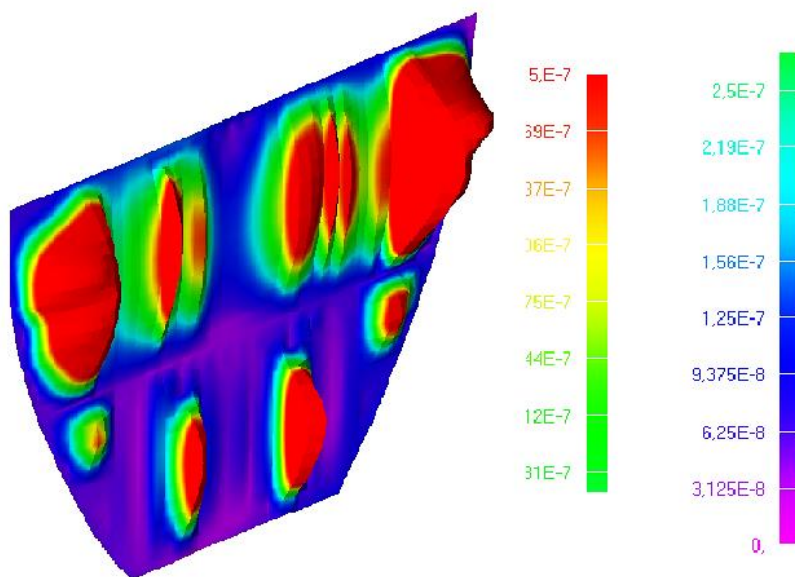
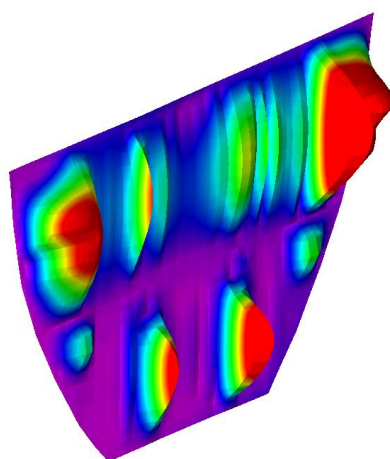
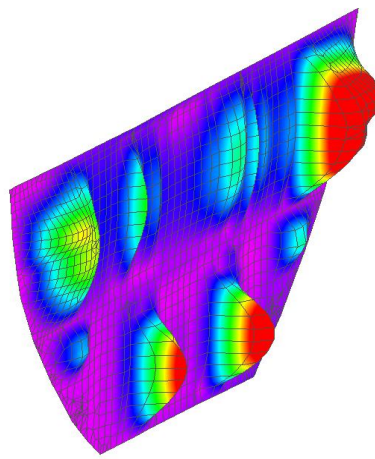
а) $G=0,01$ б) $G=0,03$ в) $G=0,05$

Рис. 7. Амплитуды колебаний конструкции поперечной переборки машинного отделения судна при различных значениях коэффициента конструкционного демпфирования G .

Однако в случае нерезонансных колебаний решение проблемы повышенной вибрации за счет демпфирования может оказаться нереализуемым. В качестве примера на рис. 7 иллюстрируются картины изменения вибрации (Y) кормовой поперечной переборки машинного отделения судна при увеличении коэффициента конструкционного демпфирования (период эксплуатации судна 20 лет).

Заключение

Обеспечение безопасности судов через прогнозирование характеристик технического состояния и динамики поведения объектов морской техники требует комплексного подхода, сочетающего автоматизированный мониторинг с численным моделированием. Качество прогнозных оценок может быть повышено, но для этого требуется

получить РМ корпусов, обоснованные результатами натурных экспериментов, увеличить объем и повысить точность данных о величинах нагрузок, остаточных толщин связей, распределении масс и характеристик демпфирования. Дальнейшее совершенствование методологии численного прогнозирования эксплуатационных характеристик будет содействовать принятию эффективных мер, направленных на предотвращение негативных сценариев ухудшения эксплуатационной обстановки на судах. Использование ЦД для судов арктического плавания позволяет повысить эффективность ТО и ремонта за счет прогнозирования, оптимизации ресурсов и адаптации корпусов к экстремальным условиям.

Литература

1. Муру Г.Н., Сутырин В.И., Корягин С.И. и др. Оценка технического состояния ледового усиления корпуса судна с использованием метода конечных элементов. Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, 16–17 декабря 2021 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 73-77. – EDN JCUFGY.
2. Самарин И.С., Корягин С.И., Лейцин В.Н., Буйлов С.В. Оценка степени деградации материалов корпусных конструкций кораблей и судов методом рентгеновской компьютерной томографии. Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе: Материалы XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей, Калининград, 10–13 сентября 2019 года. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. – С. 130-135. – EDN ROHSRS.
3. Муру Г.Н., Корягин С.И., Буйлов С.В., Сутырин В.И. Методология прогнозирования технического состояния корпуса судна на основе применения конечно-элементной модели. Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе: Материалы XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей, Калининград, 10–13 сентября 2019 года. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2020. – С. 217-222. – EDN XKNEMV.
4. Муру Г.Н., Буйлов С.В., Сутырин В.И., Ярисов В.В. Прогнозные оценки реакций на ледовые нагрузки эксплуатируемого корпуса судна на основе применения пространственной конечно-элементной модели // Транспорт и сервис. – 2020. – № 8. – С. 61-72. – EDN ASTFFM.
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part XVIII - Common structural rules for bulk carriers and oil tankers Российского морского регистра судоходства (ND №2-020101-087-E), 2016.
6. Li Sun A, Deyu Wang New rational-based optimal design strategy of ship structure based on multi-level analysis and super-element modeling method. //Journal of Marine Science and Application (2011) 10: 272-280.
7. Ahmad Fauzan Zakki, Sarjito Joko Sisworo. Hull Girder Ultimate Strength Analysis of 17500 LTDW Oil Tanker under the Combined Global and Local Load using Explicit Finite Element Analysis ISOCEEN-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1198 (2023) 012003 IOP Publishing
8. Do Van Doan, Lech Murawski. CALCULATION RELIABILITY OF NATURAL VIBRATIONS OF SHIP HULL AND SUPERSTRUCTURE //Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 26, No. 1 2019
9. Сутырин В.И. Метод конденсации в практике модального анализа корпуса судна с применением пространственной конечно-элементной модели // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. – Специальный выпуск 1. - С.162-169
10. Artjoms Kuznecovs, Martin Schreuder, Jonas W. Ringsberg Methodology for the simulation of a ship's damage stability and ultimate strength conditions following a collision // Marine Structure 70 (2021) 103027
11. Муру Г.Н., Сутырин В.И. Пути повышения эффективности инженерного анализа корпусов судов с применением пространственных конечно-элементных моделей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. -т.3. - № 393. - С.37-44
12. Сутырин В.И. Логистические аспекты автоматизированного инженерного анализа в системе технического обслуживания и ремонта судовых корпусных конструкций // Судостроение. -2015. - №5 (812). - С.51-58
13. Jinju Cuia, Deyu Wanga, Ning Ma. A study of container ship structures' ultimate strength under corrosion effects // Ocean Engineering 130 (2017)454-470
14. S. Saad-Eldeen, Y. Garbatov, C. Guedes Soares Effect of corrosion severity on the ultimate strength of a steel box girder //Engineering Structures 49 (2013) 560-571
15. Muhammad Zubair Muis Alie Residual Strength Analysis of Asymmetrically Damaged Ship Hull Girder using Beam Finite Element Method //Makara J. Technol. 20/1 (2016), 7-12
16. Christopher J. Stulla, Christopher J. Earlsb, Phaeton-Stelios Koutsourelakis. Model-based structural health monitoring of naval ship hulls // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 200 (2011) 1137–1149
17. Duygu Saydam, Dan M. Frangopol Performance assessment of damaged ship hulls // Ocean Engineering 98 (2013) 65- 76
18. Abdi Ismail, Achmad Zubaydi, Bambang Piscea, Rizky Chandra Ariesta, Tuswan Vibration-based damage identification for ship sandwich plate using finite element method // Open Eng. 2020; 10:744–752
19. Zhe Chen, Chao Ding, Zhen Liu, Shilin Sun Finite element simulation analysis of vibration transmission characteristics of double shell based on ANSYS //Journal of Physics: Conference Series 2730 (2024) 012020

References

1. Muru G.N., SutyriV.I., Korjagin S.I. i dr. Ocenka tehničeskogo sostojanija ledovogo usilenija korpusa sudna s ispol'zovaniem metoda konechnyh jelementov. Sovremennye tehnologii v korablestroitel'nom i aviacionnom obrazovanii, nauke i preinvasive: Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii, posvjashhennoj 105-letiju so dnja rozhdenija R.E. Alekseeva, Nizhnij Novgorod, 16–17 dekabrja 2021 goda. – Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2021. – S. 73-77. – EDN JCUFGY. [Georgy N. Muru, Valery I. Sutyri, Sergey I. Koryagin et al. Assessment of the technical condition of the ice reinforcement of the ship's hull using the finite element method. Modern technologies in shipbuilding and aviation education, science and production: Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 105th anniversary of the birth of R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, December 16-17

2021. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 2021. - S. 73-77. – EDN JCUFGY].
2. Samarin I.S., Korjagin S.I., Lejcin V.N., Bujlov S.V. Ocenka stepeni degradacii materialov korpusnyh konstrukcij korablej i sudov metodom rentgenovskoj komp'juternoj tomografii. Innovacionnye tehnologii mashinostroenija v transportnom komplekse: Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii asociacii tehnologov-mashinostroitelej, Kaliningrad, 10–13 sentjabrja 2019 goda. – Kaliningrad: Baltijskij federal'nyj universitet imeni Immanuila Kanta, 2020. – S. 130-135. – EDN ROHSRS. [Ilia. S. Samarin, Sergey I. Koryagin, Vladimir. N. Leitsin, Sergey V. Buylov. Assessment of the degree of degradation of materials of hull structures of ships and vessels by X-ray computed tomography. Innovative engineering technologies in the transport complex: Materials of the XI International Scientific and Technical Conference of the Association of Engineering Technologists, Kaliningrad, September 10-13, 2019. - Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2020. - p. 130-135. – EDN ROHSRS.]
3. Muru G.N., Korjagin S.I., Bujlov S.V., Sutyryn V.I. Metodologija prognozirovaniya tehničeskogo sostojaniya korpusa sudna na osnove primenenija konečno-jelementnoj modeli. Innovacionnye tehnologii mashinostroenija v transportnom komplekse : Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii asociacii tehnologov-mashinostroitelej, Kaliningrad, 10–13 sentjabrja 2019 goda. – Kaliningrad: Baltijskij federal'nyj universitet imeni Immanuila Kanta, 2020. – S. 217-222. – EDN XKNEMV. [Georgy N. Muru, Sergey I. Koryagin, Sergey V. Buylov, Valery I. Sutyryn V.I. Methodology for predicting the technical condition of the ship's hull based on the use of a finite element model. Innovative engineering technologies in the transport complex: Materials of the XI International Scientific and Technical Conference of the Association of Engineering Technologists, Kaliningrad, September 10-13, 2019. - Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2020. - p. 217-222. – EDN XKNEMV.]
4. Muru G.N., Bujlov S.V., Sutyryn V.I., Jarisov V.V. Prognozyne ocenki reakcij na ledovye nagruzki jekspluatiruemogo korpusa sudna na osnove primenenija prostranstvennoj konečno-jelementnoj modeli. Transport i servis. – 2020. – № 8. – S. 61-72. – EDN ASTFFM. [Predictive estimates of reactions to ice loads of the ship's operational hull based on the use of a spatial finite element model. Georgy N. Muru, Sergey V. Buylov, Valery I. Sutyryn, Vladimir V. Yarisov. Transport and service. – 2020. – № 8. - p. 61-72 – EDN ASTFFM.]
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part XVIII - Common structural rules for bulk carriers and oil tankers Российского морского регистра судоходства (ND №2-020101-087-E), 2016.
6. Li Sun A, Deyu Wang New rational-based optimal design strategy of ship structure based on multi-level analysis and super-element modeling method. //Journal of Marine Science and Application (2011) 10: 272-280.
7. Ahmad Fauzan Zakki, Sarjito Joko Sisworo. Hull Girder Ultimate Strength Analysis of 17500 LTDW Oil Tanker under the Combined Global and Local Load using Explicit Finite Element Analysis ISOCEEN-2022 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1198 (2023) 012003 IOP Publishing
8. Do Van Doan, Lech Murawski. CALCULATION RELIABILITY OF NATURAL VIBRATIONS OF SHIP HULL AND SUPERSTRUCTURE //Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 26, No. 1 2019
9. Sutyryn V.I. Metod kondensacii v praktike modal'nogo analiza korpusa sudna s primeneniem prostranstvennoj konečno- jelementnoj modeli. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2019. –Special'nyj vypusk 1. - S.162-169 Valery I. Sutyryn. Condensation method in the practice of modal analysis of the ship's hull using a spatial finite element model. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2019. -Special releases1.- p.162-169]
10. Artjoms Kuznecovs, Martin Schreuder, Jonas W. Ringsberg Methodology for the simulation of a ship's damage stability and ultimate strength conditions following a collision // Marine Structure 70 (2021) 103027
11. Muru G.N., Sutyryn V.I. Puti povyshenija jeffektivnosti inženernogo analiza korpusov sudov s primeneniem prostranstvennyh konečno- jelementnyh modelej. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2020. -T.3.- № 393.- S.37-44 [Georgy N. Muru., Valery I. Sutyryn Ways to improve the efficiency of engineering analysis of ship hulls using spatial finite-element models. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2020. -V.3.- No. 393.- p.37-44]
12. Sutyryn V.I. Logisticheskie aspekty avtomatizirovannogo inženernogo analiza v sisteme tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta sudovyh korpusnyh konstrukcij //Sudostroenie. -2015.- №5 (812). - s.51-58 [S Valery I. Sutyryn Logistic aspects of automated engineering analysis in the system of maintenance and repair of ship hull structures //Shipbuilding -2015.- No. 5 (812).- p.51-58]
13. Jinju Cuia, Deyu Wang, Ning Ma. A study of container ship structures' ultimate strength under corrosion effects // Ocean Engineering 130 (2017)454-470
14. S. Saad-Eldeen, Y. Garbatov, C. Guedes Soares Effect of corrosion severity on the ultimate strength of a steel box girder //Engineering Structures 49 (2013) 560-571
15. Muhammad Zubair Muis Alie Residual Strength Analysis of Asymmetrically Damaged Ship Hull Girder using Beam Finite Element Method //Makara J. Technol. 20/1 (2016), 7-12
16. Christopher J. Stulla, Christopher J. Earlsb, Phaeton-Stelios Koutsourelakis. Model-based structural health monitoring of naval ship hulls // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 200 (2011) 1137–1149
17. Duygu Saydam, Dan M. Frangopol Performance assessment of damaged ship hulls // Ocean Engineering 98 (2013) 65- 76
18. Abdi Ismail, Achmad Zubaydi, Bambang Pisceca, Rizky Chandra Ariesta, Tuswan Vibration-based damage identification for ship sandwich plate using finite element method / // Open Eng. 2020; 10:744–752
19. Zhe Chen, Chao Ding, Zhen Liu, Shilin Sun Finite element simulation analysis of vibration transmission characteristics of double shell based on ANSYS //Journal of Physics: Conference Series 2730

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Муру Георгий Николаевич, кандидат технических наук, Генеральный директор, АО «51 Центральный Конструкторско - Технологический Институт Судоремонта», 190121, Санкт-Петербург Английская набережная д.38, e-mail: office@51cktis.ru

Georgy N. Muru, Ph.D. (Eng), General Director, JSC "51 Central Design and Technological Institute of Ship Repair," 190121, St. Petersburg English Embankment, 38, e-mail: office@51cktis.ru

Сутырин Валерий Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта", 236041, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: vsutyurin@mail.ru.

Valery I. Sutyurin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Russia, Kaliningrad, A. Nevsky St., 14, e-mail: vsutyurin@mail.ru.

Буйлов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта", 236041, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: bsv2552@yandex.ru

Sergey V. Buylov, Ph.D. (Eng), Associate Professor, assistant professor of Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Russia, Kaliningrad, A. Nevsky St., 14, e-mail: bsv2552@yandex.ru

Корягин Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта", 236041, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru.

Sergey I. Koryagin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Immanuel Kant Baltic Federal University, 236041, Russia, Kaliningrad, A. Nevsky St., 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Шинкаренко Иван Александрович, АО «Прибалтийский судостроительный завод «Янтарь», 236005, Россия, г. Калининград, Площадь Гуськова, 1, e-mail: van-125@mail.ru

Ivan A. Shinkarenko, JSC "Baltic Shipyard "Yantar", 236005, Russia, Kaliningrad, Guskova Square, 1, e-mail: van-125@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 10.11.2025.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 539.42:62-192

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.082>

Оценка надежности конструкций морской техники по критерию усталостной трещиностойкости

Миронов А.А.¹ miran56@mail.ru, Кикеев В.А.¹ vkikeev@mail.ru, Романов А.Д.¹ nil-150@yandex.ru

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Рассмотрена задача оценки вероятности безотказной работы конструкций со сквозными усталостными трещинами при случайном характере начальных размеров трещин и параметров циклической трещиностойкости материала. Приняты экстремальный и эксплуатационный уровни расчетных напряжений, связанные с обеспеченностью высоты волн. В отличие от приближенных подходов решение поставленной задачи получено с использованием метода условных функций надежности. Показана необходимость использования моделей роста усталостных трещин, учитывающих особенности их развития в пороговой области. Расчеты выполнены для литературных данных статистической обработки результатов неразрушающего контроля сварных соединений судовых конструкций. Расчетная модель учитывает множественный характер дефектов и позволяет по статистическим данным дефектности сварных швов, выполненных различными методами, обосновать необходимость частичного или полного контроля соединений в зависимости от их протяженности и нагруженности.

Ключевые слова: рост усталостных трещин, вероятность безотказной работы, метод условных функций надежности

Для цитирования: Миронов А.А., Кикеев В.А., Романов А.Д. Оценка надежности конструкций морской техники по критерию усталостной трещиностойкости, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 104—110. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.082

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.082>

Estimation of the reliability of marine engineering structures by the criterion of fatigue crack resistance

Anatoliy A. Mironov¹ miran56@mail.ru, Vasiliy A. Kikeev¹ vkikeev@mail.ru,

Alexey D. Romanov¹ nil-150@yandex.ru

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The problem of estimating the probability of trouble-free operation of structures with continuous fatigue cracks with a random nature of the initial crack sizes and parameters of cyclic crack resistance of the material is considered. The extreme and operational levels of design stresses associated with the provision of wave height have been adopted. In contrast to approximate approaches, the solution of the problem was obtained using the method of conditional reliability functions. The necessity of using models of fatigue crack growth, taking into account the features of their development in the threshold region, is shown. The calculations were performed for the literature data of statistical processing of the results of non-destructive testing of welded joints of ship structures. The calculation model takes into account the multiple nature of defects and allows, based on statistical data on the defects of welds made by various methods, to justify the need for partial or complete joint control, depending on their length and load.

Key words: growth of fatigue cracks, probability of trouble-free operation, method of conditional reliability functions

For citation: Anatoliy A. Mironov, Vasiliy A. Kikeev, Alexey D. Romanov, Estimation of the reliability of marine engineering structures by the criterion of fatigue crack resistance. Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 104—110. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.082

Введение

Обеспечение безопасности морской техники включает в себя проблему прогнозирования разрушения конструкций в результате роста усталостных трещин (РУТ) [1 - 3]. Усталостное разрушение конструкций носит вероятностный характер, что прежде всего обусловлено стохастичностью волновых нагрузок [4 - 6]. Следующим фактором является технологическая наследственность, определяющая наличие в

сварных элементах дефектов типа трещин и полей остаточных напряжений [7, 8]. Учет стохастичности прочности и ресурса конструкций введением коэффициентов запаса при детерминированной постановке задачи не в полной мере отражает влияние различных факторов на результаты расчетов. В последнее время наблюдается возрастающий интерес к анализу усталостной трещиностойкости конструкций морской техники в вероятностной постановке. В работе [9] с использованием метода статистических испытаний

Монте-Карло выполнено прогнозирование развития трещины усталости в сварном соединении корпуса ледокола при варьировании начального размера дефекта. Анализ надежности звена швартовой цепи плавучего морского сооружения при наличии поверхностной круговой трещины в условиях действия напряжений с долгосрочным распределением по закону Вейбулла проведен в работе [10].

Анализ работ по оценке надежности конструкций с усталостными трещинами из различных отраслей машиностроения показывает, что наиболее распространенной моделью роста трещин является уравнение Пэриса и его модификации [11 - 19]. В качестве случайных величин в рамках данной модели принимались параметры циклической трещиностойкости материала [11, 18], начальные размеры сквозных [11, 18] и поверхностных трещин [12, 14, 18], действующие напряжения [11, 10]. Данная модель не описывает пороговую область РУТ, оказывающую существенное влияние на ресурс конструкции, что следует отнести к ее недостаткам.

К наиболее часто используемым методам решения задач надежности в рассмотренных работах следует отнести прямой подход статистических испытаний Монте-Карло [9, 10, 14, 18, 19] и приближенные методы FORM [10, 11, 19] и SORM [10]. Перспективными направлениями являются привлечение байесовского подхода, позволяющего корректировать расчетную модель по результатам наблюдений [15, 16], и создание цифровых двойников на основе нейронных сетей [17].

В данной работе используется модель РУТ, описывающая полную кинетическую диаграмму РУТ, в рамках которой реализован метод условных функций надежности для оценки вероятности безотказной работы (ВБР) элементов конструкций со сквозными трещинами.

1. Расчетная модель

Случайный характер начальных размеров дефектов в сварных конструкциях обусловлен стохастичностью процессов не только сварки, но и измерения методами неразрушающего контроля. В общем случае законы распределения размеров дефектов, полученные по результатам дефектоскопии, требуют корректировки. Стохастическая связь между параметром Z , регистрируемым прибором контроля, и действительным размером дефекта Y в виде условной плотности распределения $f(z|y)$ приводит к зависимости между законами распределения $f_y(y)$ и $f_z(z)$, описываемой уравнением Фредгольма I рода [20]:

$$f_z(z) = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(z|y) f_y(y) dy.$$

Полученная из решения данного уравнения плотность распределения $f_y(y)$ преобразуется в плотность распределения размеров всех дефектов

$f_{y0}(y)$ с использованием функции вероятности обнаружения дефекта (ВОД) $P(y)$:

$$f_{y0}(y) = (f_y(y) / P(y)) \cdot (\lambda / \lambda_0),$$

где $\lambda_0 = \lambda \int_0^{\infty} f_y(y) / P(y) dy$ - число всех дефектов

на единицу длины участка контроля, λ - для обнаруженных дефектов. Плотность распределения $f_{y0}(y)$ принимается в качестве априорной для участков, не прошедших контроль.

В основу результатов, полученных в работе, положены данные публикации [7], содержащие обзор измерений дефектов изготовления для большого числа морских сооружений. Корректировка представленных данных с применением описанных выше методов не проводилась в виду отсутствия необходимой информации по средствам контроля.

Дефекты в виде трещин разделяются на поверхностные или внутренние и сквозные. Метод оценки надежности конструкций с поверхностными трещинами, определяемой вероятностью принадлежности начальных значений глубины и протяженности дефектов области их допустимых значений, граница которой строится численным моделированием траекторий фронта трещин, предложен в [21] и графически представлен на рис. 1.

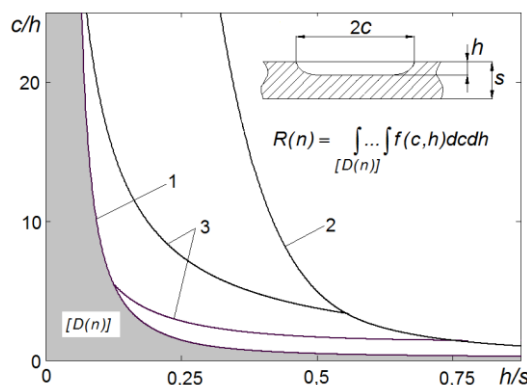


Рис. 1. Расчетная модель надежности для поверхностной трещины: 1 – граница допустимой области; 2 – граница предельной области; 3 – траектории фронта трещин

Результаты контроля часто содержат данные только о протяженности дефектов [7]. В этом случае расчетной моделью является сквозная трещина, в рамках которой может быть использован метод условных функций надежности, позволяющий выполнить учет большого числа случайных параметров [22].

Выражение для функции надежности, определяющей ВБР в зависимости от числа циклов нагружения n , имеет вид:

$$R(n) = P(N_c \geq n) = \int_n^{\infty} f_{N_c}(n_c) dn_c = 1 - \int_0^n f_{N_c}(n_c) dn_c, \quad (1)$$

где $N_c = \int_{l_0}^{l_c} v^{-1} dl$ - случайная величина (СВ) числа

циклов до разрушения; l_0 и l_c - начальная и критическая длины трещины; V - скорость РУТ.

В качестве выражения для V наиболее часто используется модель Пэриса $v = C_0(\Delta K)^{m_0}$. Для описания полной кинетической диаграммы РУТ принята модель, учитывающая пороговое K_{th} и критическое K_{fc} значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), предложенная в [23]:

$$R(n) = \int_{K_{th}^{min}}^{K_{th}^{max}} \int_{l_c^{min}}^{l_c^{max}} \int_{l_0}^{l_c} \left(1 - \int_0^n f_{N_c}(n_c | l_0, l_c, K_{th}) dn_c \right) f_{l_0}(l_0) f_{l_c}(l_c) f_{K_{th}}(K_{th}) dl_0 dl_c dK_{th} \quad (4)$$

где l_c - определяется из критерия разрушения, в качестве которого для листовых конструкций со сквозными трещинами можно принять критерий Ирвина $K_{max} = K_{fc}$, что дает

$$f_{l_c}(l_c) = f_{K_{fc}}(l_c(K_{fc})) |dK_{fc} / dl_c|.$$

Значения КИН, входящие в (2), определяются выражением $K = \sigma \sqrt{\pi l} \Phi$, в котором функция Φ учитывает геометрию конструкции, а напряжение σ в общем случае имеет стохастическую природу, связанную с волнением, и требует решения задачи статистической динамики [1, 2]. В данном исследовании используется нормативный подход [24], в рамках которого вводятся два уровня напряжений - экстремальный, соответствующий высоте волны с долговременной обеспеченностью $P = 10^{-8}$, и эксплуатационный с $P = 10^{-3}$.

Экстремальный уровень напряжений σ_{extr} определяет условие разрушения и соответствующий критический размер трещины l_c , эксплуатационный уровень σ_{oper} используется для расчета скорости РУТ. Приближенный учет случайного характера σ_{oper} может быть учтен введением эквивалентной его величины, отражающей гипотезу линейного суммирования повреждений для линейного участка диаграммы РУТ, и определяемой выражением

$$\sigma_{oper}^{eq} = \left[\int_0^\infty \sigma^m f_\sigma(\sigma) d\sigma \right]^{1/m}, \text{ где } f_\sigma(\sigma) - \text{плотность}$$

распределения эксплуатационного напряжения, соответствующая закону Вейбулла [2]. Данный подход является консервативным и не учитывает влияние последовательности циклов, связанное с проявлением эффекта перегрузки, но в тоже время, как показывают исследования [25], приводит к приемлемым результатам.

Выражение (4) определяет ВБР при наличии в конструкции одного дефекта. Одним из показателей множественного характер дефектности является

$$v = C \left[K_{max}^2 (\Delta K^2 - \Delta K_{th}^2) / (K_{fc}^4 - K_{max}^4) \right]^m. \quad (2)$$

При условии, что все параметры модели РУТ, кроме C , являются детерминированными величинами, получим условную плотность распределения СВ N_c :

$$f_{N_c}(n_c | l_0, \dots) = f_c(C(n_c)) \cdot |dC / dN_c|, \quad (3)$$

$$\text{где } C(n_c) = \frac{1}{n_c} \int_{l_0}^{l_c} v^{-1} dl, \quad \bar{v} = v / C.$$

С учетом стохастичности величин C , l_0 , K_{fc} , K_{th} выражение (1) для ВБР примет вид:

параметр λ , определяющий среднее число дефектов, приходящихся на единицу длины участка контроля [7]. Для определения вероятности появления K дефектов на участке длиной X используется закон распределения Пуассона $\Pi_k(x) = (\lambda x)^k \exp(-\lambda x) / k!$. В рамках последовательной схемы зависимости отказов использование формулы полной вероятности для участка протяженностью X с одинаковыми условиями нагружения приводит к выражению ВБР в

$$\text{виде } R(n, x) = \sum_{k=0}^{\infty} \Pi_k(x) R^k(n) = e^{-\lambda x [1 - R(n)]}, \text{ где}$$

$R(n)$ определяется по зависимости (4).

2. Результаты расчетов

Выполнен сравнительный анализ моделей РУТ в виде зависимости Пэриса и формулы (2) при варьировании математического ожидания m_{l_0} СВ начальной длины трещины, распределенной по нормальному закону. Результаты расчетов, полученные при $m_{l_0} / m_{l_{th}} = 1; 1,5; 2$, где $m_{l_{th}} = (K_{th} / \sigma)^2 / \pi$ и представленные на рис. 2, показывают существенную зависимость оценки ВБР от выбора модели РУТ.

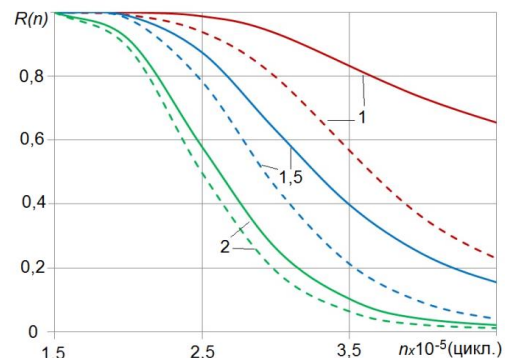


Рис. 2. Влияние модели РУТ на ВБР: --- Пэрис; — модель (2) (цифры указывают отношение $m_{l_0} / m_{l_{th}}$)

В дальнейших расчетах использовалась модель РУТ, определяемая зависимостью (2) с показателем степени $m=0,68$ и коэффициентом C , распределенным по нормальному закону с параметрами $m_C=5,75 \cdot 10^{-6}$ и $\sigma_C=10^{-6}$. Выполнен анализ случаев развития краевой и центральной трещин. Распределение СВ начальной длины трещины принято по данным [7] в виде логарифмически нормального закона с параметрами $\mu_{l_0}=3,12$ и $\sigma_{l_0}=0,8$. Для СВ K_{th} и K_{fc} использован нормальный закон с математическими ожиданиями $m_{K_{th}}=6$ МПам^{0,5}, $m_{K_{fc}}=70$ МПам^{0,5} и коэффициентом вариации 0,15.

В качестве максимального значения σ_{extr} принято напряжение по условию предельной прочности, равное $\sigma_{extr}^{max}=230$ МПа. Соответствующее значение $\sigma_{oper}^{max}=110$ МПа определяется отношением расчетных высот волн с обеспеченностями $P=10^{-8}$ и $P=10^{-3}$. Расчеты $R(n)$ для случая одного дефекта выполнены при варьировании значений σ_{extr} и σ_{oper} относительно их максимальных значений с коэффициентами 1, 0,8, 0,6, 0,4, которые указаны на соответствующих кривых результатов, представленных на рис. 3 а. Зависимости ВБР от протяженности участка шва при значении $\lambda=0,045$ 1/м [7] и различном числе циклов нагружения приведены на рис. 3 б.

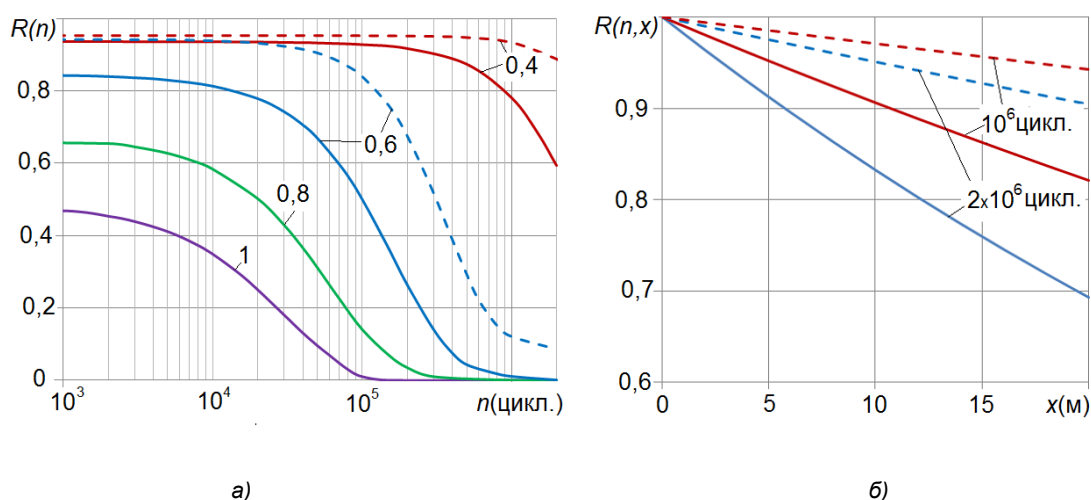


Рис. 3. Зависимость ВБР от числа циклов нагружения а) и протяженности шва б): — краевая трещина; --- центральная трещина

Заключение

В результате выполненного исследования в отличие от приближенных методов вычисления ВБР для случая сквозных усталостных трещин разработан подход, основанный на методе условных функций надежности. Выполнен учет случайного характера начальных размеров трещин и параметров циклической трещиностойкости материала. Показано, что для начальных размеров трещин, соответствующих пороговой области их развития необходимо использовать модели РУТ,

позволяющие учитывать пороговое значение КИН. Результаты расчетов, выполненных на основе литературных данных по дефектности сварных швов судовых конструкций, показывают возможность принятия на их основе решения о необходимом объеме контроля швов в зависимости от технологии сварки, протяженности соединений и уровня расчетного напряжения. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с учетом стохастического характера нагружения конструкций морской техники.

Литература

- Guidelines for Fatigue Assessment of Ships and Offshore Units. Bureau Veritas, Rule Note NI 611 DT R01 E, November 2020, 183 s.
- Guidance Notes on Fracture Analysis for Marine and Offshore Structures. American Bureau of Shipping, February 2022, 64 s.
- Петин С.В. Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990, 224 с.
- Corigliano P., Frisone F., Chianese C., Altosole M., Piscopo V., Scamardella A. Fatigue overview of ship structures under induced wave loads. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12, 1608. <https://doi.org/10.3390/jmse12091608>.
- Кондратьев С.И., Файвисович А.В. Прогнозирование влияния волновой нагрузки на рост трещин в конструктивных элементах судна. Морские интеллектуальные технологии, 2018, 1 (39), Т. 1, 140–147.

6. Lee M-S., Kim M-H. A new fatigue crack growth model considering underloads and overloads history together with stress ratio. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2022, 14, 100481. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2022.100481>.
7. Amirafshari P., Barltrop N., Wright M., Kolios A. Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 2021, Vol. 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>.
8. Amirafshari P., Kolios A. Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach. *International Journal of Fatigue*, 2022, Vol. 159, 106763. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106763>.
9. Zhao W., Leira B.J., Feng G., Gao C., Cui T. A reliability approach to fatigue crack propagation analysis of ship structures in polar regions. *Marine Structures*, 2021, Vol. 80, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103075>.
10. Lee C. H., Kim Y. Probabilistic flaw assessment of a surface crack in a mooring chain using the first- and second-order reliability method. *Marine Structures*, 2019, Vol. 63, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.09.003>.
11. Huang X., Aliabadi M. H., Khodaei Z. S. Fatigue Crack Growth Reliability Analysis by Stochastic Boundary Element Method. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2014, Vol. 102, № 4, 291–330. <https://doi.org/10.3970/cmesc.2014.102.291>.
12. Матвиенко Ю. Г., Кузьмин Д. А., Резников Д. О., Потапов В. В. Оценка вероятности усталостного разрушения конструктивных элементов с учетом статистического разброса механических характеристик прочности материала и остаточной дефектности. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2021, № 4, 26–36.
13. Nejad R. M., Liu Z., Ma W., Berto F. Reliability analysis of fatigue crack growth for rail steel under variable amplitude service loading conditions and wear. *International Journal of Fatigue*, 2021, Vol. 152, 106450. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106450>.
14. Koteš P., Vičcan J. Influence of Fatigue Crack Formation and Propagation on Reliability of Steel Members. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, 11562. <https://doi.org/10.3390/app112311562>.
15. Wang T., Bahrami Z., Renaud G., Yang C., Liao M., Liu Z. A probabilistic model for fatigue crack growth prediction based on closed-form solution. *Structures*, 2022, Vol. 44, 1583–1596. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.066>.
16. Li G., Liu J., Zhou H., Zuo L., Ding S. Efficient Numerical Integration Algorithm of Probabilistic Risk Assessment for Aero-Engine Rotors Considering In-Service Inspection Uncertainties. *Aerospace*, 2022, Vol. 9, 525. <https://doi.org/10.3390/aerospace9090525>.
17. Chen S., Ma Y., Wang Z., Liu M., Wu Z. Fatigue Crack and Residual Life Prediction Based on an Adaptive Dynamic Bayesian Network. *Applied Sciences*, 2024, Vol. 14, 3808. <https://doi.org/10.3390/app14093808>.
18. Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Резников Д.О. Вероятностный подход к описанию кинетики трещин и усталостного разрушения конструктивных элементов с учетом эффекта торможения трещин после перегрузок. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2022, Т. 88, № 5, 42–50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-5-42-50>.
19. Zhuang M., Morse L., Sharif Khodaei Z., Aliabadi M.H. Reliability analysis of fatigue crack growth in shallow shell structures using the Dual Boundary Element Method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, Vol. 131, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104403>.
20. Миронов А.А. Анализ данных неразрушающего контроля с учетом их стохастичности. *Дефектоскопия*, 2015, № 3, 45–50.
21. Миронов А.А., Горбачев А.С. Использование результатов неразрушающего контроля для оценки надежности сосудов давления в условиях циклического нагружения. *Контроль. Диагностика*, 2012, № 1, 49–52.
22. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984, 312 с.
23. Миронов А.А., Кикеев В.А. Расчетная оценка влияния асимметрии цикла нагружения на рост усталостных трещин в припороговой области. *Морские интеллектуальные технологии*, 2024, №3, ч. 1, 72–80. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.65.3.025>.
24. НД № 2-139902-016. Сборник нормативно-методических материалов. Российский морской регистр судоходства, 2002, 150 с.
25. Савкин А.Н., Андроник А.В., Бадиков К.А., Седов А.А. Исследование кинетики роста усталостных трещин в сталях в зависимости от характера переменного нагружения. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2018, Т. 84, № 3, 43–51. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-3-43-51>.

References

1. Guidelines for Fatigue Assessment of Ships and Offshore Units. Bureau Veritas, Rule Note NI 611 DT R01 E, November 2020, 183 s.
2. Guidance Notes on Fracture Analysis for Marine and Offshore Structures. American Bureau of Shipping, February 2022, 64 s.
3. Petinov S.V. Osnovy inzhenernykh raschetov ustalosti sudovykh konstruksiy [Fundamentals of engineering calculations of fatigue of ship structures]. L.: Sudostroenie, 1990, 224 s.
4. Corigliano P., Frisone F., Chianese C., Altosole M., Piscopo V., Scamardella A. Fatigue overview of ship structures under induced wave loads. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12, 1608. <https://doi.org/10.3390/jmse12091608>.
5. Kondrat'ev S.I., Fajvisovich A.V. Prognozirovanie vlianiya volnovoj nagruzki na rost treshhin v konstruktivnykh jelementah sudna [Forecasting the effect of wave loading on the growth of cracks in the structural elements of the vessel]. *Morskie intelektual'nye tehnologii*, 2018, 1 (39), Т. 1, 140–147.

6. Lee M-S., Kim M-H. A new fatigue crack growth model considering underloads and overloads history together with stress ratio. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2022, 14, 100481. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2022.100481>.
7. Amirafshari P., Barltrop N., Wright M., Kolios A. Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 2021, Vol. 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>.
8. Amirafshari P., Kolios A. Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach. *International Journal of Fatigue*, 2022, Vol. 159, 106763. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106763>.
9. Zhao W., Leira B.J., Feng G., Gao C., Cui T. A reliability approach to fatigue crack propagation analysis of ship structures in polar regions. *Marine Structures*, 2021, Vol. 80, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103075>.
10. Lee C. H., Kim Y. Probabilistic flaw assessment of a surface crack in a mooring chain using the first- and second-order reliability method. *Marine Structures*, 2019, Vol. 63, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.09.003>.
11. Huang X., Aliabadi M. H., Khodaei Z. S. Fatigue Crack Growth Reliability Analysis by Stochastic Boundary Element Method. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2014, Vol. 102, № 4, 291–330. <https://doi.org/10.3970/cmescs.2014.102.291>.
12. Matvienko Yu. G., Kuz'min D. A., Reznikov D. O., Potapov V. V. Otsenka veroyatnosti ustalostnogo razrusheniya konstruktivnykh elementov s uchetom statisticheskogo razbrosa mekhanicheskikh kharakteristik prochnosti materiala i ostatnochnoy defektnosti [Estimation of the probability of fatigue failure of structural elements, taking into account the statistical variation of the mechanical characteristics of material strength and residual defects]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2021, № 4, 26–36.
13. Nejad R. M., Liu Z., Ma W., Berto F. Reliability analysis of fatigue crack growth for rail steel under variable amplitude service loading conditions and wear. *International Journal of Fatigue*, 2021, Vol. 152, 106450. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106450>.
14. Koteš P.; Vičan J. Influence of Fatigue Crack Formation and Propagation on Reliability of Steel Members. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, 11562. <https://doi.org/10.3390/app112311562>.
15. Wang T., Bahrami Z., Renaud G., Yang C., Liao M., Liu Z. A probabilistic model for fatigue crack growth prediction based on closed-form solution. *Structures*, 2022, Vol. 44, 1583–1596. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.066>.
16. Li G., Liu J., Zhou H., Zuo L., Ding S. Efficient Numerical Integration Algorithm of Probabilistic Risk Assessment for Aero-Engine Rotors Considering In-Service Inspection Uncertainties. *Aerospace*, 2022, Vol. 9, 525. <https://doi.org/10.3390/aerospace9090525>.
17. Chen S., Ma Y., Wang Z., Liu M., Wu Z. Fatigue Crack and Residual Life Prediction Based on an Adaptive Dynamic Bayesian Network. *Applied Sciences*, 2024, Vol. 14, 3808. <https://doi.org/10.3390/app14093808>.
18. Makhutov N.A., Matvienko Yu.G., Reznikov D.O. Veroyatnostnyy podkhod k opisaniyu kinetiki treshchin i ustalostnogo razrusheniya konstruktivnykh elementov s uchetom effekta tormozheniya treshchin posle peregruzok [Probabilistic approach to describing the kinetics of cracks and fatigue failure of structural elements, taking into account the effect of crack braking after overloads]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, T. 88, № 5, 42–50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-5-42-50>.
19. Zhuang M., Morse L., Sharif Khodaei Z., Aliabadi M.H. Reliability analysis of fatigue crack growth in shallow shell structures using the Dual Boundary Element Method. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, Vol. 131, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104403>.
20. Mironov A.A. Analiz dannykh nerazrushayushchego kontrolya s uchetom ikh stokhastichnosti [Analysis of non-destructive testing data taking into account their stochasticity]. *Defektoskopiya*, 2015, № 3, 45–50.
21. Mironov A.A., Gorbachev A.S. Ispol'zovanie rezul'tatov nerazrushayushchego kontrolya dlya otsenki nadezhnosti sosudov davleniya v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya [Using the results of non-destructive testing to assess the reliability of pressure vessels under cyclic loading conditions]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2012, № 1, 49–52.
22. Bolotin V.V. Prognozirovanie resursa mashin i konstruktсий [Forecasting the resource of machines and structures]. M.: Mashinostroenie, 1984, 312 s.
23. Mironov A.A., Kikeev V.A. Raschetnaya otsenka vliyaniya asimmetrii tsikla nagruzheniya na rost ustalostnykh treshchin v priporogovoy oblasti [Calculation of impact of asymmetry of the loading cycle on fatigue crack growth in the near-threshold regime]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2024, №3, p. 1, 72-80. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.65.3.025>.
24. ND № 2-139902-016. Sbornik normativno-metodicheskikh materialov [Collection of normative and methodological materials]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2002, 150 s.
25. Savkin A.N., Andronik A.V., Badikov K.A., Sedov A.A. Issledovanie kinetiki rosta ustalostnykh treshchin v stalyakh v zavisimosti ot kharaktera peremennogo nagruzheniya [Investigation of the kinetics of fatigue crack growth in steels depending on the nature of variable loading]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, T. 84, № 3, 43-51. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-3-43-51>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Миронов Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры аэрогидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24, e-mail: miran56@mail.ru

Кикеев Василий Андреевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой аэрогидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24, e-mail: vkikeev@mail.ru

Романов Алексей Дмитриевич, аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24, e-mail: nil-150@yandex.ru

Anatoly A. Mironov, Dr.Sci. (Eng), Assistant Professor, Professor of the Department of aerohydrodynamics, strength of machines and materials, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev, Minina str. 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russia. e-mail: miran56@mail.ru

Vasily A. Kikeev, Ph.D. (Eng), Head of the Department of aerohydrodynamics, strength of machines and materials, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev, Minina str. 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russia. e-mail: vkikeev@mail.ru

Alexey D. Romanov, graduate student, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev, Minina str. 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russia. e-mail: nil-150@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 30.10.2025.

Научная статья

УДК 519.876.5:551.467

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.083>**Теоретические основы математического моделирования локального дрейфа льда на основе метода дискретных элементов**Крупина Н.А.¹ olks@aari.ru, Савицкая А.В.¹ savanna@aari.ru, Клячкин С.В.¹ svkl@aari.ru,
Пацева П.В.¹ pvpatseva@aari.ru¹ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Аннотация. В рамках проекта 5.1 Плана выполнения научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета на 2020–2024 гг. велась разработка интерактивной системы прогнозирования локального дрейфа на основе метода дискретных элементов, применимую для ключевых участков арктического шельфа. Задачей данной системы является обеспечение возможности учета конкретной ледовой обстановки и гидрометеорологических параметров на заданной акватории. Это необходимо для своевременного прогнозирования ледовых условий, в том числе экстремальных, в непосредственной близости от инженерных объектов, и в конечном счете для снижения рисков, связанных с воздействием льда, при их эксплуатации. Была создана первая версия программного обеспечения, в рамках которой реализованы: алгоритм постановки начальных условий по ледяному покрову, который имитируется как множество дискретных элементов, алгоритмы усвоения гидрометеорологических данных, требуемых для расчетов дрейфа, а также алгоритмы решения системы уравнений движения каждой отдельной льдины.

Ключевые слова: дрейф льда, математическое моделирование, ледовый режим, гидрологический режим, метод дискретных элементов, сплоченность льда.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках НИТР 5.1.1 Росгидромета на 2020–2024 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей».

Для цитирования: Крупина Н.А., Савицкая А.В., Клячкин С.В., Пацева П.В. Теоретические основы математического моделирования локального дрейфа льда на основе метода дискретных элементов, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 111–116. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.083

Original articleDOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.083>**Theoretical foundations of mathematical modeling of local ice drift based on the discrete element method**Nina A. Krupina¹ olks@aari.ru, Anna V. Savitskaya¹ savanna@aari.ru, Sergey V. Klyachkin¹ svkl@aari.ru,
Polina V. Patseva¹ pvpatseva@aari.ru¹State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. Within the framework of project 5.1 of the Plan for the implementation of scientific research and technological work of Roshydromet for 2020–2024, an interactive system for forecasting local ice drift based on the discrete element method was developed, applicable to key areas of the Arctic shelf. The purpose of this system is to ensure the ability to take into account specific ice conditions and hydrometeorological parameters in a given water area. This is necessary for timely forecasting of ice conditions, including extreme ones, near engineering facilities, and ultimately to reduce the risks associated with the impact of ice during their operation. The first version of the software was created, within the framework of which the following were implemented: an algorithm for stating the initial conditions of ice cover using the discrete element method, algorithms for assimilating hydrometeorological data required for drift calculations, as well as algorithms for solving the system of equations of motion of each individual ice floe.

Key words: ice drift, mathematical modelling, Ob bay, sea ice regime, hydrological regime, discrete elements, ice concentration.

Financial Support: The research was carried out within the framework of the scientific research and technology works 5.1.1 of Roshydromet for 2020–2024. “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of interaction of ice with natural objects and engineering structures for the Arctic and technologies for hydrometeorological provision of consumers”

For citation: Nina A. Krupina, Anna V. Savitskaya, Sergey V. Klyachkin, Polina V. Patseva, Theoretical foundations of mathematical modeling of local ice drift based on the discrete element method, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 111–116. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.083

Введение

Существующие численные модели дрейфа льда в большинстве своем ориентированы на большие акватории – моря, а то и Северный Ледовитый океан в целом (например, [1–6]). Модели локального дрейфа, как правило, требуются для решения инженерных задач. То есть в тех случаях, когда необходимо оценить движение каждой конкретной льдины. Примерами таких методов могут служить параметрическая модель, описанная в [7] для моделирования потенциальных разливов нефти, модель, предназначенная для использования в ледовом тренажере, описанная в [8], модели для оценки нагрузок на сооружения ([9–10]) и т.д.

Обзор доступных литературных источников, описывающих моделирование дрейфа льда методом дискретных элементов, показал, что до сих пор остается открытым вопрос расчета контактных сил при столкновении льдин друг с другом, и результата столкновения. Возможны варианты, когда в результате контакта одна или обе льдины разрушились, или

произошло раздробление льда на соприкасающихся краях льдин, или разрушение льда привело к торожению или наслоению льда, или льдины разошлись после взаимодействия. Для каждого из этих сценариев взаимодействия необходимо подобрать подходящий расчетный алгоритм для определения контактных сил.

Еще одним важным вопросом является геометрическая форма льдин. В большинстве алгоритмов льдины в горизонтальной плоскости описываются окружностью. Это позволяет моделировать большую сплоченность льда на акватории. Однако для более достоверного моделирования динамики каждой льдины и контактных взаимодействий, в разрабатываемом алгоритме в качестве элемента, описывающего льдину, используется призма с основаниями в виде равных неправильных многоугольников. Это повлечет за собой усложнение уравнений движения льдины и необходимость учета момента силы и вращения льдины относительно вертикальной оси, но в конечном счете движение каждой льдины будет моделироваться более корректно.

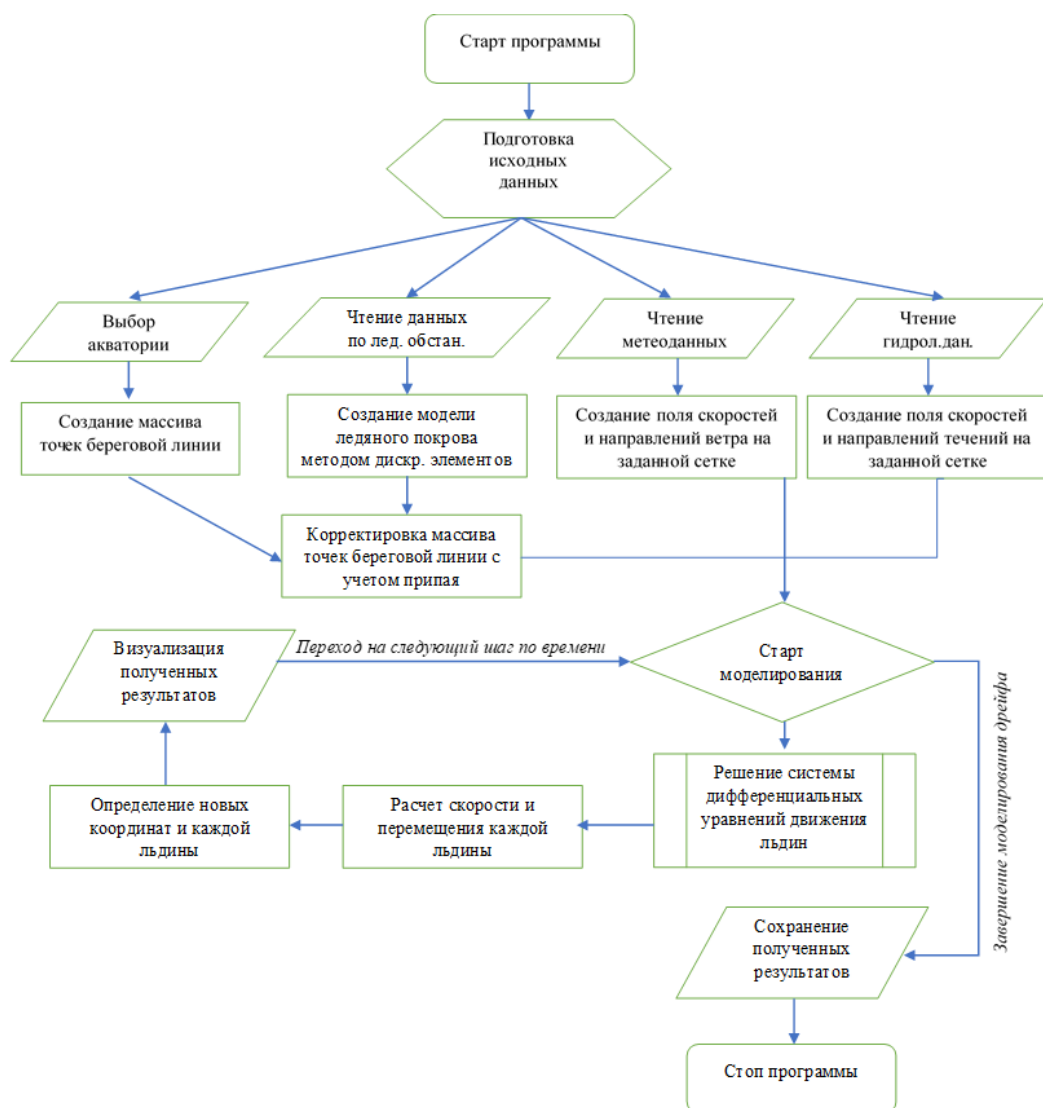


Рис. 1. Блок-схема алгоритма прогнозирования локального дрейфа на основе метода дискретных элементов

Описание алгоритма

Реализованный алгоритм в целом можно разделить на 4 блока:

- подготовка исходных данных по гидрометеорологическим условиям;
- постановка начальных условий по ледяному покрову;
- выполнение расчетов движения льдин под действием внешних факторов;
- визуализация результатов.

Блок схема алгоритма прогнозирования локального дрейфа на основе метода дискретных элементов представлена на рис. 1.

Алгоритм прогнозирования локального дрейфа на основе метода дискретных элементов заключается в последовательности следующих операций:

- определение границ заданной акватории в глобальной системе координат;
- получение исходной информации о ледовой обстановке;
- генерация массива отдельных льдин с заданными параметрами;
- постановка начальных условий по ледяному покрову путем размещения сгенерированных льдин на заданной акватории;
- формирование для заданной акватории поля скоростей и направлений ветра на сеточной области с шагом не более 1 км;
- формирование для заданной акватории поля скоростей и направлений течений на сеточной области с шагом не более 1 км;
- решение системы дифференциальных уравнений движения для каждой льдины, для определения ее скорости, ускорения, угла поворота и нового положения центра тяжести;
- анализ наличия зон контакта льдин между собой и с береговой линией или припаем, в случае наличия таких зон выполнение расчета контактных сил;
- визуализация результатов расчетов и их сохранение в выходной файл.

Подготовка начальных условий по ледяному покрову методом дискретных элементов

Основная идея имитации ледяного покрова методом дискретных элементов заключается в том, что сначала генерируется множество отдельных льдин, отвечающих определенным требованиям, а затем готовые льдины размещаются на заданной площади, обеспечивая требуемую сплоченность. При формировании множества отдельных льдин (дискретных элементов) соблюдаются заранее заданные параметры распределения площадей, горизонтальных размеров, а также сплоченность льда на рассматриваемой акватории. Принято допущение, что каждая льдина имеет форму многоугольника, вписанного в эллипс, причем количество углов варьируется случайным образом от 4 до 20, а характеристики эллипса соответствуют заданным параметрам распределения.

Доступны три варианта ввода информации о ледяном покрове. Во-первых, можно загрузить файл с готовой ледовой обстановкой, основанной,

например, на оцифровке снимка аэрофотосъемки, на котором видны формы и размеры каждой льдины. Второй способ подготовки данных по ледяному покрову – это использование информации, представленной в виде «овального символа» [11]. А третий вариант – это использование share-файлов, в которых обычно хранится информация ледовых карт. Фактически такая форма исходных данных отличается от «овального символа» тем, что заданная акватория может быть поделена на однородные ледовые зоны, границы которых также задаются в share-файле, и для каждой ледовой зоны ледовые условия описываются «овальным символом». Имитируется не только форма и размеры льдины в плане, но и ее толщина. При этом толщина льдины принимается равномерно распределенной величиной в пределах возрастной градации. В случае, если на рассматриваемой акватории наблюдается припай, то льдины распределяются на площади, ограниченной не береговой линией, а границей припая.

На рис. 2 показан пример подготовленного распределения льдин по расчетной акватории. В данном примере ледяной покров общей сплоченностью 8 баллов состоит из ледяных полей от больших до гигантских. При данном алгоритме льдины размещаются на акватории с учетом береговой линии таким образом, чтобы в начальный момент времени между ними не было пересечений, т.е. каждая льдина по периметру окружена водой. Для контроля этого условия льдины не закрашены, а отображены только контуром.

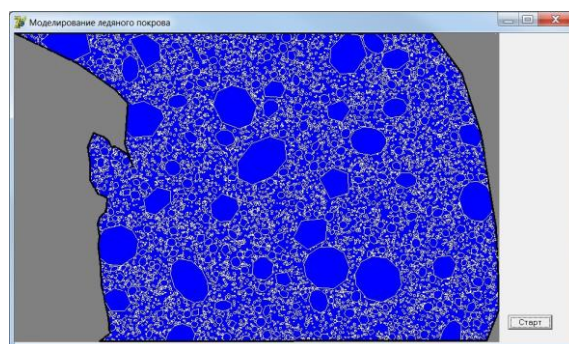


Рис. 2. Результат имитации ледяного покрова в северной части Обской губы методом дискретных элементов: поля и обломки полей, сплоченность – 8 баллов, общее количество льдин около 25000

В натуральных условиях часто встречается ледяной покров, образованный льдами различных форм, т.е. имеющих существенно различные размеры в плане. Например, он может состоять из ледяных полей (размеры льдин более 500 м), пространство между которыми заполнено мелкобитым льдом (размеры льдин до 20 м). В рамках описанного алгоритма не составляет труда имитировать полимодальные распределения площадей, что обеспечивает неограниченную гибкость модели. Наблюдается хорошее совпадение статистических функций распределения геометрических характеристик по натурным данным и по результатам имитации с помощью описанного алгоритма (см. рис. 3).

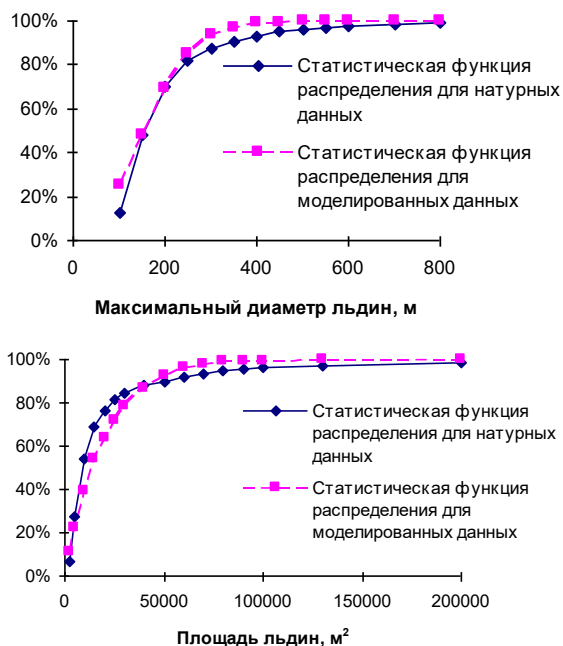


Рис. 3. Статистические функции распределения основных геометрических характеристик

При использовании алгоритма размещения исходные данные, являющиеся результатами обработки натуральных наблюдений, отражаются в явном виде на геометрии льдин, в то время как корреляционная функция исходного поля в явном виде при имитации ледяного покрова, т.е. при постановке начальных условий, не учитывается. Однако, выяснилось, что при совпадении основных характеристик натурального и имитированного ледяного покрова, их корреляционные функции также одинаковы, что является важным подтверждением работоспособности алгоритма.

Расчет движения льдин

Определяющими силами, влияющими на перемещение льдины, являются гидродинамическая (сила со стороны течения), аэродинамическая (сила ветра) и сила взаимодействия между льдинами. Для получения расчетных значений силы ветра необходимо задать скорость и направление приземного ветра. А для расчета силы течения – скорость и направление подледного течения. Эти данные задаются в узлах квадратной сетки с разным шагом. Подготовка исходных данных по гидрометеорологическим параметрам заключается в интерполяции всех данных на узлы заданной сетки.

Движение льдин описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$m_f \frac{d^2 X}{dt^2} = \tau_{ax} - \tau_{wx} + F_{cx} - F_{sx} - F_{gx} + F_{ix}$$

$$m_f \frac{d^2 Y}{dt^2} = \tau_{ay} - \tau_{wy} - F_{cy} - F_{sy} - F_{gy} + F_{iy},$$

$$I_f \frac{d^2 \psi}{dt^2} = M_i - M_d$$

где m_f – масса льдины; I_f – момент инерции льдины; X, Y – линейные перемещения центра тяжести льдины; τ_{ax}, τ_{ay} – касательные напряжения аэродинамических сил вдоль двух ортогональных осей; τ_{wx}, τ_{wy} – касательные напряжения гидродинамических сил вдоль двух ортогональных осей; F_{cx}, F_{cy} – проекции сила Кориолиса на две

ортогональные оси; F_{gx}, F_{gy} – проекции гравитационной силы на две ортогональные оси; F_{ix}, F_{iy} – проекции силы взаимодействия между льдинами или взаимодействия с берегом/припаем на две ортогональные оси.

Движение каждой льдины моделируется во временной области. Определяющими силами, влияющими на перемещение льдины, являются гидродинамическая (сила со стороны течения), аэродинамическая (сила ветра) и сила взаимодействия между льдинами.

Пользовательский интерфейс системы

Описанные выше алгоритмы были реализованы в виде программного обеспечения на языке Delphi. Для удобства использования ПО снабжено пользовательским интерфейсом. На рис.4 показан фрагмент процесса моделирования. На экран выводятся текущие средние значения скорости и направления дрейфа, что позволяет качественно оценить правдоподобность результатов расчета. Мгновенные значения скоростей и направлений дрейфа отображаются вектором красного цвета, выходящим из центра льдины. Стрелки скорости отображаются только для обширных ледяных полей. Перемещение льдин также отображается на экране. Перестройка картинки происходит не в каждом временном шаге моделирования, а 1 раз в минуту. Если центр льдины выходит за обозначенные границы акватории, то такая льдина исключается из дальнейшего рассмотрения. Если центр льдины оказывается за береговой линией или линией припая, то такая льдина также исключается из рассмотрения, считается, что ее скорость равна 0, однако, она не удаляется из массива и продолжает отображаться на экране. При взаимодействии льдин друг с другом, при возникновении значительных контактных усилий они могут дальше двигаться совместно. Разрушение льдин в процессе в взаимодействия в настоящее время не моделируется.

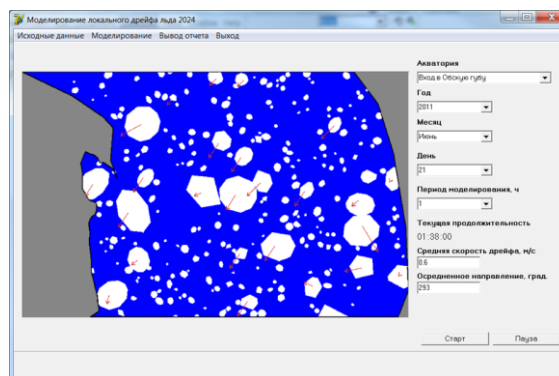


Рис. 4. Экран пользовательского интерфейса с пунктом меню "Моделирование"

На рис.4 показан разреженный ледяной покров сплоченностью 5 баллов. Расчетный алгоритм занимает продолжительное время. Как видно из рисунка продолжительность процесса составила меньше двух часов. Однако, это заняло больше 4 часов компьютерного времени. При рассмотрении акватории больших размеров или большей сплоченности льда затраты времени, необходимые на расчеты кратно возрастают. Поэтому для

использования данного ПО в оперативном режиме требуется компьютер большой производительности.

Заключение

1. Разработан алгоритм постановки начальных условий по ледяному покрову методом дискретных элементов с возможностью задания исходной информации тремя разными способами.

2. Разработан алгоритм расчета перемещения каждой льдины (дискретного элемента) под воздействием внешних гидрометеорологических факторов и сил взаимодействия между льдинами.

3. Подготовлена версия ПО для моделирования локального дрейфа льда для условий Обской губы.

4. Проведены пробные расчеты, которые показали работоспособность алгоритма в целом, однако необходима оптимизация внутренней структуры программного обеспечения для уменьшения продолжительности расчетов.

5. Область применения разработанного ПО – при планировании и обеспечении безопасности транспортных операций вблизи морских гидротехнических сооружений в ледовых условиях.

Литература

1. Lepparanta M. An Ice drift model for the Baltic Sea. //Tellus, 1981. No.33. Pp.583—596. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01783.x> (дата обращения 01.11.2020)
2. Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А. Численное моделирование дрейфа льда в Азовском море. //Метеорология и гидрология, 2012. № 6. —С.36—44.
3. Кулаков М.Ю., Ашик И.М., Фильчук К.А. Технология расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей //Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов, № 43, 2016. — С.114—132.
4. Ekeberg, O-Ch, Eik, K.J., Teigen, S.H. Ice drift speed in the Fram Strait — a comparison of measured and calculated ice drift speed // Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'2015), June 14-18, 2015. Trondheim, Norway. <http://www.poac.com/Papers/2015/pdf/poac15Final00245.pdf> (дата обращения 01.11.2020)
5. Alexanin, A.I., Stopkin, M.V., Kachur, V.A. Automatic Calculation of Ice Drift Based on AMSR Data. //Izv. Atmos. Ocean. Phys. № 3, 2017. —Pp.1123—1131.
6. Yan, Y., Gu, W., Xu, Y. et al. The in situ observation of modelled sea ice drift characteristics in the Bohai Sea //Acta Oceanol. Sin, 2019. № 38. —Pp.17—25.
7. Богдановский А.А., Рыбалко С.И., Аршинов И.А. Параметрическая модель дрейфа льда для условий восточного шельфа Сахалина // Сб. статей РЭА. —2009. —№ 1. —С.198—211.
8. Lubbad, R, Løset, S, Lu, W, Tsarau, A, & van den Berg, M. Simulator for Arctic Marine Structures (SAMS) //Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 8: Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology. Madrid, Spain. June 17—22, 2018. V008T07A020. ASME.
9. Tuhkuri J., Polojarvi A. A review of discrete element simulation of ice—structure interaction. //Phil. Trans.R.Soc.A 376: 2070335. —2018. <http://doi.org/10.1098/rsta.2017.0335> (дата обращения 01.1.2020).
10. Aksnes V., Bonnemaire B. Analysis of the behaviour of a moored ship in variable ice drift // Proc. of the 20th Int. Conf. POAC 09, June 9—12. Lulea, Sweden, 2009.
11. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Аркт. и антаркт. НИИ; [подгот. В. С. Ложиловым, К. П. Широковым]. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. — 56 с.

References

1. Lepparanta M. An Ice drift model for the Baltic Sea. //Tellus, 1981. No.33. Pp.583—596. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01783.x> (дата обращения 01.11.2020)
2. Bukatov A.E., Zav'yalov D.D., Solomakha T.A. Chislennoe modelirovanie dreyfa l'da v Azovskom more [Numerical simulation of ice drift in the Sea of Azov]. Meteorologiya i gidrologiya, 2012. № 6. S.36—44.
3. Kulakov M.Yu., Ashik I.M., Fil'chuk K.A. Tekhnologiya rascheta i kratkosrochnogo prognoza dreyfa l'da na akvatorii Severnogo Ledovitogo okeana i arkticheskikh morey [Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasting]. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov, № 43, 2016. S.114—132.
4. Ekeberg, O-Ch, Eik, K.J., Teigen, S.H. Ice drift speed in the Fram Strait — a comparison of measured and calculated ice drift speed // Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'2015), June 14-18, 2015. Trondheim, Norway. <http://www.poac.com/Papers/2015/pdf/poac15Final00245.pdf> (дата обращения 01.11.2020)
5. Alexanin, A.I., Stopkin, M.V., Kachur, V.A. Automatic Calculation of Ice Drift Based on AMSR Data. //Izv. Atmos. Ocean. Phys. № 3, 2017. —Pp.1123—1131.
6. Yan, Y., Gu, W., Xu, Y. et al. The in situ observation of modelled sea ice drift characteristics in the Bohai Sea //Acta Oceanol. Sin, 2019. № 38. —Pp.17—25.
7. Bogdanovskiy A.A., Rybalko S.I., Arshinov I.A. Parametricheskaya model' dreyfa l'da dlya usloviy vostochnogo shelfa Sakhalina [Parametric model of ice drift for the eastern shelf of Sakhalin island]. Sbornik statey REA. 2009. № 1. S.198—211.
8. Lubbad, R, Løset, S, Lu, W, Tsarau, A, & van den Berg, M. Simulator for Arctic Marine Structures (SAMS) //Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 8: Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology. Madrid, Spain. June 17—22, 2018. V008T07A020. ASME.

9. Tuhkuri J., Polojarvi A. A review of discrete element simulation of ice—structure interaction. //Phil. Trans.R.Soc.A 376: 2070335. —2018. <http://doi.org/10.1098/rsta.2017.0335> (дата обращения 01.1.2020).
10. Aksnes V., Bonnemaire B. Analysis of the behaviour of a moored ship in variable ice drift // Proc. of the 20th Int. Conf. POAC 09, June 9—12. Lulea, Sweden, 2009.
11. Mezhdunarodnaya simbolika dlya morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh l'dov. [International Symbols for Marine Ice Charts and Sea Ice Nomenclature] Arkicheskiy i antarkticheskiy NII; [podgotovlena. V. S. Loshchilovym, K. P. Shirokovym]. Leningrad, izd-vo Gidrometeoizdat, 1984. 56 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крупина Нина Артуровна, старший научный сотрудник, Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, РФ, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38 литера А, e-mail: olks@aari.ru

Nina A. Krupina, Senior Research Scientist, State Research Center “Arctic and Antarctic Research Institute”, 38 Bering Street, Liter A, Saint Petersburg, Russian Federation, 199397, e-mail: olks@aari.ru

Савицкая Анна Владимировна, научный сотрудник, Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, литера А, e-mail: savanna@aari.ru

Anna V. Savitskaya, Research Scientist, State Research Center “Arctic and Antarctic Research Institute”, 38 Bering Street, Liter A, Saint Petersburg, Russian Federation, 199397, e-mail: savanna@aari.ru

Клячкин Сергей Владимирович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, литера А, e-mail: svkl@aari.ru

Sergey V. Klyachkin, PhD (Eng), Senior Research Scientist, Head of the Laboratory, State Research Center “Arctic and Antarctic Research Institute”, 38 Bering Street, Liter A, Saint Petersburg, Russian Federation, 199397, e-mail: svkl@aari.ru

Пацева Полина Владимировна, младший научный сотрудник, Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, литера А, e-mail: pvpatseva@aari.ru

Polina V. Patseva, Junior Research Scientist, State Research Center “Arctic and Antarctic Research Institute”, 38 Bering Street, Liter A, Saint Petersburg, Russian Federation, 199397, e-mail: pvpatseva@aari.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 22.10.2025.
Принята к публикации/accepted for publication 12.11.2025.

Научная статья

УДК 629.561.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.084>**Определение ключевых режимов динамического изгиба ледяного покрова неподвижной в плане нагрузкой**Себин А.С.¹ SebinAndrei@gmail.com, Двойченко Ю.А.¹ edbas2@yandex.ru,Куркин А.А.¹ aakurkin@gmail.com¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Необходимость обеспечения коммерчески эффективных скоростей судов в сплошных льдах обуславливает актуальность перехода от традиционных квазистатических моделей взаимодействия судов со льдом к анализу динамических эффектов, возникающих при деформации ледяного покрова. Понимание динамики изгиба льда при поперечном нагружении является фундаментальной задачей для оценки ледовой ходкости и совершенствования методов экспериментальных исследований. В работе представлен теоретический анализ уравнения динамического изгиба ледяного покрова, моделируемого тонкой упругой пластиной на поверхности идеальной несжимаемой жидкости, под действием сосредоточенной нагрузки. С использованием интегрального преобразования Ханкеля задача переведена в спектральную область по волновым числам. Последующее приведение уравнения к безразмерному виду на основе теории подобия позволило выявить ключевые характерные масштабы задачи, включая длину, время, прогиб и силу, а также безразмерные критерии, определяющие физику процесса. В результате анализа безразмерных комплексов выполнена оценка относительного вклада инерции льда и присоединенных масс воды в баланс инерционных сил; показано доминирование последних в наиболее значимом диапазоне волновых чисел. Определены два ключевых критерия, имеющих прямое практическое значение. Во-первых, установлен показатель динамического характера процесса – характерная скорость изгиба, – позволяющий разграничить квазистатический и динамический режимы нагружения. Во-вторых, выведен критерий, определяющий, при каком отношении радиуса нагрузки к характерной длине изгиба распределенную нагрузку можно с заданной точностью аппроксимировать сосредоточенной силой. Полученные критерии применимы при планировании и интерпретации натурных и модельных экспериментов по разрушению льда.

Ключевые слова: ледяной покров, деформация льда, ледокол, динамика льда

Финансирование: Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия»).

Для цитирования: Себин А.С., Двойченко Ю.А., Куркин А.А., Определение ключевых режимов динамического изгиба ледяного покрова неподвижной в плане нагрузкой, Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 4 часть 2, С. 117—130. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.084

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.70.4.084>**Determining key indicators of dynamic bending regimes of ice cover under a non-movement load**Andrei S. Sebin¹ SebinAndrei@gmail.com, Yuri A. Dvoichenko¹ edbas2@yandex.ru,Andrei A. Kurkin¹ aakurkin@gmail.com¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The need to ensure commercially effective vessel speeds in level ice drives the transition from traditional quasi-static models of ship-ice interaction to the analysis of dynamic effects associated with ice cover deformation. Understanding ice bending dynamics under transverse loading is a fundamental task in assessing icebreaking capability and refining experimental research methods. This study presents a theoretical analysis of the dynamic bending equation for an ice cover, modeled as a thin elastic plate on the surface of an ideal incompressible fluid, under a concentrated load. The problem was transferred to the spectral domain by wavenumber using the Hankel integral transform. Subsequent non-dimensionalization, based on similarity theory, identified the key characteristic scales of the problem — including length, time, deflection, and force — along with the dimensionless criteria that govern the process physics. Analysis of the dimensionless complexes assessed the relative contributions of ice inertia and added water mass to the inertial force balance. The latter was shown to dominate in the most significant wavenumber range. Two key criteria of direct practical importance were determined. First, an indicator of the process's dynamic nature — the characteristic bending speed — was established, allowing distinction between quasi-static and dynamic loading regimes. Second, a criterion was derived determining the ratio of the load radius to the characteristic bending length at which a distributed load can be approximated as a concentrated force with a given accuracy. The derived criteria are applicable for planning and interpreting full-scale and model experiments on ice failure.

Key words: ice cover, ice deformation, icebreaker, ice dynamics

Financial Support: The presented results were obtained within the framework of the state assignment for scientific activities (Topic No. FSWE-2023-0004 "Nonlinear wave dynamics of the coastal zone under conditions of changing climate and anthropogenic impact").

For citation: Andrei S. Sebin, Yuri A. Dvoichenko, Andrei A. Kurkin, Determining key indicators of dynamic bending regimes of ice cover under a non-movement load, Marine intellectual technologies. 2025. № 4 part 2, P. 117—130. DOI: 10.37220/MIT.2025.70.4.084

Введение

Проведение исследований движения судов в сплошных льдах представляет собой сложную задачу, имеющую критическое значение для обеспечения безопасной и эффективной навигации в арктических и других замерзающих акваториях. Одним из фундаментальных аспектов этого взаимодействия является изгиб ледового поля под действием приложенной к нему поперечной нагрузки от корпуса судна. В исследованиях этого процесса, проводящихся в НГТУ им. Р.Е. Алексеева как с натурными [1], так и с модельными льдами [2], используется методологический подход, согласно которому к сплошному ледовому полю на малой площади прикладывается нагрузка, возрастающая вплоть до его полного пролома. Точное математическое описание этого процесса требует учета целого ряда физических факторов, включая упругие свойства льда, его инерцию, а также статическую и динамическую реакцию воды.

Большинство известных работ исследователей, занимавшихся изучением динамики ледяного покрова [3–9], в основном были сосредоточены на решении таких практически важных задач, как обеспечение безопасного движения нагрузки по льду, разрушение льда резонансным способом, работа на льду различных технических средств, производящих периодическое импульсное воздействие, распространение волн в морях, покрытых льдом, развитие методов численного моделирования взаимодействия льда и воды. До настоящего времени мало внимания уделялось исследованиям динамических явлений в сплошном ледовом поле, возникающих как при движении судов, так и при проведении лабораторных исследований по разрушению льда нагрузкой малой площади.

Традиционно задачи, связанные с взаимодействием судов со льдом, рассматривались в рамках квазистатических моделей [10]. Такой подход, предполагающий медленное изменение приложенных сил и пренебрежение инерционными явлениями, оказался эффективным для анализа движения судов с предельно малыми скоростями в толстых льдах и позволил построить фундамент теории разрушения ледяного покрова [11]. Тем не менее, с развитием арктической навигации заказчики начали предъявлять новые требования к судостроительной промышленности, связанные с созданием ледеколов, способных обеспечить коммерчески эффективную скорость движения транспортных судов в ледовых условиях [12; 13]. С повышением внимания к этим режимам плавания стали актуальными исследовательские задачи, направленные на изучение динамических эффектов, имеющих место при деформации и разрушении ледяного покрова.

Понимание этих явлений требует перехода к более сложным математическим моделям, учитывающим временную зависимость процессов и

инерционные силы. Введение в уравнения изгиба ледяного покрова динамических членов, отвечающих за инерцию льда и присоединённых масс воды, существенно увеличивает их сложность и количество входящих параметров. Для эффективного анализа таких многопараметрических систем и обеспечения возможности обобщения результатов экспериментальных исследований на физические процессы различного масштаба необходимо использовать методы теории подобия [14]. Преобразование исходных уравнений к безразмерному виду позволяет свести задачу к зависимости от ограниченного числа критериев, каждый из которых имеет четкую физическую интерпретацию.

1. Уравнение динамического изгиба ледяного покрова сосредоточенной нагрузкой

Для описания изгиба ледяного покрова воспользуемся теорией тонких упругих пластин [15]. В статических задачах вода, покрытая льдом, обычно рассматривается как упругое основание, но в тех случаях, когда интерес представляет динамика процесса, приходится привлекать уравнения гидродинамики, учитывающие распределение давлений в воде [4]. В осесимметричном случае, когда прогиб ледяной пластины зависит только от радиальной координаты r и времени t , уравнение изгиба представляет собой баланс вертикальных сил, действующих на элемент льда:

$$D\nabla^4 w(r,t) + m \frac{\partial^2 w(r,t)}{\partial t^2} - p_{st} w(r,t) - p_d(r,t) = q(r,t) \quad (1)$$

Члены, входящие в уравнение (1), иллюстрируют влияние различных факторов, имеющих определяющее значение для физики процесса. Первым из них является упругая реакция ледяного покрова, характеризуемая цилиндрической жесткостью:

$$D = \frac{E h_s^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

где E – модуль упругости льда; h_s – толщина льда; ν – коэффициент Пуассона льда.

Величина D определяет сопротивление пластины изгибу и зависит от упругих свойств материала и толщины пластины. В осесимметричных координатах вклад сил упругости в уравнение движения описывается первым членом в уравнении (1) $D\nabla^4 w(r,t)$, где $w(r)$ – прогиб пластины на расстоянии r от точки приложения силы, ∇^4 – бигармонический оператор, который в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right)^2 \quad (3)$$

Вторым важным фактором является инерция ледяного покрова, учитываемая вторым членом

$$m \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial t^2}, \text{ где } m = \rho_s h_s - \text{масса льда на единицу}$$

площади. Этот член отражает силы инерции, возникающие при вертикальном ускорении элементов ледяной пластины.

Третий и четвертый факторы связаны с реакцией идеальной несжимаемой жидкости, на поверхности которой покоится ледяной покров. Статическая реакция жидкости обусловлена архимедовой силой и пропорциональна величине прогиба льда $w(r, t)$, что выражается членом

$p_{st} w(r, t)$, где $p_{st} = -\rho_w g$ – статическое давление воды на лёд (архимедова сила плавучести), знак минус связан с тем, что вертикальная ось z задачи направлена вниз, ρ_w – плотность воды, а g – ускорение свободного падения. Динамическая реакция жидкости p_d , вызванная прогибом ледяного покрова, определяется давлением на пластину на уровне $z=0$. Строго говоря, в данном случае динамическое давление необходимо определять на нижней поверхности льда, т.е. при $z=w$. Обычно в задачах динамического изгиба [4] это допущение вводят с целью упрощения граничных условий и избавления от нелинейности в уравнении, что допустимо, т.к. прогибы пластины (и, следовательно, перемещение жидкости под ней) малы по сравнению с длинами волн и разницей между реальными значениями давлений на глубинах $z=0$ и $z=w$ можно пренебречь.

Движение идеальной несжимаемой жидкости описывается потенциалом скорости $\Phi(r, z, t)$, который удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$D \nabla^4 w(r, t) + \rho_s h_s \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial t^2} + \rho_w g w(r, t) + \rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{P(t) \delta(r)}{2\pi r} \quad (8)$$

Для дальнейшего анализа упростим вид уравнения (8), применив преобразование Ханкеля по радиальной координате r ко всем записанным ранее выражениям. Интегральное преобразование Ханкеля нулевого порядка для функции $f(r)$ даётся формулой [16]:

$$F(\xi) = \int_0^\infty r J_0(\xi r) f(r) dr, \quad (9)$$

где $J_0(\xi r)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, а ξ – переменная преобразования (пространственная частота). Обратное преобразование Ханкеля имеет вид:

$$f(r) = \int_0^\infty \xi J_0(\xi r) F(\xi) d\xi \quad (10)$$

Поле прогибов ледяного покрова $w(r, t)$ (для радиально-симметричной задачи) может быть разложено в спектр $W(\xi, t)$ и представлено как непрерывная сумма (интеграл) функций Бесселя $J_0(\xi r)$ с различными значениями радиального волнового числа ξ :

$$\nabla^2 \Phi = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi(r, z, t) = 0 \quad (4)$$

На поверхности воды ($z=0$) в линейном приближении выполняется кинематическое граничное условие, связывающее вертикальную скорость воды с вертикальной скоростью льда:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (5)$$

Динамическое давление на поверхности воды определяется линеаризованным уравнением Бернулли:

$$p_d(r, t) = -\rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (6)$$

Линеаризация уравнения Бернулли основана на предположении о малости деформаций ледяного покрова и скоростей движения жидкости.

В правой части уравнения (1) записана $q(r)$ – распределённая по поверхности льда нагрузка. Сосредоточенная нагрузка $P(t)$, приложенная в центре пластины ($r=0$) и рассматриваемая в данной задаче, может быть представлена как распределённая нагрузка с использованием дельта-функции Дирака в цилиндрических координатах:

$$q(r, t) = \frac{P(t) \delta(r)}{2\pi r} \quad (7)$$

Интеграл от этой распределённой нагрузки по любой площади, содержащей точку $r=0$, равен $P(t)$. В итоге, уравнение изгиба (1) имеет вид:

$$W(\xi, t) = \int_0^\infty r J_0(\xi r) w(r, t) dr \quad (11)$$

$$w(r, y) = \int_0^\infty \xi J_0(\xi r) W(\xi, t) d\xi$$

Из (11) видно, что каждая функция $J_0(\xi r)$ (при фиксированном ξ и меняющемся r) описывает определенный радиально-симметричный пространственный профиль, осциллирующий в радиальном направлении, который можно назвать пространственной модой, соответствующей волновому числу ξ . Оно определяет частоту её колебаний: чем больше ξ , тем чаще осцилляции по радиусу r . Функция $W(\xi, t)$ представляет собой распределение «весов» или «вкладов» каждой пространственной моды $J_0(\xi r)$ в поле прогибов $w(r, t)$ в каждый момент времени t .

Спектральное представление лапласиана в осесимметричных координатах (4) относительно r имеет вид [16]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \xi^2 \right) \Psi(\xi, z, t) = 0, \quad (12)$$

где $\Psi(\xi, z, t)$ – преобразование Ханкеля от потенциала $\Phi(r, z, t)$.

Преобразование граничного условия (5) приводит к соотношению:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (13)$$

Преобразование выражения для динамического давления (6) даёт ещё одно соотношение:

$$P_d(\xi, t) = -\rho_s \frac{\partial \Psi}{\partial t} \Big|_{z=0}, \quad (9)$$

где $P_d(\xi, t)$ – преобразование Ханкеля от $p_d(r, t)$.

Принимая во внимание, что $\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right)$, а также свойство преобразования Ханкеля [16]

$$H_0 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right\} = -\xi^2 W(\xi), \quad \text{бигармонический}$$

оператор (3) преобразуется в $\xi^4 W(\xi, t)$.

Преобразование члена $\rho_s g w(r, t)$ даёт [17]

$$\rho_s g W(\xi, t), \text{ а } m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \text{ преобразуется в } m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}.$$

Используя свойство дельта-функции [16]

$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) f(x) dx = f(0)$, а также тот факт, что вклад дельта-функции в значение интеграла происходит только в точке $r = 0$, преобразование сосредоточенной нагрузки (7) даёт

$Q(\xi, t) = \frac{P(t) J_0(0)}{2\pi} = \frac{P(t)}{2\pi}$. Таким образом, уравнение изгиба (1) в спектральном представлении по волновым числам имеет вид:

$$D \xi^4 W(\xi, t) + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}(\xi, t) + \rho_s g W(\xi, t) - P_d(\xi, t) = \frac{P(t)}{2\pi} \quad (15)$$

$$D \xi^4 W(\xi, t) + m \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} + \rho_s g W(\xi, t) - \frac{\rho_s}{\xi} \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} = \frac{P(t)}{2\pi} \quad (22)$$

2. Анализ полученного уравнения

Для дальнейшего анализа приведём уравнение (22) к безразмерному виду. Введём характерные параметры: L_c – характерная длина, T_c – характерное время, w_c – характерный прогиб, P_c – характерная сила, w_c – характерный параметр спектра прогиба льда, а также, основываясь на них, безразмерные переменные:

$$\begin{aligned} \bar{r} &= r/L_c, \quad \bar{t} = t/T_c, \quad \bar{w} = w/w_c, \\ \bar{\xi} &= \xi L_c, \quad \bar{W} = W/W_c, \quad \bar{P} = P/P_c \end{aligned} \quad (23)$$

Как было показано в [14], такого рода выражения, называемые безразмерными симплексами, инвариантны для подобных явлений (т.е. в данном случае всех деформированных ледяных пластин, описываемых уравнением (22)), например, $\bar{r} = \text{idem}$,

Общее решение уравнения (12) есть:

$$\Psi(\xi, z, t) = A(\xi, t) e^{\xi z} + B(\xi, t) e^{-\xi z} \quad (16)$$

Учитывая свойство преобразования Ханкеля с $\xi \geq 0$, видим, что для выполнения условия затухания потенциала с глубиной при $z \rightarrow \infty$ необходимо, чтобы $A(\xi, t) = 0$. Следовательно, для $\xi > 0$ решение (16) сводится к:

$$\Psi(\xi, z, t) = B(\xi, t) e^{-\xi z} \quad (17)$$

Используя преобразованное граничное условие на поверхности жидкости (13), найдём производную решения (17) при $z = 0$:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\xi B(\xi, t) \quad (18)$$

Учитывая (13), получим:

$$B(\xi, t) = -\frac{1}{\xi} \frac{\partial W}{\partial t} \quad (19)$$

Таким образом, преобразованный потенциал скорости равен:

$$\Psi(\xi, z, t) = -\frac{1}{\xi} \frac{\partial W}{\partial t} e^{-\xi z} \quad (20)$$

Подставим выражение для $\Psi(\xi, z, t)$ в преобразованное уравнение Бернулли (14). Сначала найдем производную $\frac{\partial \Psi}{\partial t} \Big|_{z=0} = -\frac{1}{\xi} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} e^{-\xi z} \Big|_{z=0} =$

$$= -\frac{1}{\xi} \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2}.$$

Следовательно, спектр динамического давления по волновым числам выражается как:

$$P_d(\xi, t) = \frac{\rho_s}{\xi} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \quad (21)$$

Подставим выражение (21) в преобразованное уравнение изгиба ледяного покрова (15) и получим окончательный вид спектрального уравнения динамического изгиба льда:

но $\bar{r}$ и L_c будут различны для каждого рассматриваемого случая изгиба ледового поля.

Определим выражение для безразмерного спектра прогибов по волновым числам, для этого подставим (23), а также $dr = L_c d\bar{r}$ в (11), получим:

$$W(\xi, t) = L_c^2 w_c \int_0^\infty \bar{r} J_0(\bar{\xi} \bar{r}) \bar{w}(\bar{r}, \bar{t}) d\bar{r} \quad (24)$$

Заметим, что в полученном выражении интеграл $\int_0^\infty \bar{r} J_0(\bar{\xi} \bar{r}) \bar{w}(\bar{r}, \bar{t}) d\bar{r}$ представляет собой преобразование Ханкеля безразмерного прогиба $\bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t}) = H_0 \{ \bar{w}(\bar{r}, \bar{t}) \}$, то есть:

$$W = L_c^2 w_c \bar{W} \quad (25)$$

Учитывая (23), имеем:

$$W_c = L_c^2 w_c \quad (26)$$

Теперь, подставляя (23) и (26) в (22), выразим размерные величины спектрального уравнения

$$\frac{Dw_c}{L_c^2} \bar{\xi}^4 \bar{W} + \frac{mL_c^2 w_c}{T_c^2} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2} + \rho_s g L_c^2 w_c \bar{W} - \frac{\rho_s L_c^3 w_c}{T_c^2 \bar{\xi}} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2} = \frac{P_c \bar{P}}{2\pi} \quad (27)$$

Для того, чтобы сделать это уравнение безразмерным, разделим обе его части на один из коэффициентов, иными словами, нормируем на один из членов. Как показал проведённый анализ, в

$$\frac{D}{\rho_s g L_c^2} \bar{\xi}^4 \bar{W} + \frac{m}{\rho_s g T_c^2} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2} + \bar{W} - \frac{L_c}{\bar{\xi} g T_c^2} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2} = \frac{P_c}{2\pi \rho_s g w_c L_c^2} \cdot \bar{P} \quad (28)$$

Коэффициенты перед членами уравнения (28) представляют собой адромные критерии (инварианты) подобия [14] динамического изгиба ледяного покрова, т.е. безразмерные комплексы, сохраняющие постоянное значение во всех точках ледового поля для всех случаев, описываемых уравнением (28):

$$K_1 = \frac{D}{\rho_s g L_c^2} = \text{idem}, K_2 = \frac{m}{\rho_s g T_c^2} = \text{idem}, \quad (29)$$

$$K_3 = \frac{L_c}{\bar{\xi} g T_c^2} = \text{idem}, K_4 = \frac{P_c}{2\pi \rho_s g w_c L_c^2} = \text{idem}$$

Как показано в [14], приведение уравнения к безразмерному виду позволяет получить критериальное уравнение, которое не только буквенно, но и численно одинаково для всего класса рассматриваемых физических явлений. Соотношения между образующими его критериями наиболее полно характеризуют сущность протекающих процессов. Таким образом, для дальнейшего анализа деформации ледяного покрова сосредоточенной нагрузкой требуется определить характерные параметры L_c , T_c , P_c , w_c , входящие в выражения (29).

Из второй теоремы теории подобия следует, что характерные параметры задачи могут быть выбраны произвольно [14], однако в нашем случае с целью анализа уравнения изгиба определим их таким образом, чтобы уравнение (28) имело более компактный, выявляющий безразмерные параметры и удобный для анализа и обобщения результатов вид. Для этого желательно, чтобы коэффициенты при наиболее важных членах безразмерного уравнения оказались равны единице или другим безразмерным числовым константам.

Для того, чтобы коэффициент перед первым слагаемым в уравнении (28), отражающим действие сил упругости, оказался равным единице определим значение линейного масштаба как:

$$L_c = \left(\frac{D}{\rho_s g} \right)^{1/4} \quad (30)$$

Найденное выражение представляет собой характерную длину изгиба льда [10], определяющую пространственный масштаб деформации. Этот параметр представляет собой расстояние, на котором прогиб от локально приложенной нагрузки

динамического изгиба через безразмерные переменные и характерные параметры:

данном случае удобнее всего использовать коэффициент перед гидростатическими силами, т.е. $\rho_s g L_c^2 w_c$:

(например, сосредоточенной силы) к ледяной пластине, лежащей на воде, в статическом случае существенно убывает. Прогиб всей ледяной пластины с увеличением расстояния от точки приложения силы проявляет осциллирующее затухание с экспоненциальной огибающей, а L_c определяет скорость этого затухания. Этот параметр имеет прямую связь с задачей статического изгиба ледяного покрова, так как ранее он был получен из рассмотрения условия равновесия сил упругости и сил поддержания, возникающих при деформации ледяного покрова [10; 15]:

$$D \nabla^4 w(r) + \rho_s g w(r) = q(r) \quad (31)$$

Решение уравнения деформации ледяной пластины под действием сосредоточенной нагрузки получил Герц, оно выражается через функции Кельвина:

$$w(r) = \frac{Pl^2}{2\pi D} \text{kei}(r/L_c), \quad (32)$$

где $\text{kei}(x)$ – функция Кельвина нулевого порядка второго рода, характеризующая затухание прогибов пластины.

Выражение для прогиба льда в начале координат (в точке приложения сосредоточенного усилия) [15]:

$$w(r \rightarrow 0) = w_0 = \frac{Pl_c^2}{8D} \quad (33)$$

Определим значения характерного размера изгиба ледяной пластины (результаты приведены на рис. 1) для наиболее широко применяемых в практических расчётах параметров льда [10], в том числе для модельного пресноводного льда очень малой толщины:

- речной (пресноводный) лёд: $E = 6 \times 10^9$ Па, $\rho_s = 1000$ кг/м³, $\rho_a = 920$ кг/м³, $\nu = 0,345$;
- морской (солёный) лёд: $E = 3 \times 10^9$ Па, $\rho_s = 1025$ кг/м³, $\rho_a = 920$ кг/м³ (по рекомендациям [10]), $\nu = 0,345$.

Заметим, что как следует из формул для L_c и D , $L_c \sim h_n^3$.

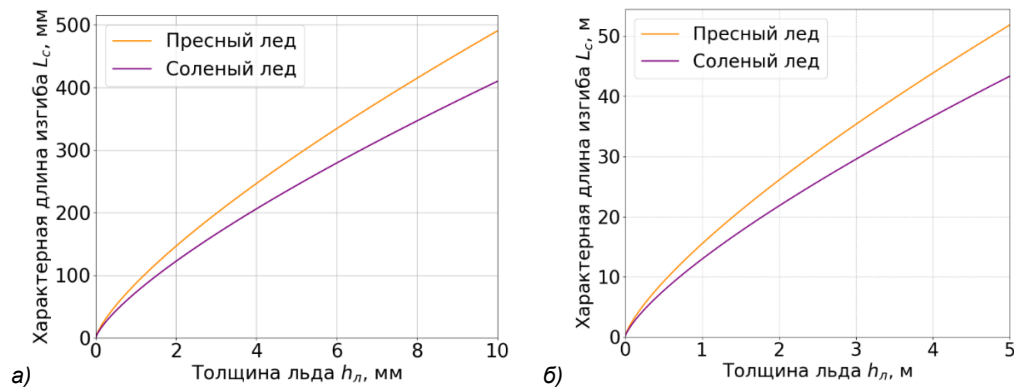


Рис. 1 Характерный размер изгиба: а) – модельный лёд малых толщин; б) – натурный лёд

Характерный параметр времени динамического изгиба льда T_c определим аналогичным образом, предположив равенство единице коэффициента перед вторым членом уравнения (28):

$$T_c = \sqrt{\frac{m}{\rho_e g}} \quad (34)$$

Этот коэффициент характеризует время колебания льда на гидростатическом основании. Проведём анализ получившегося параметра времени. Представим бесконечно малый фрагмент льда, плавающий на поверхности воды. Поведение этой динамической системы можно описать с помощью уравнения простого гармонического осциллятора (свободных гармонических колебаний):

$$m \frac{d^2 w}{dt^2} + \rho_e g w = 0 \quad (35)$$

Разделив обе части этого уравнения на m , перепишем его в стандартном виде для линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 w}{dt^2} + \frac{\rho_e g}{m} w = 0 \quad (36)$$

Решение уравнений такого вида известно, оно имеет вид гармонических колебаний, в данном случае:

$$w(t) = A \cos(\Omega t + \phi), \quad (37)$$

где A – амплитуда; ϕ – фаза; $\Omega = \sqrt{\frac{\rho_e g}{m}}$ – угловая частота, которая определяет, насколько быстро

меняется фаза, т.е. насколько быстро происходят колебания. Связь угловой частоты Ω с линейной f и периодом колебаний t определяется, как известно, формулами:

$$\Omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (38)$$

Таким образом, можем заметить, что характерный параметр времени изгиба (34) представляет собой промежуток времени, равный $\frac{1}{2\pi}$ от периода собственных колебаний льда, плавающего на поверхности воды, т.е. время, за которое система производит один радиан собственных колебаний под действием только сил инерции льда и гидростатического давления воды. Если процессы происходят за время намного большее, чем T_c , то система успевает адаптироваться к изменению нагрузки, и инерционные эффекты масс льда играют малую роль.

Определим значения характерного времени динамического изгиба льда (34) (рис. 2), используя те же значения, что и при определении характерного размера (рис. 1).

Вывод: солёность льда не оказывает существенного влияния на характерное время динамического изгиба (для использовавшихся в расчёте по рекомендациям [10] характеристик льда).

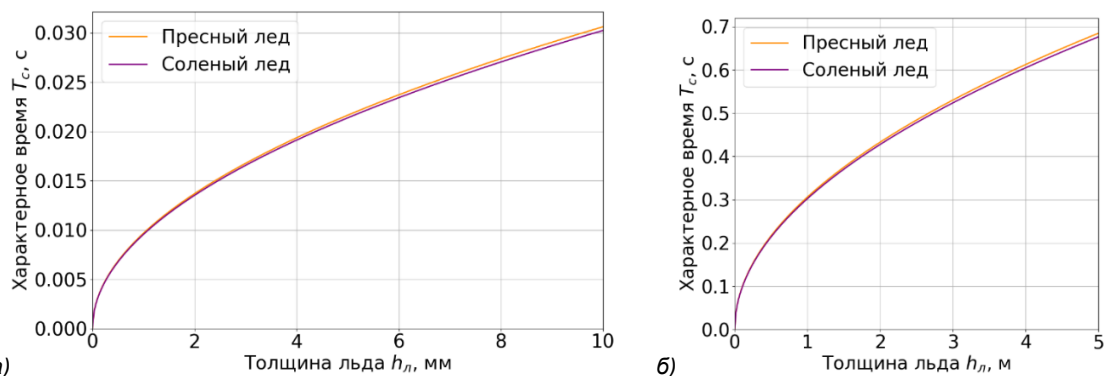


Рис. 2 Характерное время динамического изгиба: а) – модельный лёд малых толщин; б) – натурный лёд

Для четвёртого коэффициента в (28) введём безразмерный параметр α , представляющий собой

отношение присоединённой массы воды к массе льда на единицу площади ледяного покрова:

$$\alpha = \frac{\rho_s L_c}{m} \quad (39)$$

Для анализа этот коэффициент также удобно представить в следующем виде:

$$\alpha^{-1} = \rho_* \cdot \frac{h_s}{L_c}, \quad (40)$$

где $\rho_* = \rho_s / \rho_e$ – относительная плотность льда; h_s – толщина льда; L_c – характерная длина изгиба льда.

Для определения коэффициента в правой части уравнения (28) в качестве характерного прогиба w_c выберем прогиб под сосредоточенной нагрузкой для статического случая (33). С учётом (30):

$$P_c = 8\sqrt{D\rho_e g} w_c \quad (41)$$

В этом выражении, определяющем связь между w_c и P_c , коэффициент $8\sqrt{D\rho_e g}$ можно характеризовать как статическую жёсткость изгиба льда. Тогда в (28) коэффициент перед нагрузкой есть:

$$\frac{P_c}{2\pi\rho_e g \frac{P_c}{8\sqrt{D\rho_e g}} \left(\frac{D}{\rho_e g}\right)^{1/2}} = \frac{1}{2\pi\rho_e g \frac{\sqrt{D}}{8\rho_e g \sqrt{D}}} = \frac{4}{\pi} \quad (42)$$

Теперь запишем окончательный вид безразмерного уравнения спектра прогибов льда (28), используя полученные параметры (30), (34), (39) и (41):

$$\bar{\xi}^4 \bar{W} + \left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right) \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2} + \bar{W} = \frac{4}{\pi} \bar{P} \quad (43)$$

Безразмерное уравнение и входящие в него параметры позволяют выполнить качественный и количественный анализ динамического изгиба льда в независимости от конкретных его характеристик и типов (например, можно рассматривать различные материалы льда) или условий эксперимента. Например, анализ деформаций льда в масштабах $\bar{r} \approx 1$ и $\bar{t} \approx 1$ позволяет понять, насколько быстро развиваются динамические процессы по сравнению с характерными длиной изгиба и временем колебаний льда. Параметр α напрямую показывает, насколько важны эффекты присоединённой массы воды по сравнению с собственной инерцией льда.

Полученное уравнение (42) иллюстрирует вклад различных сил в деформацию ледяного покрова:

- $\bar{\xi}^4 \bar{W}$ – упругие силы сопротивления прогибу пластины (жёсткость). Коэффициент $\bar{\xi}^4$ показывает, что они быстро растут с увеличением безразмерного радиального волнового числа $\bar{\xi}$. Это означает, что пластина оказывает сильное сопротивление малым пространственным деформациям (с большими $\bar{\xi}$);
- $\bar{W}$ – гидростатические силы (плавучесть), возникающие из-за прогиба пластины и вытеснения воды. Эти силы пропорциональны самому прогибу;

- $\left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right) \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \bar{t}^2}$ – силы инерции (собственная инерция льда + присоединённые массы воды), коэффициент $\left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right)$ представляет собой безразмерную эффективную массу на единицу площади, соответствующую данной спектральной компоненте с волновым числом $\bar{\xi}$:
 - при $\left|\frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right| \ll 1 \Rightarrow \bar{\xi} \gg \alpha \Rightarrow \bar{\xi} \gg \frac{\rho_s}{\rho_e h}$ влияние собственной инерции льда больше влияния присоединённых масс воды;
 - при $\left|\frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right| \gg 1 \Rightarrow \alpha \gg \bar{\xi} \Rightarrow \bar{\xi} \ll \frac{\rho_s}{\rho_e h}$ влияние присоединённых масс воды больше влияния собственной инерции льда;
- $\frac{4}{\pi} \bar{P}$ – внешняя приложенная ко льду нагрузка в безразмерном виде. Коэффициент $4/\pi$ является результатом приведения уравнения к безразмерному виду и выбора характерных параметров соответствующего вида. Теперь, определив характерные параметры, можем провести анализ наиболее значимых безразмерных переменных (23):
- Безразмерная радиальная координата изгиба пластины $\bar{r} = r/L_c$. Определяет положение точки на пластине в радиальном направлении относительно характерной длины изгиба. Возможные значения: $\bar{r} \geq 0$. $\bar{r} = 0$ соответствует точке приложения нагрузки, $\bar{r} \approx 1$ соответствуют расстоянию порядка характерной длины изгиба ледяной пластины, большие значения (например, $\bar{r} \gg 1$) соответствуют областям вдали от нагрузки, где прогибы малы.
- Безразмерное время $\bar{t} = t/T_c$. Определяет момент времени относительно масштаба динамических процессов в системе. Возможные значения: $\bar{t} \geq 0$. $\bar{t} = 0$ соответствует начальному моменту времени, $\bar{t} \approx 1$ соответствует промежутку времени порядка характерного периода колебаний льда, большие значения (например, $\bar{t} \gg 1$) в определённых случаях могут советовать квазистатическому или установившемуся режиму.
- Безразмерное радиальное волновое число (безразмерный параметр Ханкеля) $\bar{\xi} = \xi L_c$. Это мера скорости пространственного изменения прогиба w по радиусу r , нормированная на характерную скорость пространственного изменения L_c^{-1} , присущую системе. Возможные значения: $\bar{\xi} \geq 0$. Согласно (10) все волновые числа (т.е. все моды от 0 до ∞) вносят свой вклад в деформационную картину, т.е. решением является их суперпозиция, а прогиб ледяного покрова является результатом наложения деформаций в различных

пространственных масштабах. Тем не менее, мы можем оценить какие именно физические процессы доминируют при различных величинах $\bar{\xi}$:

- При малых $\bar{\xi}$ ($\bar{\xi} \ll 1$, т.е. $\xi \ll \frac{1}{L_c}$, длинные волны) силы упругости (член $\bar{\xi}^4 \bar{W}$ уравнения (42)) малы по сравнению с гидростатическими силами сопротивления деформации упругого основания (член $\bar{W}$ уравнения (42)). В этом случае безразмерная эффективная масса $\left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right)$ будет небольшой, следовательно, влияние присоединённых масс жидкости на процесс деформации при значительных масштабах прогибов льда велико. Это означает, что для плавных, крупномасштабных изгибов (с малыми волновыми числами) инерция воды, движущейся вместе со льдом, оказывает большее сопротивление движению, чем собственная инерция самого льда.
- При значениях порядка характерного размера изгиба льда ($\bar{\xi} \approx 1$, т.е. $\xi \approx 1/L_c$) члены уравнения, характеризующие силы упругости льда и гидростатические силы соизмеримы. Относительное доминирование инерции льда или присоединённой массы воды в этом диапазоне определяется значением α . Если $\alpha \ll 1$, то при $\bar{\xi} \approx 1$ инерция льда доминирует над присоединённой массой воды, а если $\alpha \gg 1$ и $\bar{\xi} \approx 1$, наоборот. При $\alpha \approx 1$ оба инерционных эффекта соизмеримы.
- При больших $\bar{\xi}$ ($\bar{\xi} \gg 1$, т.е. $\xi \gg \frac{1}{L_c}$, короткие волны) силы упругости доминируют, оказывая значительное сопротивление прогибу льда и коротким волновым возмущениям. Безразмерная эффективная масса $\left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right)$ приближается к единице (собственные силы инерции льда), так как при малых модах влияние присоединённой массы жидкости уменьшается. Это означает, что для резких, мелкомасштабных деформаций (с большими волновыми числами) собственная инерция массы льда, ускоряющаяся при изгибе, важнее инерции воды, поскольку перетекание на таких масштабах менее эффективно вовлекает большие объёмы воды в движение.
- Величина безразмерного отношения масс воды и льда α позволяет определить вклад присоединённых масс воды в деформационную картину: при малых значениях α (большая толщина льда, высокая плотность) член,

отвечающий за влияние присоединённых масс воды уменьшает свой вклад в инерционные силы в сравнении с собственной инерцией льда, а при больших значениях (тонкий лёд или лёд меньшей плотности) – наоборот.

На практике для оценки влияния присоединённых масс воды на процесс изгиба льда неудобно использовать волновые числа ξ , так как реальные физические процессы происходят в пространстве $r-t$. Для предварительной оценки можно принять во внимание, что в интеграле обратного преобразования Ханкеля (который дает прогиб в обычном пространстве) наибольший вклад вносят те значения ξ , которые находятся вблизи L_c^{-1} . Это связано с тем, что именно на этом пространственном масштабе происходит характерное затухание статического прогиба и динамические эффекты также имеют характерные масштабы, связанные с L_c и T_c . Не смотря на то, что поле прогибов льда под сосредоточенной нагрузкой "содержит" в себе все безразмерные волновые числа $\bar{\xi}$, члены уравнения изгиба (упругость, гидростатическое давление, инерция льда, присоединённая масса воды) имеют разную зависимость от $\bar{\xi}$. Эти зависимости действуют как "фильтр", определяя, какие пространственные масштабы (волновые числа) вносят наибольший вклад в результирующий прогиб. Таким образом, для оценки влияния присоединённых масс воды можно сравнить волновые числа, характерные для задачи (для случая сосредоточенной нагрузки это L_c^{-1}) и пороговое волновое число $(\rho_s/\rho_a h)$, которое было получено при анализе члена $\left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right) \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial t^2}$

безразмерного уравнения (42). В этом случае, если:

- $L_c^{-1} \gg \frac{\rho_s}{\rho_a h}$ или $\alpha \ll 1$, то в наиболее значимом диапазоне волновых чисел доминирует инерция льда;
- $L_c^{-1} \ll \frac{\rho_s}{\rho_a h}$ или $\alpha \gg 1$, то в наиболее значимом диапазоне волновых чисел доминирует инерция присоединённых масс воды;
- $L_c^{-1} \approx \rho_s/\rho_a h$, то в наиболее значимом диапазоне волновых чисел оба эффекта важны.

Определим значения α по (39) для солёного и пресноводного льдов различных толщин, результат приведён на рис. 3. Из анализа полученных графиков видим, что значения α убывают на всём промежутке расчётных значений (т.к. $\alpha \propto h_a^{-1/4}$), что отражает увеличение вклада собственной инерции льда при изгибе с ростом его толщины. Тем не менее, для реальных толщин льда $\alpha \gg 1$. Следовательно, в балансе сил инерция присоединённых масс воды всегда будет доминировать в наиболее значимых волновых числах, а собственной инерцией льда, особенно тонкого, можно пренебрегать в приближённых расчётах.

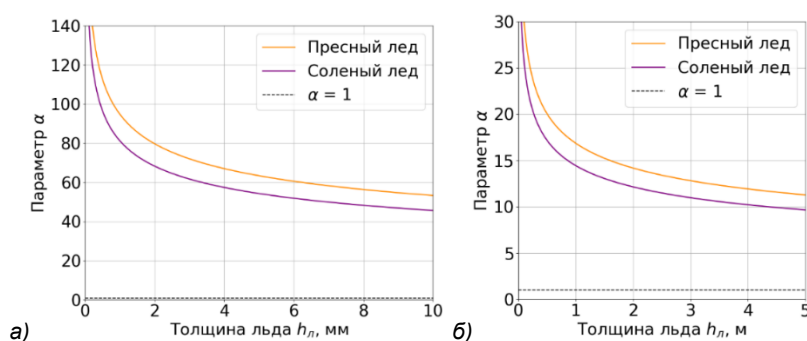


Рис. 3 Зависимость значений параметра α от толщины льда для: а) – модельного льда малых толщин; б) – натурального льда

3. Показатель динамического характера изгиба ледяного покрова

При исследовании динамики ледяного покрова при поперечном нагружении, а также при анализе движения ледокольного судна в сплошных льдах очень важно правильно оценить режим нагружения ледяного покрова. При небольших скоростях его можно рассматривать как квазистатический, в этом случае можно воспользоваться решением более простого уравнения (31). Попробуем дать определение порогового значения скорости нагружения, опираясь на который можно сделать выводы о характере процесса. Для этого введём новый характерный параметр – характерную скорость динамической реакции льда:

$$v_c = \frac{L_c}{T_c} = \frac{(D\rho_s g)^{1/4}}{(\rho_l h)^{1/2}} \quad (43)$$

Таким образом, режим нагружения определяется тем, насколько быстро происходит движение по сравнению с собственным временным масштабом системы. В рассматриваемой задаче прогиб льда в точке $r = 0$ происходит с постоянной скоростью v_{const} , тогда:

- при квазистатическом режиме нагружения инерционные силы (и собственная инерция льда, и инерция присоединённых масс воды) должны быть малы по сравнению с силами упругости и гидростатического давления. Это происходит, когда скорость нагружения значительно меньше характерной скорости системы. Если выполняется это условие, то

динамические члены (с производными по времени) в безразмерном уравнении малы, и решение близко к статическому:

$$\frac{v_{const}}{v_c} \ll 1 \quad (44)$$

- при динамическом режиме нагружения инерционные силы должны быть соизмеримы или превышать силы упругости и гидростатического давления. Это происходит, когда скорость нагружения сравнима или больше характерной скорости системы. В этом случае инерционные члены уравнения существенно влияют на прогиб и реакцию льда:

$$\frac{v_{const}}{v_c} \geq 1 \quad (45)$$

Определим значения характерной скорости (43) для морского и пресноводного льда различных толщин, результаты приведены на рис. 4. На обоих графиках отчетливо видно, что характерная скорость изгиба увеличивается с ростом толщины льда ($v_c \propto h^{1/4}$). Это означает, что в более толстом льду

возмущения, связанные с изгибом, распространяются быстрее, и динамические эффекты становятся значимыми при более высоких скоростях деформации по сравнению с тонким льдом. Однако, зависимость имеет степень 1/4, что говорит о замедлении роста скорости при увеличении толщины. Начальный рост скорости в диапазоне тонкого льда более резкий в абсолютных значениях, чем при переходе от среднего к толстому льду.

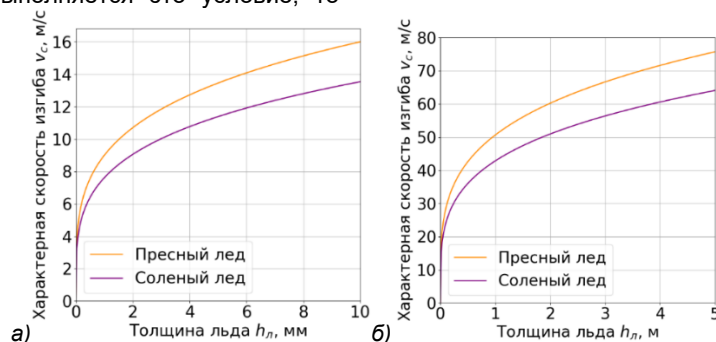


Рис. 4 Характерная скорость изгиба: а) – модельного льда малых толщин; б) – натурального льда

Полученные значения характерной скорости изгиба льда довольно велики по сравнению со скоростями, типичными для ледокольных судов. Тем не менее, стоит иметь ввиду, что значения

характерной скорости на рис. 4 иллюстрируют ситуацию, когда режим изгиба льда совершенно точно можно считать динамическим. Условие квазистатичности (44) требует, чтобы скорость

нагружения льда была много меньше, чем v_c и, таким образом, диапазон скоростей $0 < v_{const} < v_c$ будет соответствовать переходному режиму. Установление более конкретных значений скорости нагружения, когда пренебрежение динамическими членами уравнения (15) даст ошибку в допустимых пределах невозможно без его точного решения, получение которого встречает значительные трудности. Таким образом, установление конкретных практически значимых величин критерия квазистатического изгиба льда требует проведения экспериментальных исследований.

4. Интерпретация распределённого нагружения ледяного покрова сосредоточенной нагрузкой

Одним из наиболее важных вопросов, которые возникают при проведении экспериментальных

исследований процесса деформации ледяного покрова под поперечной нагрузкой является вопрос о влиянии площади распределённой нагрузки. В уравнении (22) фигурирует сосредоточенное усилие, т.е. нагрузка, распределённая по бесконечно малой площади. В реальности же площадка экспериментальной установки, осуществляющая давление на лёд, имеет конечные размеры. Для выявления критерия, по которому можно было бы сделать вывод о необходимости учёта площади распределения нагрузки, рассмотрим спектральное уравнение динамического изгиба бесконечной ледяной пластинки, покоящейся на идеальной несжимаемой жидкости. Его левая часть будет такая же, как в уравнении (22) для сосредоточенного усилия:

$$D\xi^4 W(\xi, t) + m \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} + \rho_e g W(\xi, t) - \frac{\rho_e}{\xi} \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} = Q(\xi, t) \quad (46)$$

где $Q(\xi, t)$ – спектральное распределение нагрузки $q(r, t)$ по волновым числам:

$$Q(\xi, t) = \int_0^\infty r J_0(\xi r) q(r, t) dr \quad (47)$$

В данной задаче интерес представляет нагрузка, распределённая по площади круга радиусом R с центром в начале координат: $q(r, t) = q_0(t)$ для $0 \leq r \leq R$ и $q(r, t) = 0$ для $r > R$, тогда:

$$Q(\xi, t) = q_0(t) \int_0^R r J_0(\xi r) dr \quad (48)$$

Используя интегральное свойство функций Бесселя $\int z J_0(z) dz = z J_1(z)$ и подстановку $z = \xi r$,

$$Q(\xi, t) = \frac{P(t)}{\pi R \xi} J_1(\xi R) \quad (49)$$

$$D\xi^4 W(\xi, t) + m \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} + \rho_e g W(\xi, t) - \frac{\rho_e}{\xi} \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} = \frac{P(t)}{\pi R \xi} J_1(\xi R) \quad (50)$$

Введём в это уравнение безразмерные переменные и характерные масштабы (23), добавив к ним безразмерный радиус распределённой нагрузки:

$$\bar{\xi} \bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t}) + \left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right) \frac{\partial^2 \bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t})}{\partial \bar{t}^2} + \bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t}) = \frac{8\bar{P}(t)}{\pi \bar{\xi} \bar{R}} J_1(\bar{\xi} \bar{R}) \quad (52)$$

Если распределённая нагрузка (49) мала, то решение уравнения (52) должно приближаться к (42). Левые части этих уравнений одинаковы, следовательно, правая часть (42), представляющая собой математическую запись действующей на лёд сосредоточенной нагрузки, будет стремиться аппроксимировать правую часть (52):

$$\frac{8\bar{P}}{\pi \bar{\xi} \bar{R}} J_1(\bar{\xi} \bar{R}) \approx \frac{4}{\pi} \bar{P} \quad (53)$$

или

$$dz = d(\xi r), \text{ получим: } \int r J_0(\xi r) dr = \frac{1}{\xi^2} \int \xi r J_0(\xi r) d(\xi r) = \frac{r}{\xi} J_1(\xi r). \text{ Вычисление определённого интеграла}$$

$$\text{даёт: } \int_0^R r J_0(\xi r) dr = \frac{r}{\xi} J_1(\xi r) \Big|_0^R = \frac{R}{\xi} J_1(\xi R) - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r}{\xi} J_1(\xi r).$$

Известно, что при малых z функция $J_1(z) \approx z/2$ [18],

$$\text{получим: } \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r}{\xi} J_1(\xi r) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r^2}{2} = 0. \text{ Принимая во}$$

$$\text{внимание, что } q_0(t) = \frac{P(t)}{\pi R^2}, \text{ получим вид}$$

преобразования Ханкеля распределённой нагрузки и уравнения изгиба в целом:

$$\bar{R} = \frac{R}{L_c} \quad (51)$$

Выполним аналогичные (27) действия, в результате получим уравнение в безразмерном виде:

$$J_1(\bar{\xi} \bar{R}) \approx \frac{\bar{\xi} \bar{R}}{2} \quad (54)$$

Значения $\bar{\xi} \bar{R}$, при которых точность этой аппроксимации окажется приемлемой, и будут являться критерием малости площади распределения нагрузки. Полученное выражение (54) представляет собой свойство функции Бесселя $J_1(z) \approx z/2$ [18], которое выполняется при малых

$z = \bar{\xi} \bar{R}$ (получено из её разложения в ряд). Однако, $\bar{\xi}$ – переменная интегрирования в пространстве Ханкеля, которая принимает все значения от 0 до бесконечности. Тем не менее, не все значения $\bar{\xi}$ несут одинаковый вклад в решение уравнения; как уже ранее обсуждалось, наиболее значимыми являются те значения $\bar{\xi}$, где отклик системы наибольший. Для сосредоточенной нагрузки, наиболее значимый вклад приходится на волновые числа порядка обратной характерной длины изгиба, то есть $\bar{\xi} \approx 1$. В результате мы получаем следующий вид критерия:

$$\bar{R} \ll 1 \text{ или } R \ll L_c \quad (55)$$

Таким образом для того, чтобы считать распределённую нагрузку сосредоточенной необходимо, чтобы её радиус был намного меньше характерной длины изгиба ледяной пластины.

На практике при проведении экспериментальных исследований деформации ледяного покрова поперечной нагрузкой технологически может быть достаточно сложно

$$D_{\xi}^4 W(\xi, t) + m \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} + \rho_s g W(\xi, t) - \frac{\rho_s}{\xi} \frac{\partial^2 W(\xi, t)}{\partial t^2} = \frac{P(t)}{2\pi} J_0(\xi R) \quad (59)$$

Введём в это уравнение безразмерные переменные и характерные масштабы (23) и

обеспечить равномерное распределение нагрузки по некоторой площади. Для площадки, с помощью которой производится нагружение льда, часто выбирают такие материалы, как дерево или пластмассы. Их жёсткость достаточно высока, и схема нагружения льда в данном случае представляет собой нагрузку, распределённую по окружности радиусом R :

$$q(r, t) = \frac{P(t)}{2\pi R} \delta(r - R) \quad (56)$$

где $\delta(r - R)$ – дельта-функция Дирака; $P(t)$ – равнодействующая распределённой нагрузки.

Найдём преобразование Ханкеля нулевого порядка (9) от этой распределённой нагрузки:

$$Q(\xi, t) = \int_0^{\infty} r J_0(\xi r) \frac{P(t)}{2\pi R} \delta(r - R) dr \quad (57)$$

Используя свойство дельта-функции $\int_0^{\infty} f(r) \delta(r - R) dr = f(R)$ при $R > 0$, получим:

$$Q(\xi, t) = \frac{P(t)}{2\pi} J_0(\xi R) \quad (58)$$

Спектральное уравнение изгиба:

(51), выполним преобразования, аналогичные (52), получим:

$$\bar{\xi}^4 \bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t}) + \left(1 - \frac{\alpha}{\bar{\xi}}\right) \frac{\partial^2 \bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t})}{\partial \bar{t}^2} + \bar{W}(\bar{\xi}, \bar{t}) = \frac{4}{\pi} \bar{P}(\bar{t}) J_0(\bar{\xi} \bar{R}) \quad (60)$$

Аналогично (53), критерием, показывающим, что можно пренебречь размерами площадки нагружения и считать нагрузку сосредоточенной, будут являться значения безразмерных параметров, позволяющие наилучшим образом аппроксимировать правой частью уравнения (42) правую часть уравнения (60):

$$\frac{4}{\pi} \bar{P} J_0(\bar{\xi} \bar{R}) \approx \frac{4}{\pi} \bar{P} \quad (61)$$

или

$$J_0(\bar{\xi} \bar{R}) \approx 1 \quad (62)$$

Данное выражение представляет собой свойство функции Бесселя нулевого порядка [18], известное из её разложения в ряд и проявляющееся при малых $\bar{\xi} \bar{R}$. Видим, что критерий малости радиуса нагрузки, распределённой по длине окружности совпадает с аналогичным для случая нагрузки, распределённой по площади круга (55).

Построим график, иллюстрирующий погрешность, возникающую при попытке представить распределённую по кругу или по окружности нагрузку в виде сосредоточенного усилия (рис. 5).

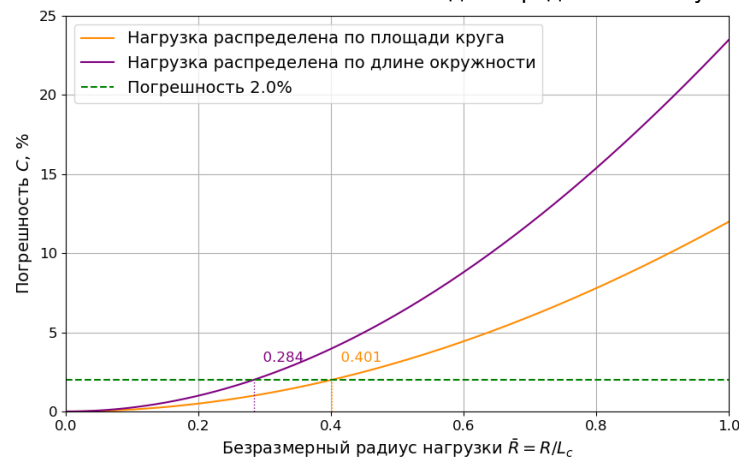


Рис. 5 Погрешность представления нагрузки, распределённой по площади круга и по длине окружности, сосредоточенным усилием

Представленный график показывает процентную ошибку аппроксимации сосредоточенной нагрузкой распределённой нагрузки в зависимости от безразмерного радиуса $\bar{R} = R/L_c$ при $\bar{\xi} = 1$. Горизонтальная пунктирная линия соответствует 2% ошибке аппроксимации. Из графика видно: для того, чтобы пренебречь площадью распределения нагрузки с погрешностью менее 2% необходимо, чтобы радиус R распределённой нагрузки составил менее 40,1% характерного размера изгиба льда L_c для нагрузки, распределённой по площади круга, и менее 28,4% для нагрузки, распределённой по длине окружности.

Этот анализ проведен при фиксированном значении безразмерного волнового числа $\bar{\xi} = 1$. В реальности в решении присутствуют все волновые числа, и их вклад оценивается функцией отклика системы. Однако, $\bar{\xi} = 1$ является хорошим приближением для предварительного анализа, поскольку оно соответствует масштабу, определяемому характерной длиной изгиба L_c , который доминирует в отклике на сосредоточенную нагрузку.

Заключение

На основе проведенного анализа безразмерного спектрального уравнения динамического изгиба ледяного покрова под действием сосредоточенной нагрузки, можно сформулировать следующие выводы.

Определены ключевые характерные масштабы задачи: характерная длина изгиба льда L_c , характеризующая масштабность деформации; характерное время T_c , отражающее время собственных колебаний льда на гидростатическом основании; характерный прогиб w_c и характерная сила P_c . На основе этих масштабов сформированы безразмерные параметры изгиба.

Анализ коэффициентов уравнения позволил детально исследовать вклад различных сил в процесс деформации ледяного покрова. Показано, что упругие силы доминируют на коротких волнах в

форме функций Бесселя (больших волновых числах), в то время как инерционные эффекты становятся более значимыми на длинных волнах (малых волновых числах). Выполнен анализ влияния присоединенных масс воды. Установлено, что в балансе сил инерция воды доминирует над собственной инерцией льда в наиболее значимом диапазоне волновых чисел, особенно для тонкого льда. Вклад присоединенных масс воды оценивается безразмерным параметром α .

Определен показатель динамического характера изгиба ледяного покрова – характерная скорость динамической реакции льда v_c . Эта скорость служит критерием для оценки режима нагружения: при скоростях намного меньше v_c режим можно считать квазистатическим, а при скоростях, сравнимых или превышающих v_c проявляются динамические эффекты. Значения характерной скорости увеличиваются с ростом толщины льда, хотя и с замедлением. Отмечено, что для установления точных критериев перехода между режимами требуются экспериментальные исследования.

Также установлен критерий, позволяющий представить распределенную по конечной площади нагрузку в виде сосредоточенной силы. Показано, что для пренебрежения площадью распределения нагрузки с погрешностью менее 2% радиус распределенной нагрузки должен составлять менее 40,1% характерной длины изгиба для нагрузки, распределенной по площади круга, и менее 28,4% для нагрузки, распределенной по длине окружности, при аппроксимации, ориентированной на наиболее значимое волновое число $\bar{\xi} \approx 1/L_c$.

Полученные безразмерные параметры и критерии имеют прямое практическое значение для планирования и интерпретации натурных и модельных экспериментов при исследовании процесса разрушения ледяного покрова судами. Они позволяют обобщить результаты исследований, полученные при различных характеристиках льда и условиях эксперимента, и применимы для анализа процессов деформации льда в различных пространственных и временных масштабах.

Литература

1. Зуев В. А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Ю. А. Двойченко // Вопросы теории, прочности и моделирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. – 1984. – С. 4-13.
2. Себин А. С. Исследование композитной модели ледяного покрова (GP-ice), составленной из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм / А. С. Себин, К. Д. Блинов, Ю. А. Двойченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3 часть 3. – С. 94-105.
3. Moving Loads on Ice Plates / V. A. Squire, R. J. Hosking, A. D. Kerr, P. J. Langhorne. – Springer Science & Business Media, 1996. – 244 с.
4. Хейсин Д. Е. Динамика ледяного покрова / Д. Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967. – 215 с.
5. Букатов А. Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом / А. Е. Букатов. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. – 360 с.
6. Распространение поверхностных волн в ледовых условиях / А. Е. Букатов, А. А. Букатов, В. В. Жарков, Д. Д. Завьялов. – Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. – 204 с.
7. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова, [и др.]. – М.: изд-во “Академия естествознания”, 2008. – 329 с.
8. Иванов К. Е. Грузоподъемность ледяного покрова и устройство дорог на льду / К. Е. Иванов. – Л.: Главсевморпуть, 1949. – 182 с.

9. Nzokou Tanekou F. Ice rupture hydrodynamic modeling / F. Nzokou Tanekou. – Quebec, Canada : Laval University, 2010. – 107 с.
10. Ионов Б. П. Ледовая ходкость судов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. – СПб. : Судостроение, 2001. – 512 с.
11. Двойченко Ю. А. Деформация и пролом ледяного поля / Ю. А. Двойченко // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. сб. – 1980. – С. 38-44.
12. Riska K. Design of ice breaking ships / K. Riska // Encyclopedia of Life Support. – The EOLSS International Editorial Council, UNESCO, 2011. – Т. 114.
13. Пустошный А. В. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике / А. В. Пустошный, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. – 2017. – № 3 (27). – С. 103-110.
14. Кирпичёв М. В. Теория подобия / М. В. Кирпичёв. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – 95 с.
15. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войтковский-Кригер. – изд. 2-е. – М. : Наука, 1966. – 635 с.
16. Debnath L. Integral Transforms and Their Applications / L. Debnath, D. Bhatta. – 2. – New York : Chapman and Hall/CRC, 2016. – 728 с.
17. Бейтмен Г. Таблицы интегральных преобразований : в 2 т. Т. 2 / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 328 с.
18. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 832 с.

References

1. Zuev V. A., Gramuzov E. M., Dvojchenko Y. A. Jeksperimental'nye issledovanija razrushenija ledjanogo pokrova [Experimental Studies of the Ice Cover Destruction]. Voprosy teorii, prochnosti i modelirovanija sudov, plavajushhih vo l'dah: mezhvuz. sb. 1984, P. 4-13.
2. Andrei S. Sebin, Kirill D. Blinov, Yuri A. Dvojchenko The investigation of a composite model of the ice cover (GP-ice) composed of a single layer of spherical granules with a diameter of 20 mm. Marine intellectual technologies. 2023. № 3 part 3, P. 94—105. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.049.
3. Moving Loads on Ice Plates / V. A. Squire, R. J. Hosking, A. D. Kerr, P. J. Langhorne. – Springer Science & Business Media, 1996. – 244 p.
4. Hejsin D. E. Dinamika ledjanogo pokrova [Ice Cover Dynamics]. L., Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1967, 215 p.
5. Bukatov A.E. Waves in the sea with a floating ice cover. Sevastopol, FSBSI MHI, 2017, 360 p.
6. Bukatov A. E., Bukatov A. A., Zharkov V. V., Zav'yalov D. D. Propagation of surface waves in ice conditions. Sevastopol, FSBSI FRC MHI, 2019, 204 p.
7. Kozin, V.M., Zhestkaja V. D., Pogorelova A. V. [at al.]. Applied problems in the dynamics of ice cover. - Moscow: The Academy of Natural Sciences, 2008, 329 p.
8. Ivanov K. E. Gruzopodyemnost' ledjanogo pokrova i ustrojstvo dorog na l'du [The carrying capacity of the ice cover and the construction of roads on the ice]. L., Glavsevmorput', 1949, 182 p.
9. Nzokou Tanekou F. Ice rupture hydrodynamic modeling / F. Nzokou Tanekou. – Quebec, Canada : Laval University, 2010. – 107 с.
10. Ionov B. P. Ledovaja hodkost' sudov [Icworthiness of Ships]. SPb., Sudostroenie, 2001. – 512 p.
11. Dvojchenko Y. A. Deformacija i prolom ledjanogo polja [Deformation and rupture of the ice field]. Teorija i prochnost' ledokol'nogo korablja: mezhvuz. sb., 1980, P. 38-44.
12. Riska K. Design of ice breaking ships / K. Riska // Encyclopedia of Life Support. – The EOLSS International Editorial Council, UNESCO, 2011. – Т. 114.
13. Pustoshny A. V., Sazonov K. E. Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round arctic operations. The Arctic: ecology and economy, 2017, no. 3 (27), pp. 103—110. (In Russian). DOI 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
14. Kirpichjov M. V. Teorija podobija [Similarity Theory]. M., Izd-vo AN SSSR, 1953, 95 p.
15. Timoshenko, S.P., Woinowsky-Krieger, S. Theory of Plates and Shells. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York., 1959, 635 p.
16. Debnath L. Integral Transforms and Their Applications / L. Debnath, D. Bhatta. – 2. – New York : Chapman and Hall/CRC, 2016. – 728 с.
17. Bateman H. et al. Tables of integral transforms. – New York : McGraw-Hill, 1954, 391 p.
18. Abramovic M., Stigan I. Spravochnik po special'nym funkcijam [A guide to special functions]. M. Nauka, gl. red. fiz.-mat. lit., 1979, 832 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Сергеевич Себин, старший преподаватель кафедры кораблестроения и авиационной техники, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (НГТУ), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: SebinAndrei@gmail.com

Двойченко Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения и авиационной техники Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: edbas2@yandex.ru

Куркин Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор РАН, заведующий кафедрой «Прикладная математика», проректор по научной работе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: aakurkin@gmail.com

Andrei S. Sebin, Senior Lecturer at the Department of Shipbuilding and Aviation Technology of the Nizhny Novgorod State Technical University, n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: SebinAndrei@gmail.com

Yuri A. Dvoichenko, Ph.D. (Eng), Assistant Professor at the Department of Shipbuilding and Aviation Technology of the Nizhny Novgorod State Technical University, n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: edbas2@yandex.ru

Andrei A. Kurkin, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Applied Mathematics, Vice-Rector for Scientific Work, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Minina str., 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: aakurkin@gmail.com

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 01.10.2025.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2025.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2025.



**Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: mit-journal@mail.ru http://morintex.ru

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены на сайте **www.morintex.ru**
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов».

На страницах журнала публикуются НОВЫЕ научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом должен быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

С 2025г. стоимость публикации 21500 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И. Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А. Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**